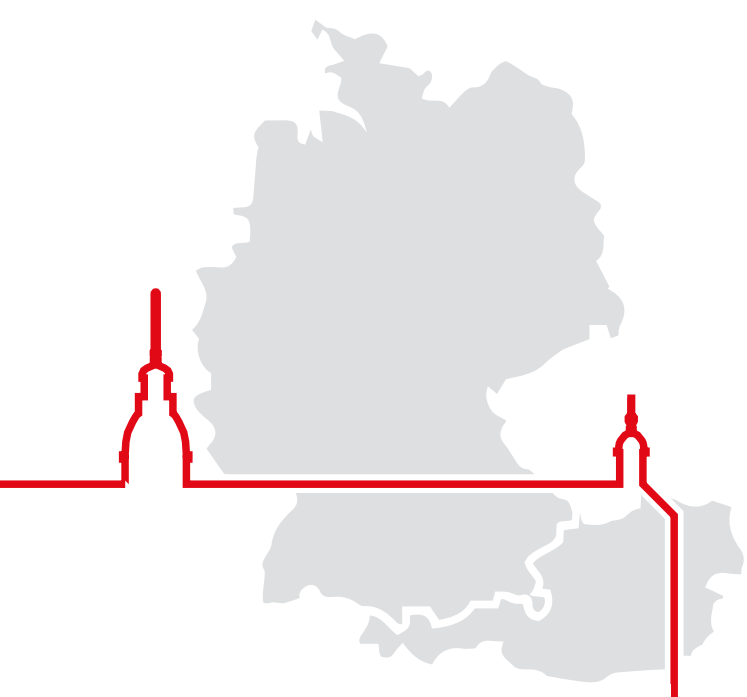




ibpsa

7. DEUTSCH-ÖSTERREICHISCHE
KONFERENZ

TAGUNGSBAND

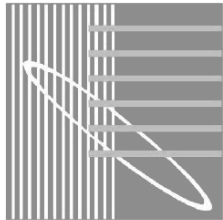


BauSIM 2018

26. SEPTEMBER

28. SEPTEMBER





ibpsa

BauSIM 2018

7. DEUTSCH-ÖSTERREICHISCHE
KONFERENZ

TAGUNGSBAND

BauSIM2018 - 7. Deutsch-Österreichische IBPSA-Konferenz
Tagungsband

www.bausim2018.kit.edu

Alle Rechte vorbehalten.
Karlsruhe, September 2018

Herausgeber



Karlsruher Institut für Technologie
www.kit.edu



Prof. Dr.-Ing. Petra von Both
Institut für Entwerfen und Bautechnik, FG Building Lifecycle Management (BLM)
Englerstraße 7 | 76131 Karlsruhe | blm.ieb.kit.edu



Prof. Andreas Wagner
Institut für Entwerfen und Bautechnik, FG Bauphysik und Technischer Ausbau (fbta)
Englerstraße 7 | 76131 Karlsruhe | fbta.ieb.kit.edu

Redaktion und Layout

Katharina Graf M.Sc, D.E.A.
Institut für Entwerfen und Bautechnik, FG Building Lifecycle Management

DOI [10.5445/IR/1000085743](https://doi.org/10.5445/IR/1000085743)

Die Arbeiten spiegeln die Ansichten sowie die Erkenntnisse des jeweiligen Autors wieder und müssen nicht mit den Ansichten der Herausgeber übereinstimmen.



BauSIM 2018

7. DEUTSCH-ÖSTERREICHISCHE
KONFERENZ

TAGUNGSBAND

26.-28. September 2018
Karlsruhe, Germany

KIT- Karlsruher Institut für Technologie
Fakultät für Architektur
Fachgebiet Building Lifecycle Management (BLM)
Fachgebiet Bauphysik und Technischer Ausbau (fbta)

www.bausim2018.kit.edu

P. von Both, A. Wagner (Hrsg.)

BAUSIM 2018

7. Deutsch-Österreichische IBPSA-Konferenz

Liebe FachkollegInnen, liebe IBPSA-Mitglieder, liebe BauSIM-Interessierte,

Die fortlaufende Evaluierung der Planung mittels Simulations- und Berechnungswerkzeugen stellt eine wichtige Voraussetzung dar, um Bauwerke und Systeme im Sinne der Nachhaltigkeit und Energieeffizienz – sowohl auf Bauwerks- wie auch auf urbaner Ebene – ganzheitlich zu optimieren. In diesem Kontext liefert auch die BauSIM 2018 wieder eine Vielzahl interessanter Beiträge, die von Aspekten der Modellierung über die Einbindung von Modellen in unterschiedliche Planungsplattformen bis hin zur Anwendung von Simulationsprogrammen im realen Planungsalltag reichen. Die Ausrichter der Konferenz, das Fachgebiet Building Lifecycle Management und das Fachgebiet Bauphysik & Technischer Ausbau des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), haben dabei mit Bezug zu ihrer eigenen Forschung zwei thematische Schwerpunkte für das Programm gesetzt.

Damit IT-gestützte Planungs- und Simulationswerkzeuge bereits planungsbegleitend eingesetzt werden können, um Auswirkungen von Planungsentscheidungen auf den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes bzw. Systems zu beurteilen, müssen sie wachsenden Anforderungen an die interdisziplinäre Vernetzung und die Integration von Daten und Businesslogik genügen. Aktuelle Ansätze des modellbasierten Arbeitens (BIM), Modell-Standards auf Gebäude- und Stadtebene, BIM-basierte Schnittstellen und Plattformen wie auch Ansätze zur Co-Simulation können wichtige Beiträge zu einer ganzheitlichen Systemoptimierung liefern. Mit dem Themenschwerpunkt „BIM-basierte Planungshilfsmittel und Integrationsansätze“ werden deshalb aktuelle Aktivitäten in Forschung, Planungspraxis und auch Standardisierung hierzu adressiert.

Gleichzeitig verändern sich aber auch die Anforderungen an die Simulationsprogramme. Die Energiewende mit stetig wachsendem Anteil an regenerativer, dezentral bereitgestellter Energie

führt zu komplexeren Gesamtsystemen mit fließenden Grenzen zwischen Gebäude und Quartier sowie gebäudeinternen und externen Energieversorgungsstrukturen. Hierauf muss von der Modellierungsseite ebenso reagiert werden wie auf die Tatsache, dass die Nutzer von Gebäuden mit ihren individuellen Komfortbedürfnissen erheblichen Einfluss auf den Energieverbrauch nehmen können. Mit dem Themenschwerpunkt „Modellierung des Nutzerverhaltens in Gebäuden“ wird der Fokus auf neue Erkenntnisse und Modellentwicklungen zum Komfort in Innenräumen und zu Interaktionen zwischen Mensch und Gebäude gelenkt.

Diese beiden Schwerpunkte werden durch die Keynotes von Prof. Christoph van Treeck (RWTH Aachen) und Prof. Ardeshir Mahdavi (TU Wien) eingeleitet, die ebenso in diesem Tagungsband zu finden sind wie die weiteren Beiträge aller Vortragenden und Poster-Aussteller.

Die Beiträge gliedern sich analog zu den Themenfeldern der Konferenzvorträge in die unterschiedlichen Kapitel:

- BIM-basierte Planungshilfsmittel und Integrationsansätze (*Kap. I, S.19*)
- Gebäudemonitoring und Betriebsoptimierung (*Kap. II, S. 115*)
- Numerische Lösungsverfahren, Optimierung und Implementierung (*Kap. III, S.156*)
- Modellierung des Nutzerverhaltens in Gebäuden (*Kap. IV, S.186*)
- Integrierte Gebäude- und Energiekonzepte (*Kap. V, S. 268*)
- Modellierung und Simulation im Lebenszyklus von Gebäuden und urbanen Systemen (*Kap. VI, S. 398*)
- Ausbildung und Wissenstransfer, Praxisbeispiele (*Kap. VII, S. 524*)
- Validierungsszenarien, Qualitätssicherung (*Kap. VIII, S. 551*)
- Produktdaten, Datenbanken (*Kap. IX, S. 578*)

Wir bedanken uns auf diesem Wege ganz herzlich bei den Autoren für Ihre Beiträge zum wissen-

schaftlichen Diskurs der Konferenz sowie dem wissenschaftlichen Komitee für die fachkundige Begutachtung der Einreichungen. Auch den Sponsoren der Konferenz möchten wir ganz herzlich für ihre Unterstützung danken!

Besonders gefreut hat uns, dass die Konferenz durch Grußworte von Frau Ulbrich aus der Energieforschungsförderung des BMWi sowie von Herrn Wölfle, Geschäftsführer von buildingSMART e.V., begleitet wurde. Herrn Prof. Kraft,

dem Vizepräsidenten für Forschung am KIT, sei Dank für seine Begrüßung der Teilnehmer am Tagungsort.

Wir hoffen, dass die Konferenzbeiträge Ihnen neue Einblicke und Erkenntnisse in das dynamische Feld der Bausimulation geben.

Petra von Both & Andreas Wagner
Karlsruhe 2018



Tian Building Engineering
D- 14193 Berlin
www.building-engineering.de



ifes GmbH
D-50829 Köln
www.ifes-koeln.de



KERN ingenieurkonzepte
D- 10965 Berlin
www.bauphysik-software.de



EQUA Solutions AG
CH- 6300 Zug
www.equa.se

10 INHALT

VORWORT	7
SPONSOREN	9
INHALT	10
WISSENSCHAFTLICHES KOMITEE	17
KEYNOTES	18
I. BIM-BASIERTE PLANUNGSHILFSMITTEL UND INTEGRATIONSANSÄTZE	19
P. Alfonso, T. Rist, G. Benndorf and N. Réhault BIM-BASED FAULT DETECTION AND DIAGNOSTICS METHODS APPLIED TO AN EXISTING BUILDING	20
A. Andriamamonjy, D. Saelens and R. Klein OPEN-STANDARD BUILDING INFORMATION MODELLING (BIM) TO LINK SIMULATIONS WITH THE DESIGN AND OPERATION OF BUILDING AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS (BACS)	28
T. Bittner, C. Eller, M. Dombois und U. Rüppel BIM-UNTERSTÜTZTE ERSTELLUNG INTERAKTIVER, IMMERSIVER VR- SZENARIEN AM BEISPIEL DER BRANDBEKÄMPFUNG	36
J. Eisenlohr, C. Eller, U. Rüppel, C. Leifgen, M. Boudhaim, C. Maurer, W. Sprenger and T. E. Kuhn FLEXIBLE FILTERING OF HETEROGENEOUS DATA USING THE EXAMPLE OF THE DESIGN AND SIMULATION OF BUILDING INTEGRATED PHOTO- VOLTAICS	44
A. Geiger, S. Hempel, J. Benner und K.-H. Häfele BUILDING INFORMATION MODELLING IN DER KONZEPTIONSPHASE DER PLANUNG	52
V. A. Kalayzhieva, U. Pont and A. Mahdavi GAMIFICATION AND BUILDING PERFORMANCE SIMULATION: FROM MODEL GENERATION TO NUMERIC THERMAL BRIDGE ANALYSIS	60
P. Mehrfeld, J. Steinbüchel, M. Lauster und D. Müller TEILAUTOMATISIERTE GENERIERUNG VON HYDRAULISCH ABGEGLICHENEN HEIZUNGSNETZEN FÜR HEIZKÖRPER UND FUSSBODENHEIZUNGEN IM BEREICH GEBÄUDEENERGETISCHER SIMULATIONEN MIT MODELICA	68
K. Rexroth, P. von Both, J. Gantner und Ch. Schmid EIN ANSATZ FÜR DIE TYPOLOGIEBASIERTE VERVOLLSTÄNDIGUNG VON GEBÄUDEINFORMATIONEN ZUR UNTERSTÜTZUNG DER FRÜHEN PLANUNGSPHASEN AM BEISPIEL LCA	76

H. Söbke, E. Tauscher und K. Smarsly METAMODELLIERUNG VON KLÄRANLAGEN	85
J. Taraben, A. Benz, G. Morgenthal und C. Völker ENTWICKLUNG EINER SCHNITTSTELLE ZWISCHEN BIM-MODELLEN UND THERMISCH-ENERGETISCHEN GEBÄUDESIMULATIONEN	93
C. van Treeck, J. Siwiecki, P. Schmidt und U. Zeppenfeldt DIGITALE PLANUNG BIM IN DER TGA: KONZEPT-BASIERTE METHODEN ALS STRUKTURGEBER FÜR DEN INTEGRALEN PLANUNGSPROZESS	99
D. Weiß, R. Hoch, A. Paepcke, J. Grunewald und S. Hirth ALGORITHMUS ZUR AUFBEREITUNG GENERISCHER QUARTIERE FÜR DIE THERMISCHE MEHRZONEN-SIMULATION MIT DEM SOLVER NANDRAD	107
II. GEBÄUDEDIMENSIONIERUNG UND BETRIEBSOPTIMIERUNG	115
Ch. Blatt GANZHEITLICHE ENERGIEEFFIZIENZ DURCH VERNETZUNG VON PRODUK- TION, THERMISCH AKTIVIERTER GEBÄUDEHÜLLE UND SPEICHER	116
S. Dietz, F. Werder und F. Sick MONITORING EINES INNOVATIV SANIERTEN ZEILENHOCCHAUSES – ERFAHRUNGEN AUS DEM ERSTEN BETRIEBSJAHR	124
J. Elfner, J. Zeisberger und F.J. Ziegler FELDTTEST INNOVATIVER LOWEX-TRINKWASSERERWÄRMUNG ZUR STEIGERUNG DER EFFIZIENZ VON GAS-BRENNWERTTECHNIK	132
H. Hafellner, M. Dragic und P. Kautsch INSTATIONÄRES, HYGROTHERMISCHES VERHALTEN VON SOCKELAN- SCHLÜSSEN	139
M. Husser, W. Haase und W. Sobek KONZEPTE ZUR REGELUNG EINER ADAPTIVEN VERGLASUNG	147
III. NUMERISCHE LÖSUNGSVERFAHREN, OPTIMIERUNG UND IMPLEMENTIERUNG	156
S. Aien, M. Taheri, M. Schuss and A. Mahdavi A COMPARISON OF MEASURED AND SIMULATED HYGRO-THERMAL PER- FORMANCE INDICATORS' VALUES: THE CASE OF A RETROFITTED WALL CONSTRUCTION	157
M. Kleinebrahm, J. Weinand, A. Ardone and R. McKenna OPTIMAL RENEWABLE ENERGY BASED SUPPLY SYSTEMS FOR SELF- SUFFICIENT RESIDENTIAL BUILDINGS	164

A. Paepcke, A. Nicolai und D. Weiß INTEGRATION VERLUSTBEHAFTETER VERBRAUCHER UND VERTEIL- NETWERKE IN DYNAMISCHE GEBÄUDEENERGIEMODELLE AM BEISPIEL VON NANDRAD	172
S. Pinich, M. Taheri, and A. Mahdavi SENSITIVITY ANALYSIS OF THE HYGRO-THERMAL SIMULATION MODEL OF A HISTORICAL BUILDING'S FACADE IN A HOT-HUMID CLIMATE	180
IV. MODELLIERUNG DES NUTZERVERHALTENS IN GEBÄUDEN	186
N. Carbonare, T. Pflug and A. Wagner CLUSTERING THE OCCUPANT BEHAVIOR IN RESIDENTIAL BUILDINGS: A METHOD COMPARISON	187
A. Ganji Kheybari, K. Boudier and S. Hoffmann USING A "MRT MANIKIN" TO ASSESS LOCAL AND OVERALL THERMAL SENSATION AND COMFORT	195
A. Mahdavi HUMAN AGENTS IN BUILDING MODELLING: BETWEEN DÉJÀ VU AND EPIPHANY	204
A. Mahdavi, M. Taheri and F. Tahmasebi DERIVATION AND REPRESENTATION OF THE ENERGETICALLY RELEVANT CONSEQUENCES OF OCCUPANTS' PRESENCE AND BEHAVIOUR IN BUILDINGS	216
M. Rida, N. Kelly and A. Cowie INTEGRATING A HUMAN THERMO-PHYSIOLOGY MODEL WITH A BUILDING SIMUALTION TOOL FOR BETTER OCCUPANT REPRESENTATION	223
M. Schweiker and A. Wagner INTERACTIONS BETWEEN THERMAL AND VISUAL (DIS-)COMFORT AND RELATED ADAPTIVE ACTIONS THROUGH CLUSTER ANALYSES	231
D. Siegele und F. Ochs EINSATZ VON ENTHALPIEÜBERTRAGERN IM MEHRGESCHOSSWOHNBAU IN KALTEN KLIMATEN	238
M. Taheri, F. Tahmasebi and A. Mahdavi STRUCTURED REPRESENTATION AND SHARING OF MONITORED OCCUPANCY-RELATED DATA FOR BUILDING PERFORMANCE SIMULATION APPLICATIONS	246
F. Tahmasebi and A. Mahdavi REVISITING THE IMPLICATIONS OF DIVERSITY REPRESENTATION IN WINDOW OPERATION MODELS FOR BUILDING SIMULATION	254

St. Veselá, B. RM Kingma, A. JH Frijns and W. D van Marken Lichtenbelt
 COMPARISON OF MEASURED AND SIMULATED FOOT SKIN BLOOD FLOW
 DURING LIGHT AND MEDIUM ACTIVITIES AND THE EFFECT ON FOOT SKIN
 TEMPERATURE PREDICTION 262

V. INTEGRIERTE GEBÄUDE- & ENERGIEKONZEPTE 268

M. Bachmann, S. Brandt, B. Saeb Gilani und M. Kriegel
 ERHÖHUNG DES ANTEILS ERNEUERBARER WÄRME VON BESTANDS-
 QUARTIEREN MITTELS MEHRLEITERWÄRMENETZEN 269

C. Caspari und M. Pahn
 WÄRMESPEICHERUNG IN DER GEBÄUDESTRUKTUR - UMSETZUNG
 EINES GROSSDEMONSTRATORS 278

A. Ganji Kheybari and S. Hoffmann
 EXPLORING THE POTENTIAL OF THE DYNAMIC FAÇADE: SIMULATING
 DAYLIGHT AND ENERGY PERFORMANCE OF COMPLEX FENESTRATION
 SYSTEMS 286

A. Geiger, J. Benner, K.-H. Häfele and V. Hagenmeyer
 THERMAL ENERGY SIMULATION OF BUILDINGS BASED ON THE CITYGML
 ENERGY APPLICATION DOMAIN EXTENSION 295

J. Haskell, M. Frechen und T. Sengewald
 FASSADENINTEGRIERTE PHOTOBIOREAKTOREN | STRÖMUNGS- UND
 SYSTEMSIMULATION 303

C. Nytsch-Geusen, W. Kaul und S. Kharraz
 DER DIGITALE ZWILLING IN DER ENERGETISCHEN GEBÄUDE- UND
 ANLAGENSIMULATION 311

A. Radermacher und A. Maas
 MODELLIERUNG EINER SOHLPLATTENKÜHLUNG MIT TRNSYS UND
 UNTERSUCHUNG DER EFFIZIENZ AM BEISPIEL EINES KLEINEN MEHR-
 FAMILIENHAUSES 319

V. Ritter
 REGELSTRATEGIE FÜR EINEN WÄRMEPUMPENBETRIEB EINER
 VERBUNDANLAGE MIT MITTELTIEFEN ERDWÄRMESONDEN 327

C. Schmidt, H. Altgeld, B. Groß, S. Maas und F. Scholzen
 MODELLIERUNG UND VALIDIERUNG VON SIMULATIONSANSÄTZEN FÜR
 DIE AUSSENLIEGENDE LUFTTEMPERIERUNG 336

D. Schmidt und S. Hoffmann
 DIMENSIONIERUNG VON WÄRMESPEICHERSYSTEMEN IN WOHNGBÄU-
 DEN ZUR NETZENTLASTUNG 344

W. Schmidt, H. Stopp, P. Strangfeld und E.Völker DIE OPTIMIRUNG VON WÄRMEÜBERTRAGERN FÜR GEWÄSSER ZUR WÄRME- UND KÄLTEVERSORGUNG VON WASSERNAHEN BAUTEN	352
F. Sick und S. Krutzsch SIMULATIONSGESTÜTZTE ANALYSEN ZUR STROMNETZDIENLICHEN TEMPERIERUNG VON GEBÄUDEN	358
C. Stetter und C. Frenzel SYSTEMOPTIMIERUNG MITTELS ANLAGENSIMULATION IN TRNLIZARD UNTER AUTOMATISCHER PARAMETERVARIATION	366
V. Weiler, P. Würstle, A. Schmitt, J. Stave, R. Braun, M. Zirak, V. Coors und U. Eicker METHODEN ZUR INTEGRATION VON SACHDATEN IN CITYGML DATEIEN ZUR VERBESSERUNG DER ENERGETISCHEN ANALYSE VON STADT- QUARTIEREN UND DEREN VISUALISIERUNG	374
M. Yasin, E. Scheidemantel, F. Klinker and H. Weigl SIMULATION, VALIDATION AND OPTIMIZATION OF PCM-CHILLED CEILINGS	383
M. Zwahlen, M. Frey, J. Loux und D. Akeret "BIM" ALS GRUNDLAGE FÜR GEBÄUDE- UND ANLAGENSIMULATIONEN - ZUSAMMENARBEIT AM DIGITALEN BAUWERKSMODELL	392
 VI. MODELLIERUNG UND SIMULATION IM LEBENSZYKLUS VON GEBÄUDEN	 398
M. Bachseitz und R. Koenigsdorff MODELLPRÄDIKTIVER, NETZDIENLICHER BETRIEB VON KÄLTEANLAGEN IN SUPERMÄRKTEN	399
I. Bratov, G. Schubert, A. Chokhachian, C. Bonnet, F. Petzold and T. Auer INTERACTIVE SOLAR POTENTIAL SIMULATION FOR EARLY STAGE URBAN PLANNING	407
J. Buderus, C. Betzold, S. Bordin, K. Kandasamy und A. Dentel GEGENÜBERSTELLUNG ZWEIER MODELLBASIERTER OPTIMIERUNGEN FÜR DEN WÄRMEPUMPENBETRIEB	415
S. Ebertshäuser, P. von Both, M. Wirtz, T. Brüggemann, S. Ochse, M. Lauster, A. Malhot- ra, J. Frisch, P. Remmen, D. Müller, C. van Treeck und S. Wallner UNTERSTÜTZUNG KOMMUNALPLANERISCHER PROZESSE MIT CITY- GML-BASIERTER ANBINDUNG MODELICA-GETRIEBENER QUARTIERS- SIMULATIONEN	423
M. Franz, W. Stephan und A. Schade BEURTEILUNG INNOVATIVER FASSADENLADENKONZEPTE - ERWEI- TERUNG DER VDI 6007-2	431

Y. Fürst, L. Keilmann, S. Brandt und M. Kriegel KOMPLEXES PHYSIKALISCHES GEBÄUDEMODELL AUF BASIS DER MODELICA „BUILDINGS“ BIBLIOTHEK FÜR GEBÄUDE-ENERGIE- SIMULATIONEN	439
J. Gärtner, F. Massa Gray and T. Auer FLEXIBLE OFFICE BUILDINGS - THE EFFECT OF SPACE LAYOUT DESIGN AND ZONING STRATEGIES ON THERMAL COMFORT AND ENERGY DEMAND	447
R. Gnerlich, A. Tiesler und V. Franz EINFLUSS OBJEKT-VERTEILTER ZEITAUFWANDSWERTE AUF DIE AN- SPRUCHSBEWERTUNG GESTÖRTER BAUABLÄUFE	455
M. Lauster and D. Müller METHODS OF TIME SERIES ANALYSIS FOR SIMULATION-BASED URBAN SCALE EVALUATIONS	463
K. Mainzer, R. McKenna und W. Fichtner ÜBERTRAGBARE METHODEN ZUR BESTIMMUNG UND RÄUMLICHEN VER- ORTUNG DES WÄRMEBEDARFS VON WOHNGBÄUDEN IN STÄDTEN	471
C. Nytsch-Geusen, D. Kreulitsch und W. Kaul GIS-BASIERTE ENERGETISCHE MODELLIERUNG UND SIMULATION VON STADTQUARTIEREN AUS DEM BESTAND AUF BASIS VON MODELICA	478
F. Ochs, G. Dermentzis und T. Calabrese EVALUATION VON EFFIZIENZ- UND ERNEURBAREENERGIEN MASSNAHMEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DES ZUKÜNFTIGEN ENERGIEMIXES	486
H. Shirdel, F. Tahmasebi and A. Mahdavi CONVERGENCE TOWARD OPTIMAL BUILDING DESIGNS VIA MULTIPLE ITERATIVE LOCAL OPTIMIZATIONS APPLIED TO ATTRIBUTE CLUSTERS OF DESIGN VARIANTS	492
N. Sterl, A. Mahdavi and M. Schuß SYSTEM MAPPING AND GENERATIVE HIERARCHICAL ZONE CONTROL STRUCTURE FOR A SCALABLE BUILDING CONTROL LOGIC	500
A. Van de Ven, R. Koenigsdorff und S. Hofmann ENTWICKLUNG KONSISTENTER AUSLEGUNGSMODELLE FÜR OBER- FLÄCHENNAHE GEOTHERMISCHE QUELLENSYSTEME	508
S. Weck-Ponten, R. Becker, S. Herle, J. Blankenbach, J. Frisch und C. v. Treock AUTOMATISIERTE DATENAGGREGATION ZUR EINBINDUNG EINER DYNAMISCHEN GEBÄUDESIMULATION IN EIN GEOINFORMATIONSS- SYSTEM	516

VII. AUSBILDUNG UND WISSENSTRANSFER, PRAXISBEISPIELE	524
F. Hansel, A. Malakhova, H. Stopp und P. Strangfeld DAS RAUMKLIMA GENUTZTER PANTONS VON SCHWIMMENDEN HÄUSERN	525
L. Kirnats, J-N. Joost, S. Berg, J. Frisch und C. van Treeck DIGITALE WERKZEUGE UND SOFTWAREBASIERTE LÖSUNGS ANSÄTZE: EINBLICK IN DIE ENTWICKLUNGEN UND ANWENDUNGEN DER FORSCHUNGSINITIATIVE ENERGIEWENDEBAUEN	533
U. Pont, M. Schuss, P. Schober and A. Mahdavi CONCEPTION AND ASSESSMENT OF TECHNICAL SOLUTIONS FOR THE APPLICATION OF VACUUM GLAZING IN CONTEMPORARY WINDOW CONSTRUCTIONS	543
VIII. VALIDIERUNGSSZENARIEN, QUALITÄTS- SICHERUNG	551
I. Doll, S. Ritterbusch, P. von Both und V. Koch FELDTTEST DER AUGMENTED REALITY LICHTMARKER-TECHNOLOGIE	552
A. E. Engedy, J. Lechleitner and A. Mahdavi COMPUTATIONAL PREDICTION OF SOUND PROPAGATION IN URBAN CANYONS	560
C. Vering, T. Storek, M. Engelpracht, M. Lauster und D. Müller TRANSIENTE MODELLIERUNG EINES VERDICHTERS ZUM VERGLEICH VON NIEDRIG-GWP KÄLTEMITTELN FÜR KOMPRESSIONS- WÄRMEPUMPEN	569
IX. PRODUKTDATEN, DATENBANKEN	578
A. Geiger und V. Hagenmeyer PRÜFUNG VON OPENBIM GEBÄUDEMODELLEN FÜR DIE THERMISCHE GEBÄUDESIMULATION	579
AUTORENVERZEICHNIS	588

A

Auer, Thomas TU München

B

Bauer, Martin HS Augsburg
Bedner, Thomas TU Wien
Beetz, Jakob RWTH Aachen
Both, Petra von KIT Karlsruhe
Breunig, Martin KIT Karlsruhe

F

Felsmann, Clemens TU Dresden

G

Gantner, Johannes Fraunhofer IBP
Grunewald, John TU Dresden
Grün, Gunnar Fraunhofer IBP

H

Herkel, Sebastian Fraunhofer ISE
Häfele, Karl-Heinz KIT Karlsruhe
Höfker, Gerrit HS Bochum

K

Knissel, Jens Universität Kassel
Koch, Andreas EIFER
Kriegel, Martin TU Berlin
König, Reinhard Bauhaus Uni Weimar
Königsdorff, Roland Hochschule Biberach

L

Leimer, Hans-Peter HAWK Hildesheim

M

Maas, Anton Uni Kassel
Madjidi, Madjid HS München
Mahdavi, Ardeshir TU Wien
McKenna, Russell KIT Karlsruhe
Müller, Dirk RWTH Aachen

N

Nytsch-Geusen, Christoph UDK Berlin

P

Petzold, Frank TU München

S

Schlüter, Arno ETH Zürich
Schmidt, Dietrich Fraunhofer IWES
Schweigler, Christian HS München
Sick, Friedrich HTW Berlin
Smarsly, Kay Bauhaus Uni Weimar
Stephan, Wolfram TH Nürnberg

T

Treack, Christoph van RWTH Aachen

V

Voss, Karsten Uni Wuppertal
Völker, Conrad Bauhaus Uni Weimar

W

Wagner, Andreas KIT Karlsruhe
Weismann, Stephan ZAE Bayern

HUMAN AGENTS IN BUILDING MODELLING: BETWEEN DÉJÀ VU AND EPIPHANY

Prof. Ardeshir Mahdavi

Explanatory models of people's perception and behaviour provide the basis for a rational approach to the definition of desirable indoor environmental conditions in buildings. But we do not possess definitive instances of such models. Moreover, they come in different degrees of detail and sophistication. Nevertheless, a cursory look at related theoretical work reveals a recurrent pattern. This suggests that, despite their multifariousness, models of environmental perception and evaluation may share some essential features. To pursue this possibility via consideration of a few instances of such models is not only of interest from the historical point of view. Rather, it could also facilitate an intuitive understanding of the nature of indoor- environmentally relevant human requirements relevant to the indoor environment.

ZUR PERSON

Professor Ardeshir Mahdavi is the Director of the Department of Building Physics and Building Ecology as well as the Head of the Institute of Architectural Sciences at TU Wien, Austria. Professor Mahdavi has conducted internationally acclaimed research in the fields of Building Physics, Building Performance Simulation, Building Controls, Building Ecology, and Human Ecology. Professor Mahdavi has authored over 700 scientific publications and supervised 70 doctoral students. He is a fellow of IBPSA (International Building Performance Simulation Association) and the recipient of the IBPSA Distinguished Achievements Awards.

KONTAKT

bpi@tuwien.ac.at, www.bpi.tuwien.ac.at
Tel.: +43 (0)1 58801 270 03,

FULL PAPER ZUR KEYNOTE: S.204.

DIGITALE WERKZEUGE UND SOFTWAREBASIERTE LÖSUNGSANSÄTZE: EINBLICK IN DIE ENTWICKLUNGEN UND ANWENDUNGEN DER FORSCHUNGSINITIATIVE ENERGIEWENDEBAUEN

Prof. Christoph van Treeck

Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitforschung zu Forschungsvorhaben, die seitens des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Bereich „Energie in Gebäuden und Quartieren“ zur korrespondierenden Forschungsinitiative ENERGIEWENDEBAUEN gefördert werden, sind mehr als 900 Projekte hinsichtlich ausgewählter Themen ausgewertet worden. Bei der wissenschaftlichen Querschnittsforschung handelt sich um eine Methodik zur Analyse von Forschungsvorhaben auf der übergeordneten Ebene. Das resultierende Ergebnis liefert einen verbesserten Einblick in das nationale Forschungsgeschehen. Den Schwerpunkt der hier betrachteten Tiefenbohrung bilden digitale Werkzeuge und softwarebasierte Lösungsansätze im Kontext Energie in Gebäuden und Quartieren. Neben einer eindeutigen terminologischen Abgrenzung werden die querschnittsübergreifende Relevanz von Tool- und Softwareentwicklungen im Rahmen von Forschungsprojekten, eine Typologie von softwarebasierten Lösungsansätzen, eine Tendenz zur Multi-Skalen Modellierung, die programmiertechnische Umsetzung, Lizenzierungsmodelle und das digitale Ökosystem der

Anwendung im Rahmen dieser Querschnittsanalyse betrachtet.

ZUR PERSON

Christoph Alban van Treeck (Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil.) is full professor for energy efficiency and sustainable building at RWTH Aachen University. Before he joined RWTH in 2012, he was head of the Simulation Group of the Department Indoor Environment at the Fraunhofer Institute for Building Physics in Germany and Associate Professor (Privatdozent) at the Technische Universität München. He has a Ph.D. in computational civil engineering, and is specialized in the fields of computational fluid mechanics, thermal comfort related issues, building performance simulation, and building information modelling. He is director at large within the board of directors of the International Building Performance Simulation Association (IBPSA), the author of more than 100 peer-reviewed scientific publications and is on the editorial board of the Journal of Building Performance Simulation.

KONTAKT

treeck@e3d.rwth-aachen.de, Tel.: +49 241 80 25031
www.e3d.rwth-aachen.de/cms/E3D/~iy/g/Der-Lehrstuhl

FULL PAPER ZUR KEYNOTE: S. 533.

I. BIM-BASIERTE PLANUNGSHILFSMITTEL UND INTEGRATIONSANSÄTZE

BIM-BASED FAULT DETECTION AND DIAGNOSTICS METHODS APPLIED TO AN EXISTING BUILDING

P. Alfonso¹, T. Rist¹, G. Benndorf¹ and N. Réhault¹

¹Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany

ABSTRACT

Despite using building automation systems (BAS), buildings often present significant operational deficits, affecting the user comfort and the energy performance. Automated fault detection and diagnostic (FDD) methods can help identifying them by using measurement data from BAS together with technical information of the monitored building services. Ideally, this information should be extracted from a detailed virtual building model (BIM), which maps constructive, functional and technical data on geometric and semantic level. In this article, we describe methods and tools that integrate FDD with BIM models and that have been applied to support the management of a German building.

INTRODUCTION

Building automation and building management systems (BAS/BMS), which control and supervise a vast range of building services like heating, ventilation and air conditioning (HVAC) systems, are largely present today in commercial buildings. A correctly planned, commissioned, managed and maintained BAS has the potential to control building services in a way enabling an optimized energy operation, reducing pollutant emissions and providing best comfort conditions for the building occupants. Nevertheless, in many cases, buildings

controlled by BAS consume more energy as they should. This phenomenon also named the “performance gap” is partly due to suboptimal planned or implemented control strategies and programmable logic controllers (PLC) configurations, faulty sensors and actuators, insufficient maintenance and inappropriate user behaviour (Katipamula 2005; Bruton et al. 2014; Wilde 2014). Furthermore, faults remain often undetected over extensive periods, mainly because most of the legacy BAS does not offer functionalities, which enable automated time-series data analyses and fault detection. The undetection leads to energy waste, financial losses and a lowered acceptance by building users and managers.

Over the past thirty years, researchers have shown that the energy consumption of buildings could be significantly reduced, in a range of 5% to 30% through the use of FDD methods and appropriate ongoing commissioning strategies (Katipamula 2005; Brambley und Katipamula 2005). They have developed several FDD methods, which use models that vary in their structure and information requirements. (Venkatasubramanian et al. 2003; Isermann 2006).

Time-series data, coming from a BAS or other sources, is the basic information for FDD methods to work. Additionally, to be properly set-up and to provide detailed diagnosis messages, FDD methods require semantic

information like unambiguous and structured data point names, metadata informing the physical units, data processing principles as well as information on the location and technical features of the different building services.

Unfortunately, the information in existing buildings is in most cases incomplete, scattered and inconsistently structured in different documents (drawings, design documents, component lists, etc.) and on various media (paper, different file formats or directly in the BAS). This situation hinders the comprehension of buildings and the semantic interoperability among applications (Balaji et al. 2016). Analysts have to invest high efforts to collect, understand and structure the information in a convenient way to be able to apply third party applications like FDD. This can considerably limit the potential and economic viability of these methods.

Building Information Models (BIM) can provide structured information captured digitally over the whole life cycle process of buildings to applications (e.g. FDD), used in the post-occupancy phase. Thus, significant advantages for the use of BIM in facility management (FM) e.g. for space, warranty or energy management in existing buildings have already been identified (Volk et al. 2014; Lu et al. 2017). Nevertheless, in Western Europe and especially in Germany, the majority of existing buildings has not been designed with BIM and therefore cannot provide a digital model. Advanced methods like FDD need a high level of definition (LOD500, which refers to a level of refinement where there is non-geometric information additionally to the size, shape, location, quantity and orientation) to ease their implementation and enable detailed diagnostics. To fulfil specific requirements, FM can use the Construction Operations Building Information Exchange (COBie) standard to extend the available information in the BIM by capturing and digitizing design and construction information.

In the German funded project RngOpt, we developed a method and a tool chain enabling

the extension of information of an IFC file and the use of this information to parametrize a combination of FDD methods. Thus, the diagnostics of the FDD system could be enriched with contextual information from the BIM with the objective to support maintenance tasks.

In this article, we first provide an overview of the state of the art. Then we describe the demonstration building and the selected subsystem for the application. Afterwards we focus on the development and the semi-automated populating of the BIM model. The applied FDD methods are introduced and finally we provide initial results and a conclusion.

STATE OF THE ART

Kallab et al. highlight three main problems when applying FDD: the shortage and deficient data from the installed systems; the lack of interoperability limiting the information exchange between BAS and third party applications and the necessity to adapt the method when the systems are modified (Kallab et al. 2017). Katipamula points out the possibility of sensitivity loss due to the lack of measurement and meta data available (Katipamula 2005). Moreover, the complexity of systems in modern buildings tends to increase and consequently their amount of information too. On account of these facts, a higher interoperability regarding interfaces between systems and semantics is needed (Bruton et al. 2014; Balaji et al. 2016). BIM may bring a solution to this, as it acts like a unified data depot that allows real time information management and exchange throughout the building life cycle (van Treeck et al. 2016).

Several researches have been carried out over the past ten years with the objective to exploit the information available in BIM for third-party applications. Many authors addressed the digital description of functionalities and control strategies of BAS in BIM. Liu et al. identified the information required in control algorithms for HVAC systems, which is stored in different

sources and developed the extended Information Delivery Manual (IDM) ontology (Liu et al. 2013). Hu et al. present a hybrid architecture using semantic web technologies, which links different data formats to perform a rule based control of the buildings systems (Hu et al. 2016). Benndorf et al. describe a method and a tool chain to extend IFC files with control functions descriptions of HVAC systems (Benndorf et al. 2017).

Also the use of BIM-based information in interaction with FDD and energy management has been treated in different approaches. Provan et al. use information from BIM and BAS to produce the rules and to update automatically the thresholds of a rule-based FDD system (Provan et al. 2009). A similar approach using the Web Ontology Language (OWL) and simulation models was developed by Delgoshaei et al. with the *semantic model-based framework* for inference-based rules for FDD. When a fault is detected, their algorithm uses semantic data from BIM to generate a hypothesis for the possible faults. Lawrence et al. (Lawrence et al. 2012) introduce a new information tool concept, the *Facilities Management and Modelling (FMM)*, which supports FM tasks by coupling the functionalities of a BIM and a BAS. Stenzel et al. use a BIM approach to automatically generate a building energy simulation model used in an energy management system from an IFC file (Stenzel et al. 2013). Motamedi et al. present a tool that gives a BIM-based visual interface for detecting possible fault's causes through a decision tree method, called "*Facility Management Visual Analytics System*" (FMVAS) (Motamedi et al. 2014). Ghaffarian Hoseini et al propose the idea of an integrated knowledge-based building management system consisting of a BIM, a simulation model, an FDD tool and a case-based reasoning mechanism. (Ghaffarian Hoseini et al. 2017).

The described approaches have been mainly carried out in labs or for small models. Fewer projects have investigated the digitalization of information in a BIM for large existing facilities

and the use of BIM and FDD by FM actors. One objective of this work is to contribute filling this gap by developing a tool chain which enables the enrichment of an IFC file from extended COBie datasheets and uses this information to parametrize FDD methods and enhance their diagnostics.

DEMONSTRATION

The demonstration takes place in an office and labs building with an area of 8.700 m², situated in a large private research campus in Germany. A district network supplies the building with hot and chilled water. Large air handling units (AHUs) with heat recovery, heating and cooling coils and radiators condition the rooms. A BAS based on Building Automation and Control Networks (BACnet) provides measurement data with a 5 min resolution. The whole facility was commissioned in 2013 and has not been designed nor is managed on a BIM basis. The building managers provided design and construction information like plans, component lists and technical data in several digital formats. In this paper, we describe our approach by considering one of the AHUs of the building.

PROCESS AND TOOL-CHAIN

The developed process for the application of the FDD methods with information from the BIM consists of three main steps as depicted in *Figure 1* and described below.

BIM Design and Extension

To create the BIM from existing drawings and information, we modelled the structural, architectural, lighting and HVAC components in 3D with a common commercial software tool. As already stated, a high LOD requiring the modelling of components of the field level like valves and sensors was necessary for the application of our FDD methods. *Figure 2* shows the model of the considered AHU. For the unambiguous identification of HVAC components, we applied unique identifiers in the BIM software according to a schema presented in (Cascade Consortium 2012).

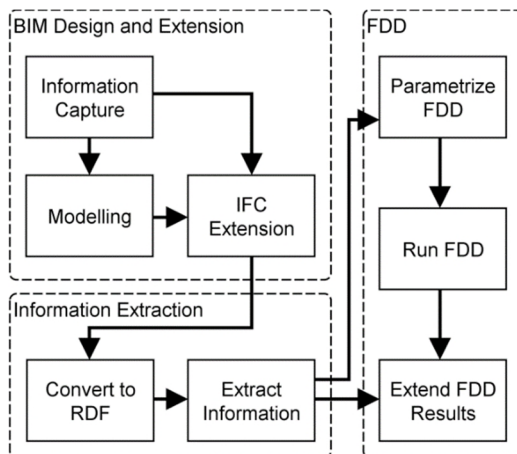


Figure 1: Process and information flow

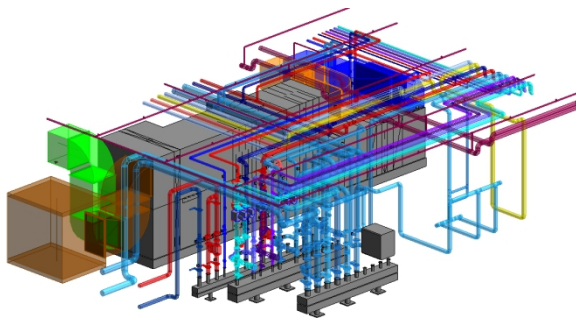


Figure 2: 3D view of the AHU as BIM

For the extension of the BIM with complementary information, we developed a semi-automated process using an exported IFC file and adapted COBie sheets. The objective is to save efforts compared to an approach where this information is added manually in the BIM software or over a specially programmed add-on. Therefore, we gathered additional information from existing documents, like device lists, in spreadsheet files adapted from the COBie templates (National Institute of Building Sciences 2018). The aforementioned unique identifiers were then used to assign this information to the corresponding devices. We favored an approach based on open source software and the IFC standard. In this procedure, we first exported the model to an IFC4 compliant file. Then, we imported and extended the file through the Python™ interface of the open source software library IfcOpenShell {Kijnen 2011}. The IFC standard defines

standardized *IfcPropertySets* that hold dynamically extensible properties of an object. It allows creating user-defined property sets beside the predefined ones. We used this mechanism to populate the IFC file by developing a mapping routine that assigns values to predefined property sets of the IFC standard if they exist and creates customized property sets otherwise (e.g. the NominalPowerRate of the property set Pset_FanTypeCommon was set for a given IfcFan instance).

Information Extraction

We then converted the IFC file to an ifcOWL (Pieter Pauwels 2016b) compliant Resource Description Framework (RDF) file with the open source tool IFCtoRDF (Pieter Pauwels 2016a). The conversion allows an easy extension of the IFC compatible data with entities from other ontologies, like e.g. the Semantic Sensor Network Ontology. Furthermore, the user can program complex and reusable queries on the data through the semantic web Protocol and RDF Query Language (SPARQL). For example, the following query fetches an IfcFan instance by its unique identifier and gets its nominal power rate:

```
SELECT ?prop WHERE
{
  ?dev (^ifc:relatedObjects_IfcRelDefinesByProperties/
ifc:relatingPropertyDefinition_IfcRelDefinesByPropertie
s/
ifc:hasProperties_IfcPropertySet/
ifc:nominalValue_IfcPropertySingleValue/
express:hasString) <unique_id>.

  ?dev (^ifc:relatedObjects_IfcRelDefinesByProperties/
ifc:relatingPropertyDefinition_IfcRelDefinesByPropertie
s)
    ?ps.
  ?ps ifc:name_IfcRoot/express:hasString
"Pset_FanTypeCommon";
    ifc:hasProperties_IfcPropertySet ?prop.
  ?prop ifc:name_IfcProperty/express:hasString
"NominalPowerRate"
}
```

Similar queries are used to find the corresponding air handling unit and related sensors.

We then use the data extracted from the BIM for two applications: configuration of the FDD routines and enrichment of the FDD results. The configuration of the FDD system is realized by collecting details on the existing devices as well as on the supplied zones. For instance, this includes nominal power consumption, temperature set points or planned operation schedules of the building services. Additional information, like location and technical data of the devices enrich the FDD results by adding contextual information to the result data of a detected fault.

Fault Detection and Diagnostics Methods

We used two different FDD methods in this project: a rule-based system and a density-based clustering algorithm with a feed-back mechanism.

Rule-based FDD systems belong to the state of the art and have been already deeply studied and applied (Katipamula 2005; Schein et al. 2006). They are constituted of a set of predefined IF-THEN rules defining the conditions for the normal operation of building services like chillers or AHUs. If the incoming measurement data does not hold the conditions of a rule, a fault message is raised with possible diagnostics. Rule-based systems need expert knowledge, such as information about the system's layout, functions and thresholds to define adequate rules. Main advantages of these systems are their easy implementation, transparency and diagnostic capability. Typical issues are the transferability to other buildings services configurations and high parameterization efforts. A combination with other methods can remedy these limitations. More specifically, they can be used to pre-process data for supervised machine learning methods by removing or labelling measurements corresponding to a faulty operation. Here, we pre-processed the data with a rule-based system before applying a density-based clustering algorithm (DBSCAN) for fault detection. In the training phase of this method, a set of fault-free samples is distributed into

clusters. Each cluster contains "similar" samples – e.g. corresponding to the same operation mode – from this set. Then, in the application phase, new samples are assigned to the previously defined clusters if they are "similar" to the samples already belonging to that cluster. Those samples are then classified as fault-free. If a new sample does not fit into any of the existing clusters, the density-based clustering algorithm identifies it as noise and thus classifies it as faulty. The responsibilities of the individual sensors for a detected fault are estimated in a separate step called fault identification. For a more detailed description of the developed algorithm see (Benndorf und Réhault 2016).

As this method uses fault-free data for initial training, any deviation from the training condition is detected as a fault. This allows, on the one hand, the detection of novel (unknown) faults. On the other hand, this type of method typically generates a relatively high number of false positives. This can be corrected by employing user feedback. More precisely, whenever a fault is detected and reported, the user, e.g. the facility manager, can evaluate whether the detected fault is true positive or false positive. In the first case, the FDD system provides the user with detailed diagnostics containing complementary information from the BIM. In the latter case, the false positive samples are integrated in the training data set and the FDD method is retrained. This procedure enables a user-centered adaptation of the algorithm.

Procedure

We applied a set of 17 rules from the rule-based system to the AHU in a period between October and April. We used the information available in the IFC file from the BIM to parametrize the rules. Using the unique identifier described previously, we extracted the data point names belonging to the AHU and triggered the rules consuming the respective data points. We also fetched rule-specific thresholds from the BIM to parametrize the FDD system. The corresponding values are located in the property

set of the respective entity. For example, the entity “IfcSensor” allows the instantiation of a data point. “Pset_SensorTypeTemperatureSensor” and is used to refer particularly to the properties of a temperature sensor. Inside the defined property, the set point temperature is found.

For further diagnostics, the algorithm provides information regarding the localization of the systems in the building extracted from the BIM by searching for related spaces in the IFC file. Moreover, the results also show normal parameters and data sheet information of the faulty component which is found in the “Property sets” parameters.

After the preprocessing with the rule-based system, which did not reveal the existence of faults in the AHU operation, we applied the method based on DBSCAN to the same data set. Therefore, we used measurement data from an AHU including 19 data points monitoring air and water temperatures as well as valve, pump and damper signals. The algorithm was trained on 2016 samples (2 weeks) and applied to 12115 samples (app. 18 weeks). In case of feedback, the whole application period was split into intervals containing 288 samples (3 days). After one application interval, the feedback was evaluated, the algorithm retrained, and afterwards applied to the next application interval.

RESULTS

We present the results from the application of the BIM-based FDD process in the following.

The clustering algorithm without feedback identified 1013 samples as faulty. In case of applying the clustering algorithm with feedback, only 40 false positive samples are detected. So, the false positive rate decreases from 8.4% to 0.3%. A comparison of the results can be seen in *Figure 3*.

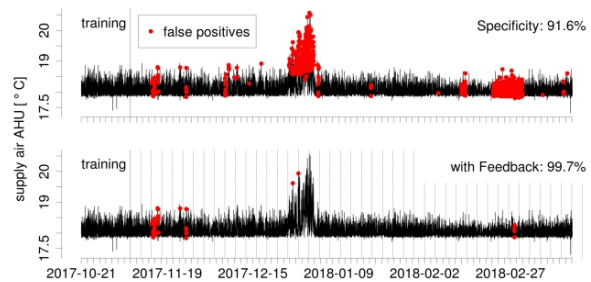


Figure 3: Comparison of the performance of the clustering algorithm without and with feedback.

The reason for many of the false positives is a slightly increased supply air temperature, which is interpreted as a fault. The fault identification procedure shows a significant responsibility of the supply air temperature sensor in the respective time range.

The results from the density-based clustering algorithm show a typical behavior of regression-type models or models from machine learning which are solely trained on fault-free data: slight deviation from the training conditions are classified as faults. This often leads to a large number of false positives and thus to limited usability in practice.

Here, we show how the application of such methods can nevertheless bring added value to the user (e.g. the facility manager). First, the method allows for determining the sensors with most responsibility for a detected fault. This information, together with additional information about the respective sensors (e.g. location, type) from the BIM, aids the user in deciding whether there is a true fault. In this case, means for remediation can be taken. Second, if the detected fault turns out to be false positive, based on the evaluation of the user, this information is used to increase the performance of the automated FDD routine and, in particular, gradually reduce the number of false positives. Thus, the FDD routine becomes highly reliable during its course of application and requires every time less user feedback.

CONCLUSION AND OUTLOOK

In this paper, we presented the development and test of a process and a tool chain enabling the digitalization of FM information in an IFC compatible file. This information is used to parametrize combined FDD methods and to enrich their diagnostics. We first created a BIM and exported it as an IFC file using a typical commercial software tool for a large facility in Germany. We used the IFC file to obtain the parameters required for FDD. With a simple example, we showed that users can iteratively enhance the performance of supervised FDD methods by providing feedbacks on the detected faults. To populate the file with additional information from different sources, such as adapted COBie templates, we developed a semi-automated process, based on IFCOpenShell. Nevertheless, the digitalization process of the considered building remained a time consuming task that required expert skills and a standardized procedure. In the RngOpt project, additionally to the work presented here, further applications are developed on the basis of the created BIM model like a virtual reality app enabling FM operators visualizing all HVAC systems inside the building as well as a user complaint management app. However, the real benefit of applications using BIM information still need to be demonstrated, e.g. with the consideration of enhanced user comfort or of realized energy savings.

Acknowledgements

The research leading to these results has received funding from the German Ministry for Industry and Energy under grant agreement n° 03ET1373A.

REFERENCES

- Balaji, Bharathan; Bhattacharya, Arka; Fierro, Gabriel; Gao, Jingkun; Gluck, Joshua; Hong, Dezhi et al. (Hg.) (2016): Brick: Towards a Unified Metadata Schema For Buildings. The 3rd ACM International Conference. Palo Alto, CA, USA, November.
- Benndorf, G.; Réhault, N. (Hg.) (2016): Density-based clustering algorithm for fault detection and identification in HVAC systems. Central European Symposium on Buildings Physics (CESBP). Dresden.
- Benndorf, G.; Réhault, N.; Clairembault, M.; Rist, T. (2017): Describing HVAC controls in IFC – Method and application. In: *Energy Procedia* 122, S. 319–324. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.330.
- Brambley, Michael R.; Katipamula, Srinivas (2005): Beyond Commissioning. The Role of Automation.
- Bruton, Ken; Raftery, Paul; Kennedy, Barry; Keane, Marcus M.; O’Sullivan, D. T. J. (2014): Review of automated fault detection and diagnostic tools in air handling units. In: *Energy Efficiency* 7 (2), S. 335–351. DOI: 10.1007/s12053-013-9238-2.
- Cascade Consortium (2012): Deliverable D2.1 CASCADE Methodology for Energy Efficient Airports.
- Ghaffarian Hoseini, Ali; Zhang, Tongrui; Nwadigo, Okechukwu; GhaffarianHoseini, Amirhosein; Naismith, Nicola; Tookey, John; Raahemifar, Kaamran (2017): Application of nD BIM Integrated Knowledge-based Building Management System (BIM-IBMS) for inspecting post-construction energy efficiency. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 72, S. 935–949. DOI: 10.1016/j.rser.2016.12.061.
- Hu, Shushan; Corry, Edward; Curry, Edward; Turner, William J.N.; O’Donnell, James (2016): Building performance optimisation. A hybrid architecture for the integration of contextual information and time-series data. In: *Automation in Construction* 70, S. 51–61. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.05.018.
- Isermann, Rolf (2006): Fault-diagnosis systems: an introduction from fault detection to fault tolerance: Springer Science & Business Media.
- Kallab, Lara; Chbeir, Richard; Bourreau, Pierre; Brassier, Pascale; Mrissa, Michael (2017): HIT2GAP. Towards a better building energy management. In: *Energy Procedia* 122, S.

- 895–900. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.399.
- Katipamula, S. (2005): Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems- A Review, Part I. In: *International Journal of HVAC&R Research*.
- Lawrence, Thomas M.; Watson, Richard T.; Boudreau, Marie-C.; Johnsen, Kyle; Perry, Jason; Ding, Lan (2012): A new paradigm for the design and management of building systems. In: *Energy and Buildings* 51, S. 56–63. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.04.016.
- Liu, Xuesong; Akinci, Burcu; Bergés, Mario; Garrett, James H. (2013): Extending the information delivery manual approach to identify information requirements for performance analysis of HVAC systems. In: *Advanced Engineering Informatics* 27 (4), S. 496–505. DOI: 10.1016/j.aei.2013.05.003.
- Lu, Yujie; Wu, Zhilei; Chang, Ruidong; Li, Yongkui (2017): Building Information Modeling (BIM) for green buildings. A critical review and future directions. In: *Automation in Construction* 83, S. 134–148. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.08.024.
- Motamedi, Ali; Hammad, Amin; Asen, Yoosef (2014): Knowledge-assisted BIM-based visual analytics for failure root cause detection in facilities management. In: *Automation in Construction* 43, S. 73–83. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.03.012.
- National Institute of Building Sciences (2018): COBie Construction Templates. Online verfügbar unter http://www.nibs.org/?page=bsa_cobietemplate#templates, zuletzt geprüft am 26.03.18.
- Pieter Pauwels (2016a): IFCToRDF. Version v0.2. Online verfügbar unter <https://github.com/pipauwel/IFCToRDF>.
- Pieter Pauwels, Walter Terkaj (2016b): ifcOWL ontology (IFC4_ADD1). Unter Mitarbeit von Jakob Beetz, María Poveda Villalón, Seppo Törmä, Jyrki Oraskari, Nam Vu Hoang. Online verfügbar unter http://ifcowl.openbimstandards.org/IFC4_ADD1/index.html, zuletzt aktualisiert am 22.01.2016.
- Provan, Gregory; Boubekeur, M.; Ploennigs, J. (Hg.) (2009): Using BIM Data for Generating and Updating Diagnostic Models. Twelfth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing. Scotland.
- Schein, Jeffrey; Bushby, Steven T.; Castro, Natascha S.; House, John M. (2006): A rule-based fault detection method for air handling units. In: *Energy and Buildings* 38 (12), S. 1485–1492. DOI: 10.1016/j.enbuild.2006.04.014.
- Stenzel, P.; Haufe, J.; Jimenez-Redondo, N. (Hg.) (2013): Using a BIM flow for the design and the operation of Building Energy Management Systems. 1st International Conference "ICT for Sustainable Places". Nice, France, September 9-11.
- van Treeck, Christoph; Elixmann, Robert; Rudat, Klaus (2016): Gebäude. Technik. Digital. Building Information Modeling : BIM - Recht - Trinkwasser - Energiekonzepte - Brandschutz.
- Venkatasubramanian, Venkat; Rengaswamy, Raghunathan; Yin, Kewen; Kavuri, Surya N. (2003): A review of process fault detection and diagnosis, Part I, II and III. In: *Computers & Chemical Engineering* 27 (3), S. 293–311. DOI: 10.1016/S0098-1354(02)00160-6.
- Volk, Rebekka; Stengel, Julian; Schultmann, Frank (2014): Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs. In: *Automation in Construction* 38, S. 109–127. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.10.023.
- Wilde, Pieter de (2014): The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation. In: *Automation in Construction* 41, S. 40–49. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.02.009.

OPEN-STANDARD BUILDING INFORMATION MODELLING (BIM) TO LINK SIMULATIONS WITH THE DESIGN AND OPERATION OF BUILDING AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS (BACS)

A. Andriamamonjy^{1,2}, D. Saelens^{1,3} and R. Klein²

¹ KU Leuven, Department of Civil Engineering, Building Physics Section, Kasteelpark Arenberg 40 – box 2447, Heverlee BE-3001, Belgium

² KU Leuven, Sustainable Buildings Research Group, Technology Cluster Construction, Technology Campus Ghent, Gebroeders De Smetstraat 1, Ghent BE-9000, Belgium

³ EnergyVille, Thor Park 8310, Genk BE-3600, Belgium

ABSTRACT

The recent European standard EN 15232-1:2017 provides calculation methods to quantify the impact of Building Automation and Control Systems (BACS) on the energy performance of buildings.

This paper presents a BIM-based workflow and the developed tools, enabling the use of the detailed calculation method of EN 15232-1:2017 already during the detailed design phase. Relevant information is created in the BIM environment, automatically checked and then used to generate the dynamic simulation model in Modelica.

A university building with a demand controlled HVAC system and an open, modular BACS serves as case-study to validate the proposed workflow and the implemented tools.

INTRODUCTION

There are two complementary, on-going standardization efforts of the European Committee for Standardization (CEN) that will significantly improve the way energy-efficient buildings are designed, built, operated and maintained:

1. The CEN Technical committees “Energy Performance of Buildings project group” (CEN/TC 371) providing the framework and within this common framework CEN/TC 247 “Building Automation, Controls and Building Management” that elaborated the EN 15232-1:2017.
2. The CEN/TC 442 “Building Information Modelling (BIM)” providing solutions for an

integrated use of open, standard based BIM for the entire lifecycle of built assets.

This paper illustrates how the detailed calculation method of EN 15232-1:2017 can be embedded into a BIM-based workflow to obtain a more reliable estimation of the energy saving effect of advanced control functions already in the design stage of the project and to fully integrate the design of the BACS into the design of the building. A proof-of-concept implementation of necessary tools is presented and areas of ongoing standardization and implementation work are highlighted, where additional steps are needed to further optimize the workflow.

Recently, the use of BIM as an information source for BEPS has gained momentum. Three types of solutions can be distinguished:

1. Integration of a simulation engine into the BIM tool or direct coupling using the Application Programming Interface (API) of such software.
2. Export of the relevant information from the BIM tool to a file using the gbXML format and subsequent import of that file into the simulation software.
3. Export of the relevant information contained in the proprietary format Building Information model (BI-m) to the Industry Foundation Classes (IFC) format and subsequent import of that information into the simulation software.

Developed and maintained by BuildingSMART, IFC was officially defined in ISO 16739 and adopted by CEN as EN ISO 16739. Moreover, the BuildingSMART openBIM approach comprises two other

important aspects defined in ISO standards: mapping of terms in the form of IFD (International framework for dictionaries, ISO 12006) and IDM (Information Delivery Manual, EN ISO 29481), a formal process description for the implementation of an openBIM workflow in organizations, for projects and as reference for software certification, based on project maps (PMs) and Model View Definitions (MVDs).

A more detailed description, references and a comparison of different published approaches can be found in Andriamamonjy et al. (2018). The workflow and tools described in that paper fall into the third category and have now been extended to accommodate the information needed for the detailed calculation method of EN 15232.

WORKFLOW AND APPROACH

Calculating the impact of a BACS on energy performance

The EN15232-1:2017 “Energy performance of buildings - Impact of Building Automation, Control and Building Management” presents an approach that categorises the impact of a Building Automation and Control System (BACS) on the energy performance. It defines four efficiency classes (A to D) for BACS with decreasing performance, i.e. class A is the most energy efficient, class D the least effective and class C is set as reference for the calculation of the savings obtained with a class A or B system. Class D shall no longer be used for new buildings and (deep) renovations.

EN15232 defines a set of control functions with various complexities based on which a specific BACS is categorised into class A, B, C or D. Class D includes the simplest strategy, mostly non-automated, while class A requires more advanced, automated control functions and communication between room or zone controllers and the building controller.

As an example, table 1 presents a control function (VENT_RMFLOW_CTRL) that is applied to control the supply air flow at the room level. This control function has three different levels of complexity (0 to 2). The level 0 does not include any form of automated control of the air flow and shall be used only in existing class D BACS. On the other hand, for a class A a function according

level 2 is required. This means automated modulation of the air flow rate based on occupant sensing systems (e.g. CO₂ sensor, occupancy detection system) has to be implemented. The example of this control function (table 1) will be used to illustrate the integration of EN15232 requirements into the proposed BIM-based workflow in the remainder of this paper.

Table 1: Supply air flow control function as defined in EN15232-1: 2017

VENT_RMFLOW_CTRL	
0	No automatic control: The system runs constantly (e.g. manual controlled switch)
1	Time control: The system runs according to a given time schedule
2	Occupancy detection: The system runs dependent on the occupancy (light switch, infrared sensors, CO ₂ , etc.)

Context and preconditions

It is assumed that BIM is used during all stages of the construction project. The approach developed here integrates the EN15232 standard specifications into an earlier developed BIM to BEPS (Building Energy Performance Simulation) workflow to enable a systematic, detailed assessment of the impact of the BACS on the energy performance of the building already during the detailed design phase. More specifically, the BIM to BEPS workflow referred to as BII (BIM-IFC-lfc2Modelica) developed by Andriamamonjy et al. (2018) is extended to include the different control functions defined in EN15232 (e.g. in table 1). BII is a set of tools - implemented using Python - that can translate the information contained in an open-BIM format Industry Foundation Class (IFC4) file into a Modelica-based energy simulation model that includes the building envelope, building systems and the controls (see Fig.1).

In this context, IFC4 is used as the exchange format between the different stakeholders. It is a flexible, object-oriented data model in which (BIM) objects, referred to as entities (e.g. lfcController), are characterised by a set of properties that contain the physical and semantical details of the equipment represented by the object. For instance, the property set Pset_ControllerTypeCommon contains the

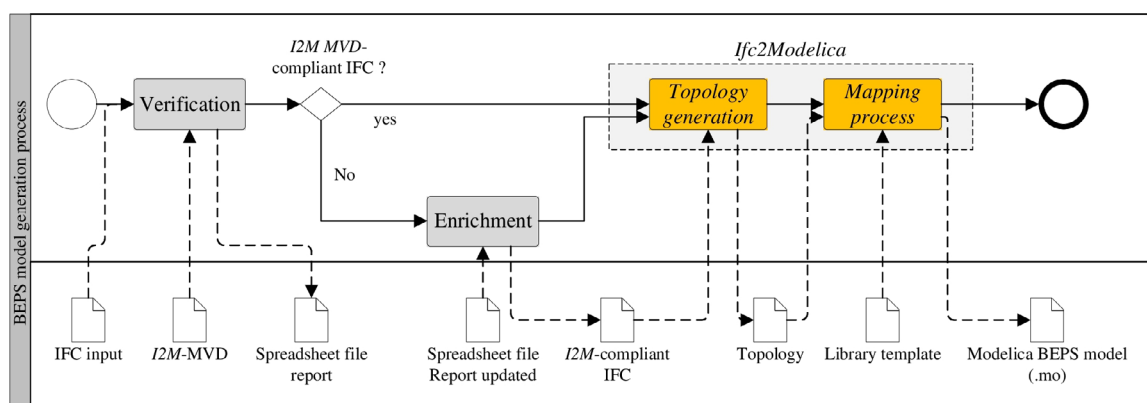


Figure 1: Overview of the proposed workflow, as described in detail in Andriamamonjy et al. (2018).

common attributes of the different controller (IfcController) types.

The logical relationship between the different entities is represented by a set of interrelated – abstract– entities referred to as *a concept*. The combination of entities and concepts that satisfies the exchange requirement of a specific domain (e.g. energy simulation) at a certain stage of the process is called Model View Definition (MVD). The main entities and concepts used in IFC are defined in the two general purpose – buildingSmart-implemented– MVDs: Design Transfer View (DTV) and the Reference View (RV), see buildingSMART (2018).

Andriamamonjy et al. (2018) have proposed a MVD based on the official IFC4 DTV MVD that is tailored for energy simulation using Modelica. They also defined the modelling requirements and preconditions to obtain a BI-m that complies with their MVD. E.g., to be able to generate the control model from IFC, each entity representing a controllable device (e.g. IfcFan) has to be attached to an actuator entity (IfcActuator). The logical connection between both entities (e.g. IfcFan and IfcActuator) is implemented using the Element connectivity concept. In turn, each actuator has to be connected to a controller entity (IfcController) through the Port Connectivity concept to simulate the signal exchange between both devices. The type of control algorithm embedded in the controller device must be provided as well. Finally, if the controller device computes its output using other devices' signals (e.g. from a sensor, IfcSensor), then the controller object (IfcController) must be connected to this device using the Port Connectivity concept.

In addition to the above described requirements, the current study proposes the use of a new

property set referred to as Pset_EN15232 to integrate the definition of the different control functions as described in the standard EN15232. More specifically, this new property set is attached to controller entities (IfcController) and contains the name of the control function according to EN 15232 (e.g. VENT_RMFLOW_CTRL in table 1) and its level of complexity (e.g. 2 in table 1). Table 2 shows the additional property set that has to be attached to a controller entity. The control function's name is stored in the "Function" property while the level of complexity is placed in the "Level" field. The resulting IFC that contains this information is used as an input to BII to generate the BEPS model.

Table 2: Description of the new property set proposed

Pset_EN15232		Type
Function	VENT_RMFLOW_CTRL	IfcLabel
Level	2	IfcInteger

Automated integration of BACS in a detailed energy simulation model

The model generation process behind BII relies on two main steps: the *topology generation* and the *mapping process*.

The topology generation translates the IFC data model into a structure (topology) that can be directly mapped into a Modelica model. The topology consists of two main parts: nodes and edges. A node is a simplified object (instance of a Python class) that mirrors an entity and contains the different properties attached to this entity. Edges, on the other hand, represent the *concept* between the entities and represent the link between nodes. The rules that convert IFC

Table 3: Extended library template applied to the *IfcController* entity

Node	Subtype	Component template
(C): <i>IfcController</i>	Pset_EN15232.Function= VENT_RMFLOW_CTRL , Pset_EN15232.Level=0	Path: Modelica.Blocks.Sources.Constant, Parameter:#{k}#.
	Pset_EN15232.Function= VENT_RMFLOW_CTRL , Pset_EN15232.Level=1	Path: Modelica.Blocks.Sources.Pulse
	Pset_EN15232.Function= VENT_RMFLOW_CTRL , Pset_EN15232.Level=2	Path: Modelica.Blocks.Continuous.LimPID, Parameter:#{k}#, #Ti#, #Td#. The <i>IfcController</i> entity must be logically connected to the room sensors

into this topology are described in more detail in Andriamamonjy et al. (2018).

To convert the topology into a Modelica model, the mapping process takes advantage of the fact that both IFC and Modelica use an object-oriented approach to modelling. Nodes are translated into Modelica components while edges are converted into Modelica connections (*connect*). The mapping process relies on an XML-file referred to as *library template*. This file contains the semantic description (component template) of the components corresponding to the nodes. For instance, it contains the "path" of the component in the Modelica library and the description of the "parameters" required. The mapping process then searches in the library template the corresponding Modelica component for each node in the topology, retrieves the actual values of the "parameters" from the IFC file and then uses both the "path" and the parameters' values to instantiate the component.

The library template is a flexible and user-definable file which implies that users can modify the Modelica component corresponding to a specific node (e.g. controller node). This study takes advantage of such flexibility to integrate EN15232 specifications. More specifically, the range of Modelica components to which a controller node (from *IfcController* entity) can be mapped is extended to include the different control functions according to the levels defined in EN15232.

Table 3 presents an illustration of the extended library template in which the control function shown in table 1 is used as an example. The *IfcController* node (C) can be translated into three different Modelica components where each of the Modelica components used contains the equations that correspond to the specific level of complexity to which it belongs. As an example, the controller node that has a

Pset_EN15232.Level=0 which corresponds to the simplest level (not automated) in EN15232 is mapped into a Modelica component that provides a constant output (Modelica.Blocks.Sources.Constant). Similarly, a controller node that has

Pset_EN15232.Level=1 can be mapped into a schedule based Modelica component. For instance, the Modelica.Blocks.Sources.Pulse component (Table 3) modulates the air flow rate in a room based on a certain time pattern.

For the nodes that implement Pset_EN15232.Level=2, a PID-controller component (e.g. Modelica.Blocks.Continuous.LimPID) can be adopted. In such case, the *IfcController* entity must be connected (through the Port Connectivity concept) to the *IfcSensor* located inside the room.

During the mapping process, if a controller node (*IfcController*) contains a Pset_EN15232 property with a Pset_EN15232.Function= VENT_RMFLOW_CTRL and Pset_EN15232.Level=0 then the controller node is mapped into the Modelica component corresponding to this specific template (in this example: Modelica.Blocks.Sources.Constant).

This approach means that the Modelica library used must contain the Modelica components corresponding to these different control function levels. The implementation of these different Modelica components is out of the scope of the present paper. However, Modelica's flexibility and openness combined with the emergence of open-source component libraries has the potential to facilitate the implementation of such extension. The Modelica component presented in table 3 is for demonstration purpose: any Modelica component that corresponds to the

level of complexity defined in EN15232 can be used instead.

In this approach, the control equations are still embedded in the Modelica components. While this is a perfectly valid approach, it might be interesting to have the control algorithms already embedded into the controller objects in the BI-m. To avoid a multitude of different incompatible implementations, it is suggested to use the concepts of ISO 16757. As soon as the parts 3 and 4 of that standard will become available, the current approach can be easily complemented with an implementation of control functions in the BI-m. From a point of information management, it is interesting to include the functions explicitly in the BIM objects and by doing so providing access to this information for different applications and to simplify documentation and information exchange between different stakeholders.

APPLICATION

This section shows the practical implementation of the previously presented approach to a lecture room of a university building. The facility is equipped with a BACS that has several features which can be classified as class A control functions. However, most of the control strategies implemented were defined post-construction and not planned in detail during the design stage.

This section aims at showing how BIM could have been used during the design stage to integrate a detailed description of the BACS and calculate its impact as part of the detailed design by using a BEPS model that includes the BACS description according to EN 15232.

A brief description of the facility and its characteristics as a class A BACS is given, followed by a closer look to the facility's BI-m including the EN15232 compliant specification of the control functions.

Description of the test facility

The test facility on the Technology Campus Ghent of KU Leuven is a Near Zero Energy Building (nZEB) and comprises two lecture rooms (E120 and E220) for up to 80 students each, a staircase and a technical room (see figure 2). The lecture rooms (E120 and E220) are thermally insulated not only from the exterior but also from one another and the staircase in order to be able to use adiabatic boundary conditions for the

internal walls and by this obtaining small decoupled simulation models if needed. The external walls of E120 are built with bricks (high thermal mass) while the external walls of E220 are a timber frame structure (low thermal mass). The two lecture rooms have an identical window area. High-performance triple glazing windows are used. The south oriented windows are equipped with blinds controlled by the BACS. A blind control strategy similar to the BLIND_CTRL_function (level 2) defined in EN15232 is applied (BLIND_CTRL-Level 2). Also, all windows are motorised and can be opened and closed automatically to enable free cooling strategies (VENT_FREECOOL_CTRL-Level 2 or 3 in EN15232).

A stereo camera is placed at the entrance door of each lecture room to monitor the number of occupants in real-time. This enables the implementation of control strategies based also on the number of people present in the lecture rooms and not purely on CO₂ measurement.

Daylight-controlled, dimmable lighting systems and automated shading, both connected to the central BACS contribute to the visual comfort and reduce energy consumption (LIGHT_LEVEL_CTRL).

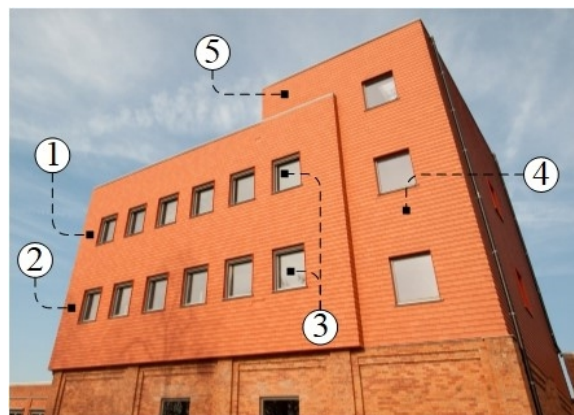


Figure 2: Picture of the southern facade of the test facility. (1): Room E220, (2): Room E120, (3): Windows, (4): Staircase, (5): Technical room.

An air handling unit (Menerga™ AdsSolair 56) ensures the indoor comfort and air quality in E220 and E120. The AHU is capable of delivering a maximum air flow rate of 5100 m³/h and an air flow of 4000 m³/h in normal conditions. The AHU possesses a double heat exchanger equipped with an icing protection control system (VENT_HRICE_CTRL-Level 1). The unit is equipped with energy-efficient fans (supply and return) with a Variable Frequency Drive (VFD) system (VENT_AHUFLOW_CTRL- Level 4). Four internal dampers: (1) Exhaust Air (EA) bypass, (2)

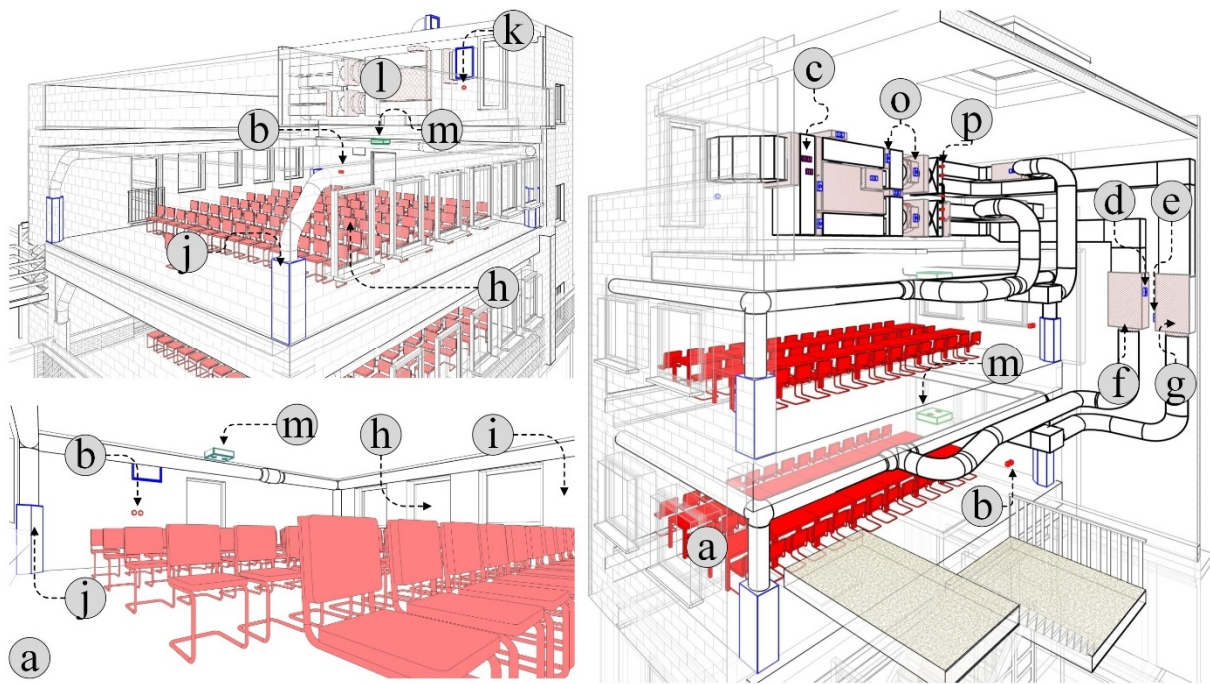


Figure 3: BI-m representing the test facility. (I): general view of the facility, (ii): A closer view of room E120, (III): A closer view of the ventilation system. (a): Room E120, (b): Temperature sensor inside room E120, (c): control panel where the control entities are placed, (d): Actuator attached to the supply VAV of E120, (e): Actuator attached to the return VAV of E120, (f): Supply VAV of E120, (g): Return VAV of E120, (h): Windows, (i) External walls, (j): Supply air terminal, (k): Outside air temperature sensor, (l): Air Handling Unit, (m): People counting camera, (o): Actuators attached to the other controllable objects, (p): Sensors embedded inside the AHU.

exhaust air, (3) Outside Air (OA) and (4) outside air bypass are controlled to ensure an optimal outside air flow rate and avoid overheating at the heat recovery unit. Air flow rate and temperature are regulated by two Variable Air Volume (VAV) boxes (Return and supply) for each lecture room.

An air handling unit (Menerga™ AdsSolair 56) ensures the indoor comfort and air quality in E220 and E120. The AHU is capable of delivering a maximum air flow rate of 5100 m³/h and an air flow of 4000 m³/h in normal conditions. The AHU possesses a double heat exchanger equipped with an icing protection control system (VENT_HRICE_CTRL-Level 1). The unit is equipped with energy-efficient fans (supply and return) with a Variable Frequency Drive (VFD) system (VENT_AHUFLOW_CTRL- Level 4). Four internal dampers: (1) Exhaust Air (EA) bypass, (2) exhaust air, (3) Outside Air (OA) and (4) outside air bypass are controlled to ensure an optimal outside air flow rate and avoid overheating at the heat recovery unit. Air flow rate and temperature are regulated by two Variable Air Volume (VAV) boxes (Return and supply) for each lecture room. They are controlled, based on the heating or cooling load in the room (VENT_RMFLOW_CTRL –

Level 2). The AHU has integrated temperature and humidity sensors placed at the air inlets and outlets and inside the heat recovery system. Especially the supply air temperature at the AHU level is monitored and controlled. The controller of the AHU has a BACNET interface that provides full integration into the BACS of the building.

Also, temperature (T), humidity (RH), CO₂, Volatile organic Compound (VOC) and motion detection sensors are present in both lecture rooms. Supply and return air volume flows are measured by four Venturi tubes integrated into the ducts and equipped with differential pressure sensors.

The Building Information model (BI-m)

Figure 3 presents a 3D view of the test facility's BI-m created with the Autodesk Revit™ 2017 BIM authoring tool. Figure 3.I depicts a general view of the facility while figure 3.II shows a closer view of room E220 (figure 3.a) with the different sensing systems that it contains. The IfcController entity must be logically connected to the room sensors (e.g. Temperature sensor, people counting camera). Figure 3.III shows the ventilation system with an emphasis on the different objects constituting the control system.

For instance, the blue objects (e.g. figure 3.o, figure 3.e, figure 3.d) represent the different actuator objects attached to the controllable entities. Specifically, figure 3.d, figure 3.e represent respectively the actuators (IfcActuator) attached to the supply VAV and return VAV of room E120.

The red objects (e.g. figure 3.b, figure 3.k) represent the sensor objects (IfcSensor). More specifically, figure 3.b depicts the temperature sensor installed in E120. The control panel where

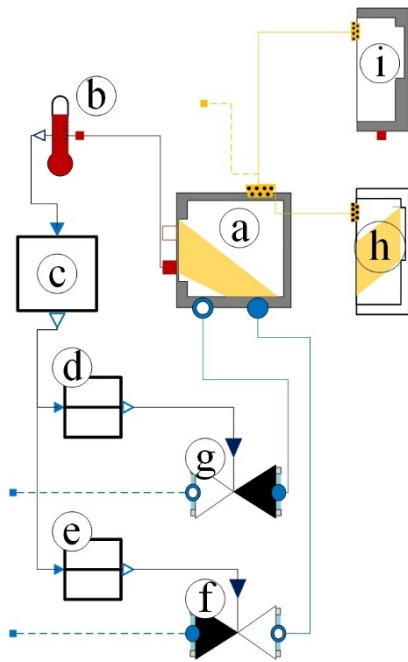


Figure 4: An example of the automatically generated Modelica model. (a): Modelica component representing the zone E120, (b): Modelica component representing the temperature sensor inside E120, (c): Modelica component representing the controller related to the VAV boxes, (d) and (e): Modelica components representing the actuator, (f) and (g): Modelica components depicting the VAV boxes, (h): Modelica component describing the window, (i): Modelica component denoting the external walls.

the different controllers (IfcController) are gathered is presented in figure 3.c.

As a general rule, a controllable object (e.g. VAV boxes, fans) must be connected to its own IfcController entity to which the property set Pset_EN15232 is attached. However, depending on the situation, several objects can be controlled by the same signal from a controller. E.g., the VAV boxes (supply: figure 3.f and return: figure 3.g) related to room E120 share the same controller entity. The parameters Pset_EN15232.Function=VENT_RMFLOW_CTRL

and Pset_EN15232.Level=2 are attached to this entity.

The used BIM software provides possibilities to integrate these custom properties into the BI-m and also exports these objects together with the properties into a corresponding IFC entity. However, the option to logically connect the different control-related objects (through the Port Connectivity concept) is still lacking in the software. As a result, the IFC file generated by the REVIT IFC export using the DTV MVD does not contain these logical relationships between the control-related entities (IfcSensor, IfcActuator, IfcController). Andriamamonjy et al. (2018) presented an enrichment process approach that allows to update the produced IFC file in order to describe these logical connections correctly. This two-step approach is still required, because custom MVDs cannot (yet) be used during the REVIT IFC export.

The enriched IFC is then used as an input to BII. The library template presented in table 3 is used combined with the IDEAS-based library template presented in Andriamamonjy et al. (2018). Figure 4 shows the part of the entire BEPS Modelica model that represents the VAV control system of room E120. The different Modelica components figure 4 (.a to .i) are corresponding to the BIM objects depicted in figure 3 (.a to .i).

For instance, figure 4.a is the Modelica component into which the IfcSpace entity representing E120 (3.a) was mapped. The sensor object in figure 3.b is mapped into the Modelica component shown in figure 4.b. The controller component figure 4.c embeds the equations corresponding to the level of complexity described in the BIM. Such a description is defined in the library template as presented in table 3.

Consequently, the full implementation of the here presented approach requires a Modelica library that defines different control components corresponding to the EN15232 specifications. The approach, shown here only for the ventilation system, can be used for the entire BI-m of the test facility, resulting in a detailed BEPS model that complies with EN15232 specifications.

During the operation stage of the facility, the impact of planned improvements to the BACS on the energy performance of the building, can be easily simulated by re-using the existing models and modifying appropriately the information concerning the control function level.

CONCLUSIONS

The current implementation provides already a solution for the main challenges:

- Describe components and systems (HVAC and BACS) in the BI-m.
- Automated checking and enrichment of the BI-m, based on the corresponding MVD.
- Enabling the use of the detailed calculation method according to EN 15232 during the design stage to easily check the impact on energy performance of different options for the BACS.

Areas for future extensions and improvement have been identified and the need for additional standardization work was shown. This includes:

- Standardization of object-oriented, machine-readable product data including the relevant information about control functions according to EN 15232.
- Standardization of domain specific MVDs, that can be used during the export from the BIM software to IFC and corresponding enhancements to the BIM authoring tools.
- Based on the methodology described in the future EN ISO 16757, control strategies could be part of the BIM object libraries supplied by manufacturers and take the proposed approach to the next level. Anyhow, currently many manufactures seem to be reluctant to publicly disclose their control strategies. This attitude hinders a holistic design of nZEBs and the improvement of the real energy performance of the buildings during operation.
- Future development of discipline specific standards like the EN 15232 could benefit from an integration into the framework defined in EN ISO 12006-3:2016 "*Building construction - Organization of information about construction works - Part 3: Framework for object-oriented information*". On-going development in working group 4 of CEN/TC 442 concerning product data templates and the creation and maintenance

of (interconnected) data dictionaries will provide more details for the implementation of this approach.

REFERENCES

- Andriamamonjy, A., Saelens, D., and Klein, R. 2018. An automated IFC-based workflow for building energy performance simulation with Modelica. *Automation in Construction*, 91:166 – 181 <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.03.019>
- buildingSMART. 2018. IFC4 Design Transfer View. <http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/ifc-view-definition/ifc4-design-transfer-view>

BIM-UNTERSTÜTZTE ERSTELLUNG INTERAKTIVER, IMMERSIVER VR-SZENARIEN AM BEISPIEL DER BRANDBEKÄMPFUNG

T. Bittner^{1,*}, C. Eller¹, M. Dombois¹ und U. Rüppel¹

¹ Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, Technische Universität Darmstadt, Franziska-Braun-Str. 7, 64287 Darmstadt, Germany

*bittner@iib.tu-darmstadt.de

KURZFASSUNG

In diesem Beitrag wird die Nutzung von digitalen Gebäudemodellen im Rahmen von *Serious Games* und *Virtual Reality* (VR) untersucht. Ziel ist es, unter Verwendung offener Schnittstellen und Formate wie dem Standard der *Industry Foundation Classes* (IFC) ein interaktives, immersives und zugleich adaptives Szenario zu schaffen, welches es dem Nutzer ermöglicht, verschiedenste Aspekte in der virtuellen Umgebung zu erleben und zu üben. Der Fokus liegt auf der schnellen und unkomplizierten Erstellung einer solchen Anwendung, wobei der Prozess durch BIM-Methoden unterstützt wird. Das Vorgehen wird anschließend anhand eines Szenarios aus dem Bereich des *Digital Civil Safety Engineering* validiert.

ABSTRACT

This paper examines the usability of digital building models in the context of *serious games* and *virtual reality* (VR). Through the use of open and standardized interfaces and exchange formats such as the *Industry Foundation Classes* (IFC) the aim is to create an interactive, immersive and adaptive scenario which enables the user to experience and practice various aspects within the virtual environment. The focus lies on a prompt and simple design and implementation of such an application, supported by BIM methods. The approach is validated by means of a *digital civil safety engineering* scenario.

EINLEITUNG

Im Lebenszyklus eines Gebäudes gibt es vielfältige Anwendungen und Anforderungen, die stark geprägt sind von der baulichen Struktur

und den Interaktionen zwischen Mensch und Gebäude. Angefangen bei etwaigen Begehungen während der Bau- und Nutzungsphase, über Planungen vom Interieur hin zu verschiedenen Navigations- und Sicherheitsanwendungen (z.B. der Evakuierung bzw. Entfluchtung), um nur einige Beispiele zu nennen. Nutzer dieser Anwendungen sind speziell im Sicherheitsbereich professionelle Feuerwehr- und Rettungskräfte, aber auch die Personen, die sich täglich in den jeweiligen Gebäuden aufhalten. Dem Prinzip der „Hilfe zur Selbsthilfe“ folgend muss der Betreiber eines Gebäudes es ebendiesen Personen durch z.B. Brandschutzmaßnahmen oder Fluchtwegkennzeichnungen ermöglichen, auf Gefahren zu reagieren.

Wichtiger Bestandteil dieser Maßnahmen ist das regelmäßige Durchführen von praktischen Übungen (Bundesverband Brandschutz-Fachbetriebe e.V., 2018). Ein Problem dabei ist jedoch, dass Übungen häufig hohen organisatorischen und finanziellen Aufwand erfordern, da der reguläre Arbeitsbetrieb beeinträchtigt oder ganz eingestellt und teilweise Änderungen an der Bausubstanz bzw. der Einrichtung vorgenommen werden müssen. Hier kommt VR ins Spiel - im wahrsten Sinne des Wortes. Durch die Integration von digitalen Gebäudemodellen in Entwicklungsumgebungen bzw. Spiel-Engines sowie die weitergehende Anreicherung der Modelle mit semantischen Informationen und Interaktionsmöglichkeiten, wird es ermöglicht, mit geringem Aufwand vor Ort adaptive Szenarien zu erstellen und ohne Verzögerung zu bespielen. Die aktuellen VR-Anwendungen, die auf sog. *Head Mounted Displays* (HMDs) und fortschrittliche Trackingmethoden zurückgreifen, bergen ein

großes Potenzial, da sie Menschen ohne nötige Änderungen am Gebäude in eine kontrollierbare, sichere Umgebung bringen.

In dieser Arbeit wird das Potenzial von VR-Anwendungen im gegebenen Kontext weiter untersucht. Der Ansatz wird mit Hilfe eines Szenarios aus der Brandbekämpfung umgesetzt und evaluiert. Dabei wird sowohl auf die Zeit zur Erstellung des Szenarios als auch dessen Komplexität und Anpassbarkeit eingegangen. Weitere Teile sind wie folgt untergliedert: Abschnitt 2 gibt einen Überblick über vergleichbare Arbeiten, Abschnitt 3 beschreibt das Konzept zur Erstellung der interaktiven Szenarien und in Abschnitt 4 werden die Implementierung und Evaluierung erläutert. Abschnitt 5 zieht schließlich die endgültigen Schlussfolgerungen und gibt einige Anregungen für weitergehende Ansätze.

STAND DER FORSCHUNG

VR als Forschungsgebiet ist noch relativ jung und geprägt von der Entwicklung der notwendigen Computerhardware. Bislang gibt es noch keine einheitliche Definition. Einerseits beschreibt es die Technologie, die es ermöglicht, mit Hilfe spezieller Hardware immersive und interaktive Umgebungen zu schaffen, andererseits bezieht sich der Begriff VR auf eine Methodik zur Einbeziehung von Nutzern in eine scheinbare und kontrollierbare Realität (Dörner u.a., 2013). Studien haben bereits mehrfach gezeigt, dass die Nutzung von VR einen positiven Einfluss auf die Effektivität von Lernergebnissen haben, da sie Motivation und Zufriedenheit der Nutzer steigern (Guillén-Nieto & Aleson-Carbonell, 2012; Merchant u.a., 2014).

Obwohl VR-Anwendungen mittlerweile in vielen Bereichen für Lern-, Übungs- bzw. Trainings- und Planungszwecke zum Einsatz kommen, lässt sich das größte Anwendungsgebiet im Bereich der Sicherheitsforschung identifizieren. Dabei betrachten viele Arbeiten schwerpunktmäßig das kollaborierende Üben und Lernen von Nutzern sowie deren Interaktionen untereinander und mit computergesteuerten Avataren (Passos u.a., 2017; Sharma u.a., 2014). Neben der Kollaboration, speziell auch zwischen verschiedenen Fachdisziplinen (Edwards u.a., 2015) oder in der Ausbildung (Wu u.a., 2017),

liegt der Fokus bei der Nutzung von VR-Technologien im Bauwesen häufig auf der Visualisierung und einer damit verbundenen Erhöhung des Verständnisses für die Strukturen speziell komplexer Gebäude. Um eine möglichst realitätsnahe Darstellung zu gewährleisten, werden hierbei häufig CAD-Pläne oder digitale Gebäudemodelle verwendet, um aus ihnen die zugehörige Geometrie abzuleiten (Hilfert & König, 2016; Whyte u.a., 2000).

Der Einsatz von VR für Lern- und Übungszwecke, wie in den oben genannten Publikationen beschrieben, hat sich bereits als ein vielfältiges und effektives Werkzeug zur Steigerung der Motivation und des Lernerfolgs erwiesen. Forschungsmittelpunkt war dabei bisher vor allem der „Spielaspekt“, also die eigentliche Durchführung des Szenarios. Vergessen wird dabei leicht, dass das Erstellen ebendieser Szenarien ein zeitaufwändiger und meist nicht trivialer Prozess ist, da er einen erheblichen Einfluss auf die Immersion und somit auf die Übungsqualität nimmt. Ferner zeigt sich, dass viele Szenarien Möglichkeiten zur Interaktion des Menschen mit Gebäuden (z.B. betreten oder verlassen von Räumlichkeiten via Türen) erfordern, diese jedoch durch das alleinige Importieren der Gebäudegeometrie nicht gegeben sind. Somit wird zusätzlicher Arbeitsaufwand nötig, wenn nicht ausschließlich nur Visualisierungsabsichten zugrunde liegen. An dieser Stelle setzt die Arbeit an. Aufbauend auf den Ergebnissen und Einschränkungen der vorgestellten Arbeiten wurde ein Konzept für die Erstellung von adaptiven Szenarien mit wenig Aufwand entwickelt, das neben der Gebäudegeometrie auch semantische Zusatzinformationen und daraus resultierende Interaktionsmöglichkeiten integriert. Der Fokus liegt dabei auf der Nutzung durch nicht-professionelle Anwender. Die Erstellung der Gebäudemodelle als Basis der VR-Anwendungen kann dabei entweder über entsprechende Modellierungssoftware oder auch die automatisierte Rekonstruktion von Modellen auf Basis von Punktwolken-scans (Franz u.a., 2017) erfolgen.

KONZEPT FÜR DIE SZENARIOERSTELLUNG

Um ein interaktives realitätsnahes Szenario für Übungszwecke mithilfe eines BIM-Modells zu erstellen, sind viele Softwareanwendungen, Fachwissen und einzelne, meist zeitaufwändige

Anpassungsschritte notwendig. Zusätzlich werden diese Modelle nicht in der gleichen Software erstellt und verwaltet, die für ein Übungsszenario in einer VR-Umgebung verwendet werden kann. Eine einfache vollständige Übertragung der Informationen ist somit beim aktuellen Stand der Technik nicht vorhanden. Deshalb wäre es wichtig, die Übertragung der BIM-Daten in eine VR-Anwendung einfach, mit minimalem Fachwissen und mit geringem Zeitaufwand für Anpassung bzw. Nachbearbeitung zu realisieren, um unterschiedliche Übungsszenarien unkompliziert und praxistauglich umsetzen zu können.

Das im Folgenden erläuterte Konzept sieht dabei eine schrittweise Umsetzung, aufbauend auf den Grundlagen und Anforderungen zur Übernahme der relevanten Informationen in eine VR-Anwendung, für die Entwicklung von Übungsszenarien vor. Dies ist an einzelne, skriptbasierte Komponenten gekoppelt, welche die andernfalls erforderlichen Fachkenntnisse in Bezug auf IFC-Dateien, die Interaktionsmöglichkeiten im VR-System sowie die Erstellung, Positionierung und Eigenschaften von Objekten verarbeiten und so die entsprechenden Vorgänge automatisieren. Der Nutzer soll dabei die Wahl haben, welche Gebäudemodelle geladen werden, welche Inneneinrichtung dargestellt wird und wie das Szenario abläuft, ohne über das Wissen für die jeweilige Funktionsweise zu verfügen. Des Weiteren soll eine einfache, schnelle und nachträgliche Änderung und Anpassung möglich sein. Um die resultierenden, adaptiven Szenarien angemessen umsetzen zu können, erfolgt die Umsetzung bereits im Editor von *Unity* (Unity Technologies, 2018) und nicht erst zur Laufzeit. Der *Unity*-Editor ist ein funktionsreiches und flexibles Werkzeug, welches es u.a. ermöglicht, rechenintensive Vorgänge auszulagern oder weiterführende Hilfestellungen und Analysetools zu nutzen.

Der konzeptionelle Ablauf (s. Abbildung 1) sieht zunächst vor, über erweiterte, speziell angefertigte Editorwerkzeuge das Umgebungsmodell für das Szenario in die Entwicklungsumgebung *Unity* zu laden. Hierfür wird die Geometrie des abzubildenden Gebäudes aus der IFC-Datei in ein 3D-Format, z.B. *DAE*, *OBJ* oder *FBX*, exportiert. Diese können direkt in *Unity* importiert werden. Bei vielen 3D-Formaten werden dabei automatisch

Texturen aus IFC übertragen und können somit direkt für die digitale Umgebung genutzt werden. Die IFC-Datei muss dabei vorher durch einen Fachplaner in einer CAD-Software oder z.B. durch automatisierte Rekonstruktionsverfahren erstellt werden.

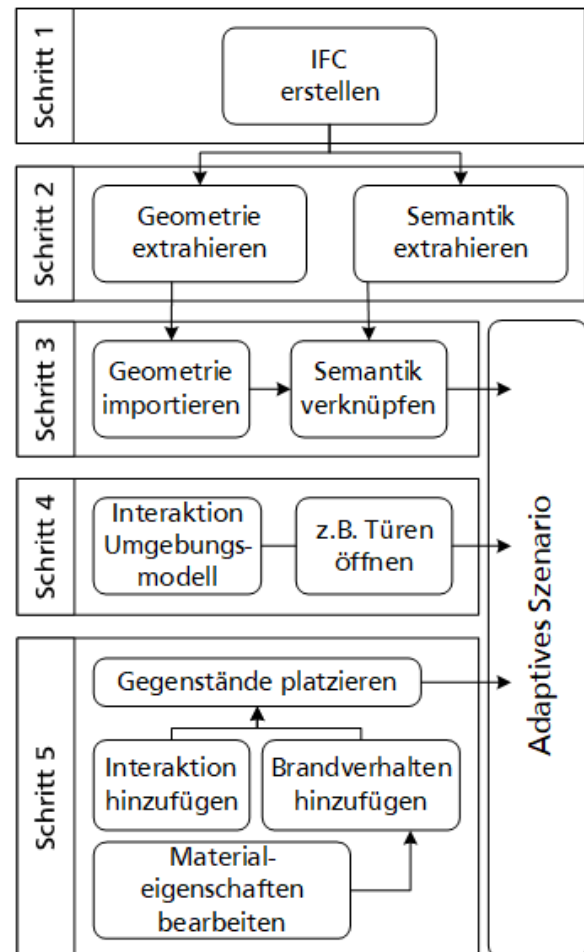


Abbildung 1: Konzept zur Erstellung eines Übungsszenarios

Um die Verknüpfung der semantischen Informationen des Gebäudes mit den einzelnen Bauteilen in *Unity* zu erreichen, erfolgt zudem eine Umwandlung nach *ifcXML* (buildingSMART, 2018). Mittels dieses textbasierten Formats kann relevante Semantik des BIM-Modells extrahiert und mit der geladenen Geometrie verknüpft werden. Dieser Schritt läuft für zuvor per Script definierte Konzepte bzw. Klassen des IFC-Schemas automatisch ab und belegt hierdurch die entsprechenden Objekte in der *Unity*-Umgebung mit den zugehörigen Daten. Auf diese Weise ist es möglich, jegliches in der IFC-Datei vorhandenes Wissen wie z.B. Objekttyp oder Materialinformationen für die VR-Anwendung nutzbar zu machen. Die Grundlage der virtuellen Umgebung mit geometrischen und

semantischen Informationen basierend auf dem digitalen Gebäudemodell ist hierdurch erstellt.

Um darauf aufbauend auch die weiterführenden Aspekte für eine funktionsfähige VR-Anwendung zur Verfügung zu stellen, müssen in den folgenden Schritten noch weitere sog. Szenenobjekte platziert und entsprechende Funktionalitäten im Umgebungsmodell verknüpft oder angelegt werden. Diese können z.B. das Öffnen von Türen oder das Greifen von Gegenständen sein. Im IFC-Modell sind alle Türen als solche abgelegt (*IfcDoor*) und somit eindeutig identifizierbar, allerdings können sie bspw. nicht dynamisch geöffnet oder verschlossen werden. Eine Animation bzw. Interaktion ist im BIM-Modell nicht vorgesehen und auch nicht erstrebenswert, da eine derartige Nutzung keinen Mehrwert für das digitale Gebäudemodell bietet. Erst in der VR-Anwendung sollte die zugehörige Semantik verwendet werden, um die Beeinflussung der virtuellen Umgebung durch den Nutzer zu ermöglichen und zu verarbeiten.

Das Konzept sieht hierbei vor, dass durch das Aktivieren der Funktionalität im vierten Schritt alle Türen des Modells, also alle Objekte vom Typ *IfcDoor*, automatisch gefiltert und über das Hinzufügen entsprechender Skripte zu dynamischen und interaktiven Objekten werden, ohne dass zusätzlich Animationen aufgenommen oder ein Verständnis über den Ablauf der Funktionsweise vorhanden sein müssen. Die BIM-Daten sowie die Visualisierung der Türen aus dem IFC-Modell bleiben dabei erhalten.

Neben der Geometrie bezeichnen die zuvor genannten Szenenobjekte allgemeine, für das Szenario notwendige Gegenstände oder auch abstrakte Objekte. Hierzu zählt z.B. die Startposition für die spätere Übung. Bei der Aufbereitung wird im Editor sichtbar eine Person im Umgebungsmodell positioniert, stellvertretend für die im Hintergrund ablaufende gesamte VR-Einstellung wie Positionierung und Drehung. Auf diese Weise brauchen Anwender kein Vorwissen bezüglich der VR-Komponenten und können die vorgefertigten Objekte bedarfsgerecht platzieren. Weitere Szenenobjekte sind bspw. Feuerlöscher in einem Brandszenario, welche eine allgemeine Gültigkeit über mehrere Szenarien hinweg besitzen. Im Gegensatz zur Startposition handelt

es sich dabei aber natürlich nicht um abstrakte Objekte, sondern Gegenstände, die im Gebäude platziert und später im Rahmen der Anwendung genutzt werden können.

Eine weitere wichtige Objektgruppe stellt die Inneneinrichtung dar. Diese steht nur in seltenen Fällen im BIM-Modell zur Verfügung, zumindest nicht im erforderlichen Umfang. Somit fehlen diese Informationen in den IFC-Dateien. Für ein Übungsszenario ist die Inneneinrichtung allerdings von Bedeutung, da sie ein wesentlicher Bestandteil der Immersion, aber auch der Funktionalität des Szenarios ist. So können Gegenstände in einem Brandszenario als ‚brennbar‘ eingestuft werden und sind damit Teil der Feuersimulation. Aber nicht nur deshalb müssen Möbel und andere Gegenstände im Umgebungsmodell hinzugefügt, korrekt platziert und mit Interaktion und Eigenschaften versehen werden. Auch die räumliche Orientierung sowie der Lerneffekt der Übung werden gestärkt, wenn der Bezug zur realen Welt aufgrund eines hohen Wiedererkennungswertes vorhanden ist. Die erforderlichen Abläufe gestalten sich wesentlich intuitiver, wenn der Nutzer den Feuerlöscher an dem Ort holen muss, an dem sich dieser tatsächlich befindet, um anschließend einen Brand im eigenen Büro zu löschen. Um hier eine unkomplizierte Umsetzung einer solchen Einrichtung zu bewerkstelligen, wird auch dies im *Unity*-Editor umgesetzt. Hier werden sog. *Prefabs*, also vorgefertigte Objekte, zu einer Auswahl hinzugefügt. Anschließend können mittels dieser übersichtlichen Liste Gegenstände direkt ausgewählt werden, die der abzubildenden Inneneinrichtung entsprechen. Diese sollen einfach durch einen Klick an der gewünschten Stelle platziert und anschließend um die vorgesehene Funktionalität erweitert werden. Gemäß der erforderlichen Genauigkeit können beliebig viele Objekte der virtuellen Umgebung hinzugefügt werden.

Die optionale Erweiterung der Funktionalität beschreibt dabei die tatsächliche Interaktion im VR-Szenario, z.B. das Hochheben von Gegenständen. Auch hier sind die entsprechenden per Skript implementierten Funktionen darauf ausgelegt, dass mithilfe weniger Aktionen alle benötigten Komponenten und Verknüpfungen angelegt werden. Auf gleiche Weise können Objekte mit Simulationsverhalten ausgestattet werden. Dieses Simulationsverhalten ist abhängig von

dem angestrebten Szenario. Beim hier ausgewählten Beispiel der Brandbekämpfung muss also das Brandverhalten der einzelnen Gegenstände beeinflusst werden. Über eine eigens angelegte Editor-Funktion kann das Objekt wie zuvor erläutert als ‚brennbar‘ eingestuft oder sogar als Brandherd, also dem Auslöser des Feuers, festgelegt werden.

Damit diese komplexen Vorgänge möglichst einfach zu implementieren sind, wird das zugrundeliegende Verhalten über eine Materialeigenschaften-Komponente hinzugefügt. Mit dieser Komponente können einzelne Eigenschaften zentral angepasst werden. Vorgesehen sind hierbei u.a. physikalische Kennwerte wie Dichte, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Heizwert, Zündtemperatur, Baustoffklasse und Feuerwiderstandsklasse. Diese können entweder individuell angepasst oder automatisch anhand der zuvor identifizierten Materialien auf Standardwerte gesetzt werden. Eine direkte Verknüpfung mit den in der IFC-Datei hinterlegten Werten ist ebenfalls möglich. Der Fokus des hier vorgestellten Konzepts liegt somit auf der einfachen Erstellung von Übungsszenarien mit komplexen, interaktiven Objekten. Dank der skriptbasierten Integration von Fachwissen können dabei tiefergehende technische Anforderungen und Vorgänge vermieden werden.

EXEMPLARISCHE UMSETZUNG

Zur Validierung des im vorigen Abschnitt erläuterten Konzepts wurde ein ausgewähltes Szenario im Rahmen der Brandbekämpfung umgesetzt. Am Beispiel eines Gebäudeteils in einem öffentlich zugänglichen Bürogebäude wurde der vorgestellte Ansatz genauer untersucht und hinsichtlich seiner Eignung zur zügigen und unkomplizierten Erstellung einer digitalen Umgebung überprüft. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt. Auf diese Weise soll es Anwendern wie zuvor erläutert möglich sein, entsprechende Maßnahmen bzw. Abläufe zu üben, ohne den täglichen Betrieb zu stören oder ganz zu unterbrechen.

Die betrachtete Funktionseinheit verfügt über eine Gesamtfläche von knapp 720 m². Hierzu zählen unter anderem ca. 255 m² Bürofläche, verteilt auf 10 Räume, sowie weitere für die Nutzungsart übliche Belegungen, bspw. für Lager bzw. Archiv, Teeküche und sanitäre Einrichtungen. Die Räumlichkeiten werden durch knapp 94 m² Flure erschlossen und sind über die beidseitig angrenzenden Treppenhäuser mit dem Rest des Gebäudes verbunden. Dabei ist es nicht essentiell, sämtliche vorhandenen Angaben exakt in das Szenario zu übernehmen, sondern vielmehr in einem Maß umzusetzen, welches über das räumliche Empfinden den Wiedererkennungswert und somit die Immersion steigert. Falls bereits ein digitales Gebäudemodell existiert, kann dieser Punkt

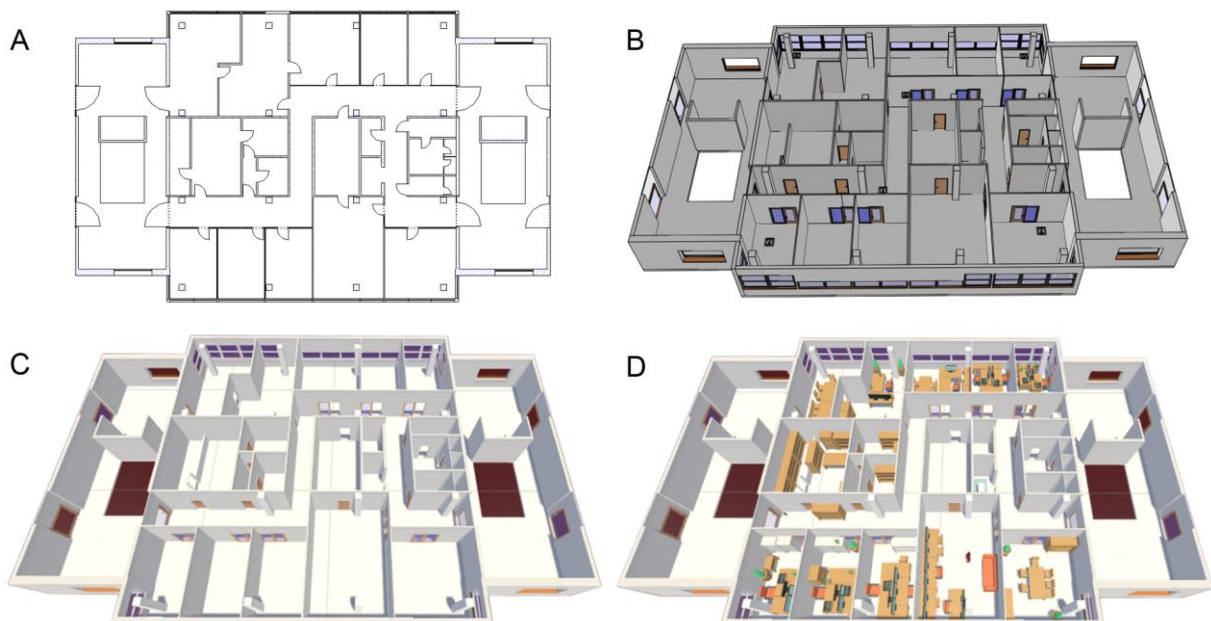


Abbildung 2: a) Grundriss des Gebäudeteils, b) IFC-Modell, c) Import in Unity, d) Fertiges Szenario in Unity

ohnehin vernachlässigt werden, insofern es adäquat oder zumindest ohne grobe Fehler realisiert wurde. Dies wurde auch in Bezug auf die exemplarische Durchführung beachtet.

Der erste Schritt, die Erstellung eines geeigneten IFC-Gebäudemodells, kann somit als optional angesehen werden. Einer der wesentlichen Vorteile der Nutzung der offenen IFC-Schnittstelle liegt hier in der weitreichenden Kompatibilität zu der meisten herkömmlichen Software in diesem Bereich – wenn bereits ein BIM-Modell vorhanden ist, besteht eine gute Chance, dass dieses entsprechend exportiert werden kann. Um dennoch einen realistischen Wert für die Gesamtzeit der Erstellung des Szenarios zu erhalten, wurden für den betrachteten Gebäudeteil zwei Verfahren für die Erzeugung eines IFC-Modells getestet. Dabei wurde zunächst ein vorliegender Grundriss (s. Abbildung 2a) mithilfe von *Autodesk Revit* nachmodelliert und anschließend mit der integrierten Exportfunktion als IFC-Datei zur Verfügung gestellt (s. Abbildung 2b). In einem zweiten Ansatz wurde mittels eines automatisierten Rekonstruktionsverfahrens wie in Franz et al. (2017) beschrieben der zugrundeliegende Gebäudeteil gescannt und auf Basis der entstehenden Punktwolke ein IFC-Modell erzeugt. Dieses Verfahren steht repräsentativ für den Fall, dass weder ein Gebäudemodell noch geeignete Pläne vorliegen.

Die anschließende Umwandlung im zweiten Schritt erfolgte mithilfe von *IfcConvert*. Die Anwendung ist Teil des Toolkits von *IfcOpenShell* und unterstützt eine Reihe von Formaten (Krijnen, 2018). Insofern die ursprüngliche Datei einem gültigen IFC-Schema folgt und keine anderweitigen Fehler enthält, dauert die Umwandlung in die hier benötigten Formate (*DAE* sowie *XML*) wenige Minuten.

Die erzeugten Dateien werden nun in das *Unity*-Projekt geladen und können direkt verwendet werden (s. Abbildung 2c). Dank der im vorigen Abschnitt vorgestellten Skripte wird die benötigte Semantik aus der IFC-Datei mit den jeweiligen Geometrien verknüpft. So erhalten nun bspw. alle Objekte vom Typ *IfcDoor* ein entsprechendes Tag im *Unity*-Editor, über das bei der weiteren Bearbeitung iteriert werden kann, um alle Türen mit den erforderlichen Komponenten für die Interaktion in VR auszustatten. Generell können dabei alle

Elemente einer IFC-Datei ausgelesen werden, für den betrachteten Fall waren Wände (*IfcWall* bzw. *IfcWallStandardCase*), Geschossdecken (*IfcSlab*) und Fenster (*IfcWindow*) relevant. Ist das Modell vollständig integriert, kann mit der Einrichtung des Szenarios begonnen werden. Hierzu wurden Schreibtische, Stühle, Schränke, Regale und andere Gegenstände so platziert, dass der Wiedererkennungswert für die in den Räumlichkeiten tätigen Personen gegeben war. Abschließend wurden der Brandherd und andere brennbare Objekte, mit denen entsprechend die Ausbreitung des Feuers beeinflusst wird, sowie die Position verfügbarer Feuerlöscher gemäß den realen Vorgaben gesetzt. Das hier analysierte Szenario verfügte über 29 Objekte, deren Interaktion und Brandverhalten für die Übung genauer definiert wurden. Mittels der zuvor angesprochenen adaptiven Umsetzung im *Unity*-Editor ist es ebenfalls unverzüglich möglich, das Szenario zu variieren. Ein Wechsel von einem Feuer der Brandklasse A (Brände fester, hauptsächlich organischer Stoffe, z.B. hölzerner Schreibtisch) in einem Büro zu einer Übung mit Brandklasse F (Fettbrand, z.B. Speiseöl) in der Teeküche nahm nur ein paar Minuten in Anspruch. Ist das Szenario fertig bearbeitet, werden in *Unity* die Lichtverhältnisse inklusive *Post Processing* (z.B. Antialiasing, Ambient Occlusion und Color Grading) angepasst sowie die begehbaren Flächen definiert, aus denen sich der für die Fortbewegung in der virtuellen Umgebung benötigte sog. *Navigation Mesh* berechnet. Die für den Aufbau der VR-Hardware veranschlagte Zeit bezieht sich auf eine vollumfassende Einrichtung der *HTC Vive* mitsamt Basisstationen, Tracking und Kalibrierung. Die vollständigen Ergebnisse der exemplarischen Durchführung sind in der Tabelle 1 dargestellt.

Dank der im vorigen Abschnitt erläuterten skriptbasierten Implementierung und der damit einhergehenden Integration von Fachwissen und Funktionalität in die virtuelle Umgebung bleiben an sich komplexe Vorgänge wie Schritt 3, 4 sowie 5b und 5c stets in einem festen zeitlichen Rahmen. Einzig bei der Erstellung des IFC-Modells (Schritt 1) sowie dem Hinzufügen der Inneneinrichtung (Schritt 5a) ist je nach Umfang, also bspw. Anzahl der Stockwerke oder betrachteter Grundfläche, von einer annähernd linearen Zunahme des zeitlichen Bedarfs dieser Schritte auszugehen.

Tabelle 1: Zeitliche Aufteilung der Szenarioerstellung

Schritt	Bezeichnung	Zeit [h]	
1	IFC-Erstellung mit Autodesk Revit basierend auf Plangrundlage	1,1	
	IFC-Erstellung mittels Punktwolken-scan und Rekonstruktion		1,7
2	Umwandlung der IFC-Datei in benötigte Formate	0,1	
3	Import nach Unity und Verknüpfung der Semantik	0,2	
4	Interaktion Mensch & Gebäude, z.B. Türen öffnen	0,2	
5a	Inneneinrichtung hinzufügen und orientieren	1,1	
5b	Interaktion Mensch & Objekte, z.B. Gegenstände nehmen	0,1	
5c	Brandszenario festlegen (Materialeigenschaften, Brandherd)	0,1	
-	Nachbearbeitung (Lichtverhältnisse, begehbare Flächen)	0,1	
-	Aufbau & Kalibrierung VR-Hardware	0,5	
	Gesamt	3,5	4,1

Wie in Tabelle 1 zu sehen, konnte ein entsprechendes Szenario im Rahmen der VR-Anwendung für den zuvor angesprochenen Gebäudeteil innerhalb weniger Stunden geschaffen werden. Insgesamt wurden im vorliegenden Beispiel 174 Objekte hinzugefügt (s. Abbildung 2d). Mit einer Gesamtdauer von 3,5 h (IFC-Erstellung basierend auf Plangrundlage) bzw. 4,1 h (IFC-Erstellung mittels Punktwolken-scan und Rekonstruktion) eignet sich der hier verwendete Ansatz dabei für eine vollständige Durchführung vor Ort.

Die beispielhafte Umsetzung demonstriert, wie das erläuterte Konzept genutzt werden kann, um bspw. die Mitarbeiter einer Firma auf den Ernstfall vorzubereiten. Dabei wurden für die zeitliche Aufteilung nur diejenigen Aspekte beachtet, die relevant für die Erstellung der adaptiven virtuellen Umgebung sind. Die vorbereitenden Maßnahmen, deren Gültigkeit über den Kontext eines einzelnen solchen Szenarios bzw. Gebäudes hinausgeht, wurden nicht berücksichtigt. Hierzu zählen primär die für die Entwicklungsumgebung implementierten Skripte, aber auch die Konfiguration der

verwendeten Software in Bezug auf VR (*Unity*, *Virtual Reality Toolkit* (VRTK) und *SteamVR*). Diese können voreingestellt werden und bleiben unabhängig vom Szenario gleich.

FAZIT & AUSBLICK

Das erläuterte Konzept zeigt eine Möglichkeit auf, ein realitätsnahes VR-Übungsszenario in Verbindung mit BIM mit geringem Aufwand vor Ort zu erstellen. Der erarbeitete Ansatz ist dabei nicht auf einen spezifischen Kontext beschränkt, sondern kann für diverse Gebäude bzw. Gebäudeteile sowie unterschiedliche Lernziele eingesetzt werden. Die Nutzung der geometrischen und semantischen Informationen eines IFC-Modells bietet hierbei eine Chance, ein weiteres Anwendungsfeld zu erschließen und die dort vorliegenden Prozesse zu vereinfachen und zu beschleunigen. Die Implementierung der VR-Anwendung mithilfe offener Schnittstellen und Formate erlaubt es dabei, trotz der heterogenen Softwarelandschaft im BIM-Bereich eine gewisse universelle Gültigkeit für den vorgestellten Ansatz zu schaffen. Darüber hinaus führt dies in Verbindung mit der flexiblen Umsetzung in *Unity* dazu, dass adaptive Szenarien entwickelt und komplexe Informationen verarbeitet werden können. So ist neben den genannten Aspekten auch eine Erweiterung bezüglich der Anbindung an externe Datenquellen denkbar. Ebenso können viele herkömmliche Formate bereits jetzt integriert werden, bspw. in Form anderweitig existierender Einrichtungsgegenstände. Auf diese Weise können komplexe Übungen, deren Entwicklung und Durchführung bisher meist sehr aufwändig ist, ohne Beeinträchtigung der täglichen Abläufe im Gebäude in der virtuellen Umgebung umgesetzt werden. Während der jeweilige Aufwand selbstverständlich vom angestrebten Umfang des Szenarios, der Anzahl der hinzugefügten Objekte sowie einigen weiteren Faktoren abhängig ist, können mit den hier entwickelten Editorfunktionen grundlegende Arbeitsschritte, basierend auf dem digitalen Gebäudemodell, automatisiert umgesetzt werden. Für den betrachteten Fall wurde davon ausgegangen, dass kein Gebäudemodell vorhanden ist – sollte bspw. ein FM-Modell mit realer Ausstattung existieren, würde dies mit einer erheblichen Zeitersparnis im Rahmen der Schritte 1 sowie 5a einhergehen.

Künftig ist es erstrebenswert, die VR-Anwendung um weitere Aspekte zu ergänzen, die den Immersionsgrad der Übungen erhöhen oder den Funktionsumfang erweitern. Ein Beispiel wäre das Auslesen detaillierterer Informationen aus der IFC-Datei, z.B. die Feuerwiderstandsklasse einer Wand (s. *Pset_WallCommon*) für die Berechnung der Brandausbreitung. Generell scheint hier die Entwicklung in Bezug auf die angekündigte Erweiterung der Parametrisierung in *IFC5* vielversprechend, wenn neue Konzepte und Eigenschaften für die automatisierte Implementierung von Interaktionen wie dem Öffnen von Türen oder dem Greifen von Objekten genutzt werden können. Letztendlich wird dies vom tatsächlichen Release abhängen und kann selbstverständlich nur dann zu einer Verbesserung führen, wenn derartige Daten korrekt im BIM-Modell hinterlegt und nationale oder regionale Unterschiede berücksichtigt werden. In diesem Fall wäre zukünftig eine fast vollständig automatisierte Anwendung denkbar, mit der Laien die Übungsszenarien nicht nur bedienen, sondern auch selbstständig erstellen können.

LITERATUR

- buildingSMART. (2018). ifcXML Specifications. Abgerufen 26. April 2018, von <http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/ifcxml-releases>
- Bundesverband Brandschutz-Fachbetriebe e.V. (2018). Brandschutzmaßnahmen des Unternehmers. Abgerufen 24. April 2018, von <http://www.bvbf-brandschutz.de/brandschutz-unternehmen/brandschutzmassnahmen/brandschutzmassnahmen-des-unternehmers>
- Dörner, R., Broll, W., Grimm, P. F., & Jung, B. (Hrsg.). (2013). *Virtual und Augmented Reality (VR/AR): Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg.
- Edwards, G., Li, H., & Wang, B. (2015). BIM based collaborative and interactive design process using computer game engine for general end-users. *Visualization in Engineering*, 3(1), 4.
- Franz, S., Irmeler, R., & Rüppel, U. (2017). Collaborative BIM Reconstruction on Mobile Consumer Devices. In C. Koch (Hrsg.), *Digital Proceedings of the 24th International Workshop of the European Group for Intelligent Computing in Engineering* (S. 116–125).
- Guillén-Nieto, V., & Aleson-Carbonell, M. (2012). Serious games and learning effectiveness: The case of It's a Deal! *Computers & Education*, 58(1), 435–448.
- Hilfert, T., & König, M. (2016). Low-cost virtual reality environment for engineering and construction. *Visualization in Engineering*, 4(1), 2.
- Krijnen, T. (2018). ifcConvert. Abgerufen 26. April 2018, von <http://ifcopenshell.org/ifcconvert.html>
- Merchant, Z., Goetz, E. T., Cifuentes, L., Keeney-Kennicutt, W., & Davis, T. J. (2014). Effectiveness of virtual reality-based instruction on students' learning outcomes in K-12 and higher education: A meta-analysis. *Computers & Education*, 70(Supplement C), 29–40.
- Passos, C., Silva, M. H. da, Mol, A. C. A., & Carvalho, P. V. R. (2017). Design of a collaborative virtual environment for training security agents in big events. *Cognition, Technology & Work*, 19(2–3), 315–328.
- Sharma, S., Jerripothula, S., Mackey, S., & Soumare, O. (2014). Immersive virtual reality environment of a subway evacuation on a cloud for disaster preparedness and response training. In 2014 IEEE Symposium on Computational Intelligence for Human-like Intelligence (CIHLI) (S. 1–6).
- Unity Technologies. (2018). Unity - Editor. Abgerufen 26. April 2018, von <https://unity3d.com/de/unity/editor>
- Whyte, J., Bouchlaghem, N., Thorpe, A., & McCaffer, R. (2000). From CAD to virtual reality: modelling approaches, data exchange and interactive 3D building design tools. *Automation in Construction*, 10(1), 43–55.
- Wu, T.-H., Wu, F., Liang, C.-J., Li, Y.-F., Tseng, C.-M., & Kang, S.-C. (2017). A virtual reality tool for training in global engineering collaboration. *Universal Access in the Information Society*, 1–13.

FLEXIBLE FILTERING OF HETEROGENEOUS DATA USING THE EXAMPLE OF THE DESIGN AND SIMULATION OF BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAICS

J. Eisenlohr¹, C. Eller², U. Rüppe², C. Leifgen², M. Boudhaim¹, C. Maurer¹, W. Sprenger³ and T. E. Kuhn¹

¹Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany

²University, TU Darmstadt, Darmstadt, Germany

³Ed. Züblin AG, Stuttgart, Germany

ABSTRACT

According to the Building Information Modeling (BIM) methodology, all participants must be provided with the information relevant to their tasks in the required level of detail at the appropriate time. In the future, the amount of detailed digital information will further increase. Therefore, we propose rule-based filtering beyond the purely class-based extraction of subsets of the overall model. The source of digital information can be a central data model, from digital product data of component manufacturers or generally from the worldwide web. After the rule-based filtering, automatic parsing into the target language takes place. As an application example, we demonstrate this methodology for the simulation of building-integrated photovoltaics as an example.

Introduction

Due to increasing digitalization in the planning processes and the operation of construction projects and buildings, amounts of data, formats and requirements for software systems are increasing. A continuous and consistent data storage over the entire building's life cycle is challenging, especially considering the large number of participants involved. Nevertheless, all planners require specific information at a specific time with a certain level of detail to fulfil their own tasks. An example for a complex planning and construction process is the holistic integration of energetically active facade components like building integrated photovoltaics (BIPV). Reliable simulations can only be carried out on the basis of a consistent data exchange with sufficiently detailed data sets. A concept to match these requirements to the heterogeneous data sets is proposed in this paper: The actual data structure should not be prescribed, but flexible filters developed that can

extract the desired information with the required level of detail from the existing data.

Related Work

There are no solutions to automatically sort, edit and provide different information in different levels of detail depending on the use case. The current solution's approach prescribes that rules can be used to filter information from data, if it has a specific factual basis or structure. Here it is possible to automatically filter out data in different formats or levels of detail (Yoon et al. 2017). This data can only be automatically analyzed or pre-processed by the prescribed data storage or structure. Such a structure is described by Zhang (Zhang et al. 2018) or VDI3805 (VDI3805). In a heterogeneous data landscape, which is usually the case in BIM, these structures are difficult or impossible to setup due to the large amount of data. Zhang et al. showed an approach for data selection and processing in BIM processes in the field of energy technology by implementing a combination of different techniques (Zhang et al. 2018). By means of preparing data and machine learning, they obtain information for calculating the energy balance automatically. They use data from different sources, but these are available in a specified file scheme. Machine learning, however, can only be successfully carried out with the help of very specific structures and purposeful data. A versatile, inhomogeneous and very variable data basis such as in BIM is very challenging for the application of machine learning. For the use case presented in this paper, the integration of photovoltaic systems in buildings, the required data is very heterogeneous and thus not well suited for machine learning.

Another concept for filtering of building data in a BIM process is the IDM/MVD method (buildingSMART) proposed by buildingSMART. By this method, IFC files are created using

filters. The defined schema version is used to verify the integrity of IFC files. The result of filtering by the IDM/MVD method is an IFC file generated according to predefined specifications. In this case, the rules are schemas predefined by the IDM. The effort involved in defining the individual data requirements for individual specialist roles via the IDMs is very time-consuming and only slightly flexible. It also works only with building data in an IFC-File, which is not the whole data in a Building Information Model like is shown in the design and simulation of building integrated photovoltaics. The advantage of the IDM/MVD method is to define processes precisely and to create filters that can be used permanently for these processes. However, as processes in different construction projects are usually not equal or not using the same information, the method is not usable. There is a multitude of product and building information data in very different formats. Nevertheless, the information of one area is also needed and linked to the information of another one. An exclusive method for the individual construction planning as described above is therefore not desirable.

As the planning of building integrated photovoltaic systems requires a large variety of different information from different sources, we look at this application example to demonstrate the versatility and flexibility of the approach proposed in this paper. Photovoltaic systems that are integrated into buildings (BIPV) face several challenges compared to free-standing PV plants. Besides their multi-functionality and a more complex construction process with the constraints given by a building and its facades and roof, BIPV systems are often geometrically very complex, leading to a more complicated electric circuit and effects like partial shading and hot spots. While for plant or rooftop configurations, simplified models at module level can be applied, geometrically and electrically complex BIPV systems require tools that are fully flexible with regard to the geometrical and electrical design of the system and a description at solar cell level. This makes planning processes and yield analyses of BIPV systems complex and time-consuming. A complete BIPV simulation requires not only an electrical model of the PV (empirical models like (Heydenreich et al., 2008) or (King et al., 2004) or equivalent circuit models like (Chin et al., 2015)), but also prior steps like irradiance calculations and

thermal modelling of the PV devices and subsequent steps like DC-AC conversion. Especially the calculation of irradiance can be challenging, as irradiance data of high spatial resolution on each solar cell of the BIPV system are required. As the geometry of the building skin and its surroundings is usually complex, simple view factor methods widely used for simple PV plant configurations cannot be used. Detailed, time-resolved shading analysis is required. There are several tools on the market that can fulfill parts of these requirements, mainly 3D CAD programs like for example ArchiCAD, GoogleSketchup, Autodesk Revit or specialized PV simulation tools like for example PVsyst, PV*Sol or BIMsolar. However, all of these tools have certain restrictions and none accurately combines all relevant BIPV simulation steps: detailed irradiance calculation (1), temperature calculations of PV cells (2), electrical DC behavior of individual cells (3) and the complete system (4) and DC-AC conversion (5). Therefore, BIPV planning processes are performed in very different ways with different level of detail and varying quality by different planners.

CONCEPT

Due to the numerous demands on data at different points in the planning processes, as shown in the related work, it is important to find a solution that enables flexible data processing and filtering without restricting the amount and structure of data. Therefore, a concept was developed that suggests a flexible way to prepare the required data in different levels of detail, independent of the available data, data structure and amount of data.

To extract specific content from a set of information, procedures must be defined that tell the processing machine what to do. This can be done in various ways. In the simplest case, clear rules of the form "If premise, then conclusion" are defined. In order to map more complex relationships, decision tables can be created similar to simple rules, in which one or more actions can be defined for combinations of any number of conditions. In more complex applications, artificial intelligence (AI) methods can be used instead of fixed rules, but these are not addressed here, because they can be implemented for a specific application but cannot be used for a broad spectrum. By the

introduced approach, we propose a solution, which combines simple filtering approaches with the power of more flexible routines.

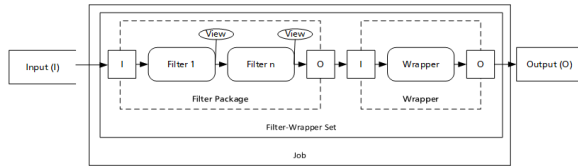


Figure 1: Dataflow in a filter-wrapper set

The concept is based on a filter-wrapper set (Figure 1). Such sets can be assembled and developed according to individual requirements. A set has the task of filtering input data, preparing it, for example, merging or redesigning it and finally wrapping it into the desired output data format. Filtering is done by a various number of individual filters, which together form a filter package. All filters have a defined input and output. Only one data source can be processed per filter and the data format of the output corresponds to that of the input. The simplest form consists of a filter package with one empty filter, in which the input and output are equivalent. This is necessary, for example, if data sets are to be queried completely. Before and after each filter, the results can be looked up and examined in a view like the views processed in query languages like SQL. Views can also be output and used for checks during the filter process.

To be able to use data in different applications, it may have to be converted from one format to another. This can be done by means of so-called wrappers for the respective requirement. Such a wrapper receives the data in a specific input file format and converts it into the desired output file format so that this can be used by a specific software or another connected interface. For example, the building data of an IFC file can be converted into a RADIANCE file for ray tracing calculations. The simplest form of a wrapper has the same input as output format and no conversion takes place.

In order to further increase flexibility, an additional module can be added to the entire preparation process. This corresponds to a worker, which has an arbitrary number of inputs and outputs (while a filter and a wrapper only have one input and one output). This allows for using information from one input to process

another input. As an example, translating a file into another language can be mentioned. Besides the file that shall be translated, a file that contains the desired language as information is needed. The worker uses both information sources to change or add language data based on the language selection. In this case, a worker parses the data into the desired output format and no wrapper is needed. This powerful component makes a filter-wrapper set very flexible and adaptable (Figure 2).

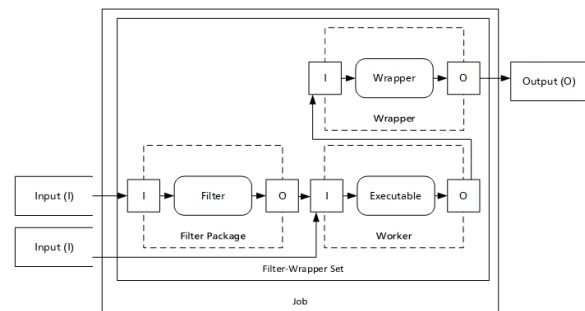


Figure 2: Dataflow in a filter-wrapper set with multiple inputs

The idea behind this concept is to develop an adaptable environment that provides sets of filters and wrappers for various applications and data formats. Once these sets have been defined, they can be re-used in a later project phase or in further projects. With the help of this concept, there are no general limits to the pre-processing of data to required information, but only to the individual requirements and implementation of the individual filters, workers and wrappers.

IMPLEMENTATION

To implement the concept, a MEAN (mean) (MongoDB, Express Framework, AngularJS (Frontend) and Node.JS (Server)) stack was used. MEAN enables the implementation of various interfaces. For example, a REST API offers the possibility to connect to any other system. MEAN stacks are asynchronous systems that are fast and scalable. Furthermore, the development is beneficial for developers through a simple setup and building. MongoDB as NoSQL database offers a greater flexibility compared to conventional relational DB systems. One reason for this is that all content is stored in JSON format. This is also used natively in Node.JS, so the data can be used directly and no parsing or schema migration is necessary.

The server provides a backend, which is responsible for creating, viewing and executing the filter-wrapper sets. These can be carried out in so-called jobs via a browser-based frontend or the API (backend) via external software solutions, e.g. Autodesk Revit with input files from the cloud or the world wide web. The Node.JS server stores the jobs in lists so that they can be executed separately from the MEAN stack by a Java application. This application permanently runs in the background and essentially comprises a thread that executes all jobs waiting in the database one after the other. The jobs are assigned different states (waiting, in execution, successful, failed). The results in the form of the outputs are stored on the server and can be downloaded and used by planners in a parsed data structure and file format via the API or the frontend.

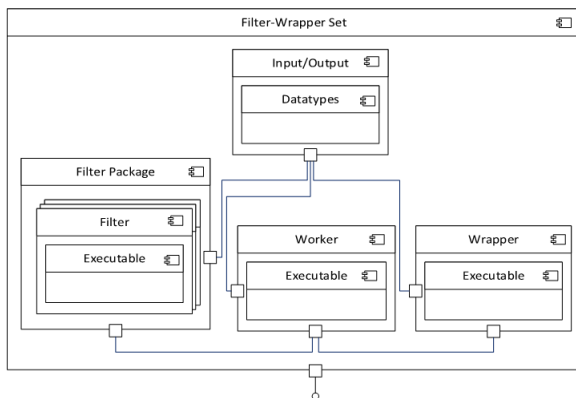


Figure 3: Components and relationship of the filter-wrapper sets

On the server, the blocks described in the concept are added as individual components and linked to the MongoDB of the MEAN stack (Figure 3). As mentioned before, the input and output component have the knowledge about the file format and schema if necessary. This can be used to do sanity checks in advance in the future. This component is required for all other components of the filter-wrapper set. Filters, wrappers and workers are able to process a wide variety of data in a variety of ways. The applications and scripts required for this can be correspondingly diverse. To make this possible, when creating the filters, wrappers and workers, an application to be executed, the so-called executables, is specified with any parameters in such a way that the command entered must only be executable in a Unix based shell. Thus, different programming languages and

frameworks can be used. For example, Java Archive (JAR) or Python applications are used as executables. This demonstrates the technical feasibility of flexible filter wrapper sets.

USE CASE: BIPV SIMULATION

As described in the related work, the planning of a BIPV system requires various information from manifold sources. Today, a planner has to collect nearly all this information manually and add it in his specialized planning tool.

Fraunhofer ISE has developed a very detailed and specialized planning and simulation tool for complex BIPV systems (Chin et al., 2015; Sprenger et al., 2016; Eisenlohr et al., 2017). Collecting the required input for this tool suite is time-consuming and error-prone. Therefore, the BIPV simulation tool suite is used here to demonstrate the versatility and applicability of the developed filtering concept.

The objective of the BIPV simulation tool suite described in the following is to calculate the detailed electrical and thermal behavior of all solar cells of a BIPV system at each time step. The tool suite comprises five major parts that are depicted in

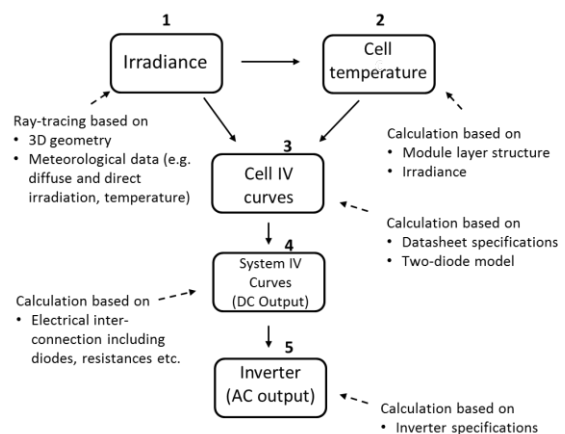


Figure 4: Schematic description of the five main steps for a detailed BIPV simulation. For each time step, the irradiance on each solar cell, the temperature of each solar cell, the cell IV characteristic for each temperature/irradiance combination, the system IV

The following Table 1 summarizes the most important required input for all the 5 steps, shows where this information usually comes from and in which format it is typically available.

Table 1: Information required for a BIPV-planning and simulation with the corresponding sources and typical data formats.

Step	Information	Source	Format
1	3D geometry	CAD programs	eg. .rvt, .3ds, .skp, .pln, .dxf, .dwg, .ifc, .obj, ...
	meteorological data	meteorological databases	.pdf, .txt, .xls, .csv
2	Module layer structure	Module data sheet	.pdf
3	Electrical cell parameters	Module data sheet	.pdf
4	Interconnection	PV-planner	
5	Inverter Specifications	Inverter data sheet	.pdf

Obviously, there are a lot of different data sources and formats involved. Typically, many of these formats are not fully machine readable (like pdf documents) and/or not standardized. The BIPV simulation tool suite takes text files and a geometry file in the RADIANCE formats .rad/.mat as input that have to be created based on the various sources. Following the concept presented above, we developed sets of filters/filterpackages/wrappers/workers that allow a more automatized collection of the required input data. Three important sets are given in Table 2 as examples. The first two, ifc2rad and ds2dm, are described in the following in more detail to demonstrate the conceptual ideas.

Table 2: Example sets of filters, wrappers and workers to extract, collect and pre-process data for a detailed BIPV simulation.

Step	Input	Filter/wrapper/worker set	Output: Files usable for BIPV simulation tool suite as input
1	Model of complete building as IFC file	ifc2rad	.rad and .mat containing the geometry and materials containing the building skin
3	Digital model of module	ds2dm	.txt containing only the relevant parameters for the 2-diode-model fitting
5	Digital model of inverter	inv2ss	.txt containing only the relevant parameters for the fitting of a parametric inverter model

ifc2rad

The filter-wrapper set ifc2rad takes an IFC file as input and performs a combination of filtering and wrapping. It filters information that is not related to geometry or material definitions and objects that are not relevant for the irradiance calculation on the outer building skin. This comprises for example geometrical details from the interior. Reducing the amount of information is essential as the resulting file size correlates to the required calculation time in the ray tracing. This filtering currently still needs manual adjustments, but a higher degree of automatization is currently under investigation and would perfectly fit in the developed framework. Also an automated reduction of geometric details is a currently investigated step that can be included in the proposed concept. To demonstrate ifc2rad, Figure 5 shows a building that is currently planned at Fraunhofer ISE. On top an IFC file exported from a BIM-software (visualization with Solibri Model Viewer) and on the bottom a visualization of the RADIANCE geometry after executing ifc2rad. The trees for example have been filtered out, because they only exist in the architectural model but not in reality. In addition to filtering, ifc2rad translates the geometry from IFC, which supports several different geometrical representations like boundary representation or constructive solid geometry, to RADIANCE, which doesn't support all of these representations.

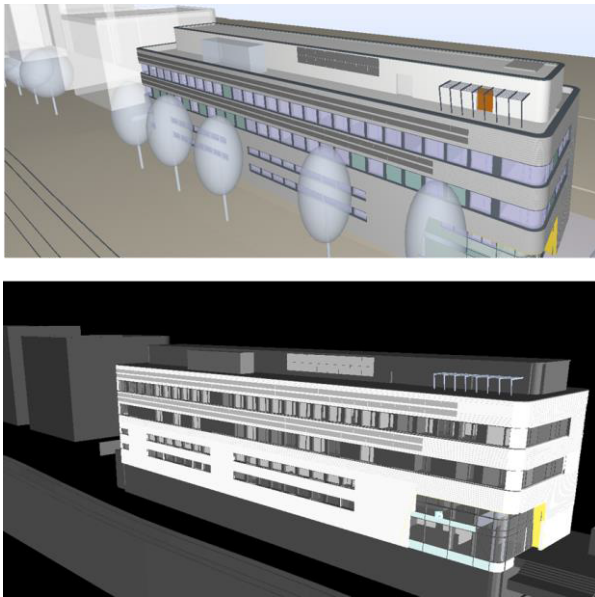


Figure 5: Visualization of an IFC file (top) of a building planned at Fraunhofer ISE. Visualization of the RADIANCE file (bottom) after application of ifc2rad, which comprises filtering and wrapping.

ifc2rad is also a good example to demonstrate the re-usability of filter-wrapper routines. Once, such a modular set of filters and wrappers has been created, it can also be used for different applications. It generally allows for a link between BIM models, which can be exported to IFC, to applications that require ray-tracing. Day-lighting simulations for example have successfully been coupled with ifc2rad and can use the same or some parts of the filter-wrapper set.

Ds2dm

As part of the BIPV simulation, a two-diode model of each solar cell in the system is created. To determine the two-diode model parameters, characteristic electric properties of the PV module like open circuit voltage, short circuit current and maximum power point current and voltage are required. Therefore, the filter-wrapper set ds2dm extracts this information from the digital product model via queries. As product descriptions may differ (e.g. one manufacturer specifies the named current and voltage values, another manufacturer could specify a complete IV-curve that contains these current and voltage values), these queries have to be as flexible and “intelligent” as possible. Figure 6 shows a visualization of the filter-wrapper set ds2dm by filtering the required data for the fitting of the two-diode model. Input_1 is a

TTL file that is provided by the digital product data base presented in (Wagner et al., 2018). The filterpackages FP_1 and FP_2 remove all information from the product data model, that are not relevant for the extraction of two-diode model parameters, e.g. the geometrical properties of the module or other attributes like weight, price etc. Wrapper 1 translates the remaining attributes from .ttl to .txt and worker 1 translates the output in the language defined by Input_2.

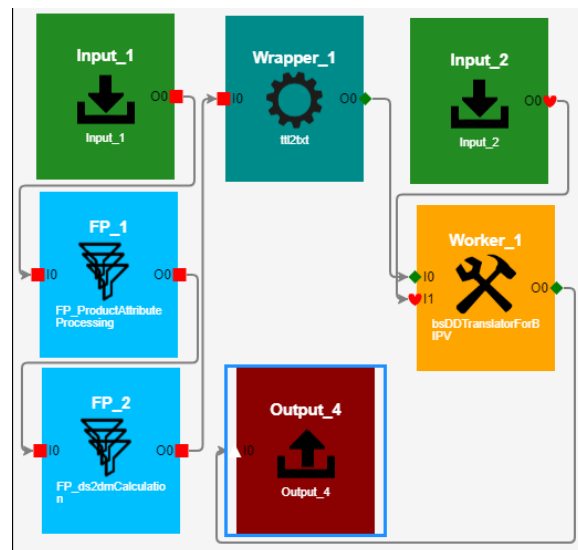


Figure 6: Visualization of the filter-wrapper set on the frontend to provide the required data for the fitting of the two-diode model.

CONCLUSION

In this paper, we presented a concept for flexible filtering of large amounts of heterogeneous data. In the BIM methodology, for a specific task certain information are required with a specific level of detail. As the amount of data in construction projects and thus in BIM models increases rapidly, efficient filtering and pre-processing is required to extract the data relevant for a specific task and to provide it in the required format and level of detail. Neither prescribing the format and structure of the source data strictly, nor machine learning, nor the IDM/MVD method from buildingSMART offers a general solution adapted to the heterogeneous and versatile data existing in a construction process and its planning phases. Therefore, we propose an adaptable environment containing filters, wrappers and workers that can be tailored to specific tasks, combined in different ways and re-used for

related tasks and applications. We used a MEAN stack as basis for the implementation. The filter-wrapper sets are created, stored, managed and executed on a server in the backend, which is accessible via a browser-based frontend or the REST API for other software applications. For the filters and wrappers there are no fundamental or conceptual restrictions as long as they can be executed from a Unix based shell.

The necessity for such a filter-wrapper-framework and its flexibility and versatility have been demonstrated in an exemplary use case: planning and simulating a BIPV system. To design and optimize such a BIPV system, detailed simulations are required and these simulations require diverse input data from various sources. The required filter-wrapper sets for a BIPV simulation have been implemented and can provide input data for a detailed BIPV simulation in a much more automated way than before. For the planning and optimization of BIPV systems, which currently is time-consuming and highly non-standardized, the coupling to BIM methodology with such partially automated, “intelligent” and adaptable filter processes is a very promising approach.

REFERENCES

- Wagner, A., Möller, L. K., Eller, C., Leifgen, C., Ruppel, U.: SolConPro: An Approach for the Holistic Integration of Multi-Functional Facade Components into Buildings' Life Cycles. Accepted for presentation at the 17th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, 05.-07.06.2018, Tampere, Finland.
- buildingSMART. Online available at <https://www.buildingsmart.de/bim-knowhow/standards>.
- Chin, V.; Salam, Z.; Ishaque, K. (2015): Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application. A review. In: Applied Energy 154, S. 500–519. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.05.035.
- Eisenlohr, J.; Wilson, H. R.; Kuhn, T. E. (2017): Detailed Modelling of Building-Integrated Photovoltaics - From Component and Environmental Data to the System Output. 5 pages / 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 2118-2122. DOI: 10.4229/EUPVSEC20172017-6DO.11.1.
- Heydenreich, W.; Müller, B.; Reise, C. (2008): Describing the World with three Parameters: A new Approach to PV Module Power Modelling. In: 23rd European PV Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), S. 2786–2789. DOI: 10.4229/23rdEUPVSEC2008-4DO.9.4.
- King, D.L., Boyson, W.E., Kratochvill, J.A (2004): Photovoltaic Array Performance Model. Report SAND2004-3535. In: Sandia National Laboratories (3535), S. 1–43.
- mean. Online available at <http://mean.io/>.
- Sprenger, W.; Wilson, H. R.; Kuhn, T. E. (2016): Electricity yield simulation for the building-integrated photovoltaic system installed in the main building roof of the Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. In: Solar Energy 135, S. 633–643. DOI: 10.1016/j.solener.2016.06.037.
- VDI3805. Online available at <http://www.pit.de/deu/Produkte/pit%20-%20VDI3805/pit-vdi3805.htm>.
- Yoon, J.; Seo, W.; Coh, B.; Song, I.; Lee, J. (2017): Identifying product opportunities using collaborative filtering-based patent analysis. In: Computers & Industrial Engineering 107, S. 376–387. DOI: 10.1016/j.cie.2016.04.009.
- Zhang, C.; Cao, L.; Romagnoli, A. (2018): On the feature engineering of building energy data mining. In: Sustainable Cities and Society 39, S. 508–518. DOI: 10.1016/j.scs.2018.02.016.

BUILDING INFORMATION MODELLING IN DER KONZEPTIONSPHASE DER PLANUNG

A. Geiger¹, S. Hempel², J. Benner¹ und K.-H. Häfele¹

¹ Institut für Automatisierungstechnik und Angewandte Informatik, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Deutschland

² Aries Solution, Oberderdingen, Deutschland

KURZFASSUNG

In diesem Beitrag wird die Anwendung Early Design Configurator (EDC) vorgestellt, die in der Konzeptionsphase Layouts erzeugt und präsentiert. Als Eingabeparameter für die Erzeugung von Layouts werden Umriss des Gebäudes, das Raumbuch und Entwurfsregeln benötigt. Die Generierung der Raum-Grundrisse des geplanten Gebäudes erfolgt automatisch mit einem evolutionären Algorithmus, in dessen Zielfunktion die Anforderungen und Restriktionen von Raumbuch und Entwurfsregeln eingehen. Durch mehrfache Ausführung des evolutionären Algorithmus lassen sich bei veränderter Gewichtung der Regeln verschiedene Layouts erzeugen. Der beschriebene Prozess zielt nicht darauf ab, fertig geplante Gebäudemodelle automatisiert zu generieren, sondern die Informationen aus der Konzeptionsphase als Building Information Model in den Lebenszyklus des Gebäudes einzubringen.

ABSTRACT

This paper presents the Early Design Configurator (EDC) application, which generates and displays layouts in the Early Design Phase. The layout generation requires the floor plan of the building, the Program of Requirements and Design Rules. Layouts are automatically generated by an evolutionary algorithm, which processes the Program of Requirements and Design Rules in its fitness function. Different layouts can be produced by applying the evolutionary algorithm multiple times with different input parameters. This process is not intended to generate ready-to-build Building Information Models, but to capture the

information of the Early Design Phase for the building life cycle.

EINLEITUNG

In der Konzeptionsphase eines Bauprozesses wird bereits viel Expertenwissen genutzt und entsprechende Informationen/Dokumente (z. B. Raumbücher und Lagepläne) erzeugt. Entscheidungen, die in dieser Phase getroffen werden, beeinflussen Kosten, Qualität und Energieeffizienz über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes (Kohler, et al., 2003). Layouts werden in der Regel manuell, z.B. als 2D-Skizzen, erzeugt und können nur bedingt zur computergestützten Auswertung herangezogen werden.

Um die Erzeugung von Layouts in der Konzeptionsphase zu unterstützen und die generierten Informationen nahtlos allen weiteren Planungsphasen zugänglich zu machen, wurde die Softwareanwendung Early Design Configurator (EDC) entwickelt. Der EDC erzeugt Layouts und generiert ein vollständiges 3D Building Information Model.

Die Erzeugung der Layouts basiert auf vereinfachten Außenkonturen des geplanten Gebäudes, Raumbüchern und formalisierten, anwendungsspezifischen Entwurfsregeln. Die Generierung selbst wird von einem evolutionären Algorithmus durchgeführt, dessen Zielfunktion durch die Anforderungen und Restriktionen des Raumbuches und der Entwurfsregeln bestimmt wird. (Hempel, et al., 2015) (Hempel, et al., 2016).

Ein Layout besteht aus Raumaufteilungen für jedes Stockwerk des Gebäudes. Wandstärken für Außen- und Innenwände werden bei der

Raumaufteilung berücksichtigt. Korridore werden gemäß vordefinierter Vorlagen für jedes Geschoss separat oder einheitlich für das gesamte Gebäude generiert. Jeder Raum ist durch eine Tür zu dem/den entsprechenden Korridor/Korridoren zugänglich. Fenster werden prototypisch abhängig von der Raumgrundfläche erzeugt. Mit den Stockwerkhöhen können alle relevanten Gebäudeelemente (Wände, Decken, Dächer, Türen und Fenster) erzeugt und als IFC-Modell (Industry Foundation Classes) (ISO 16739, 2013) exportiert werden.

Unterschiedliche Layouts können durch die Variation von Gebäudeumrissen, unterschiedliche Raumbücher und unterschiedliche Entwurfsregeln bzw. deren Gewichtung erzeugt werden. Jedes Layout erfordert deshalb Benutzereingaben. Dennoch können mit dem EDC innerhalb kurzer Zeit eine Vielzahl von Layouts durchgespielt und erzeugt werden.

Der EDC ist Teil einer Sammlung von Werkzeugen für die Planung von energieeffizienten Klinikkomplexen (Sleiman, et al., 2017). Weitere Hauptbestandteile dieser Umgebung sind eine Applikation für die thermische Simulation von Gebäuden und eine Entscheidungsplattform (Benner, et al., 2014).

ÜBERBLICK ERZEUGUNG VON LAYOUTS

Erste Versuche zur computergestützten Layout-Erzeugung gehen bis in die 1960er Jahre zurück (Whitehead, et al., 1965). Seit dieser Zeit sind verschiedene Ansätze und Methoden entwickelt und getestet worden. Diese Ansätze sind jedoch meistens auf spezielle Anwendungsgebiete, wie zum Beispiel Erzeugung von Layouts für Gebäude aus vorgefertigten Betonteilen (Liu, et al., 2013), beschränkt und sind nicht geeignet die Kreativität von Architekten zufriedenstellend zu ergänzen. Werden Ansätze zur computergestützten Layout-Erzeugung in einen ganzheitlichen Ansatz eingebunden, können sie Teilaufgaben im Entwurfsprozess auf verschiedenen Abstraktionsebenen übernehmen (Schneider, et al., 2011).

Ansätze für die Raumaufteilung kombinieren evolutionäre Algorithmen beispielsweise mit für die geometrische Erzeugung verwendeten Algorithmen zur rekursiven Unterteilung von

Flächen (Subdivision), oder Dense Packing, um ein Raumaufteilung zu erzeugen (König, et al., 2014). Dabei fließen immer auch die Nachbarschaftsbeziehungen zwischen Räumen ein.

Da die vollautomatische Erzeugung von Layouts nur in sehr speziellen Anwendungsfällen befriedigende Ergebnisse liefert, sollten Layouts durch verstärkte Benutzerinteraktionen verbessert werden. In der Praxis ist der Gestaltungsraum in der Konzeptionsphase noch nicht klar definiert und kann sich in dieser Prozessphase noch oft ändern. Weiterhin muss es möglich sein implizites Wissen, das nur schwer oder gar nicht formalisiert werden kann, zu nutzen. Deshalb muss es während der Erzeugung von Layouts möglich sein, interaktiv einzugreifen und damit das Ergebnis zu beeinflussen (Helme, et al., 2014).

Layout-Systeme, die in der Praxis einsetzbar sind, müssen folgende Anforderungen erfüllen (Ligett, 2000):

- Möglichkeiten der Verarbeitung von vielen Räumen,
- Unterstützung eines interaktiven Designprozesses,
- hohe Gebrauchstauglichkeit,
- Schnittstellen zu System für Computer Aided Architectural Design (CAAD) und für Computer Aided Facility Management (CAFM).

ERZEUGUNG VON LAYOUTS MIT DEM EARLY DESIGN CONFIGURATOR

Die für die Erzeugung eines Layouts notwendigen Eingabedaten, wie Raumbücher, Gebäudeumrissen, Gebäudelage und Entwurfsregeln, sind in Abbildung 1 dargestellt.

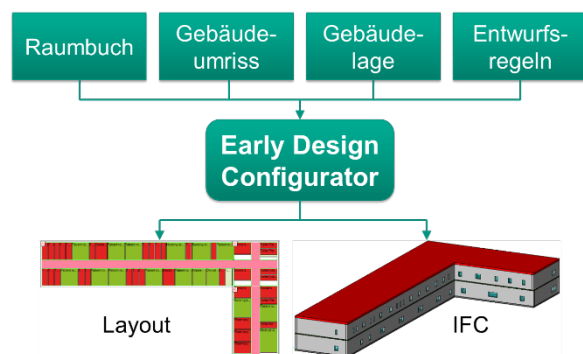


Abbildung 1: Eingabedaten für den EDC

Neben diesen Eingabedaten sind im EDC Objekt und Eigenschaftsbibliotheken hinterlegt, die vom Benutzer beliebig erweitert werden können. Die Bibliotheken bieten Vorlagen für die Korridorordnung, Wandobjekte für Außen- und Innenwände und Materialien inklusive aller energierelevanten Eigenschaften wie Dichte, Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit.

Die Erzeugung eines Layouts erfolgt in folgenden Schritten:

- Grundeinstellungen dem aktuellen Projekt anpassen,
- Gebäudeumriss manuell eingeben,
- Gebäudelage festlegen,
- Raumbuch importieren,
- Entwurfsregeln importieren,
- Layout-Erzeugung starten,
- Ergebnis als IFC exportieren.

Grundeinstellungen

In den Grundeinstellungen werden folgende Parameter festgelegt:

- Stockwerkshöhe, Wandbreiten, Deckenhöhen und Korridorbreite,
- Materialien und deren Eigenschaften
- vordefinierte Gebäudeformen,
- vordefinierte Korridorordnungen,
- IFC Export Optionen,
- evtl. verfügbare Webservices (z. B. Content Management Interoperability Services (CMIS) und BIM Service interface exchange (BIMsie)).

Gebäudeumriss

Da der Abstraktionsgrad in der Konzeptionsphase hoch ist, wird der Umriss des geplanten Gebäudes im EDC-Prototyp vereinfacht durch eine Kombination von rechteckigen Grundelementen angenähert.

Abbildung 2 zeigt ein Beispiel eines einfachen Gebäudeumrisses. Die rechteckigen Grundelemente enthalten neben den geometrischen Dimensionen auch Informationen über die Stockwerke (Starting Level und Level Count). Dadurch ist es möglich, Gebäude mit unterschiedlichen Geschosssumrissen zu erzeugen.

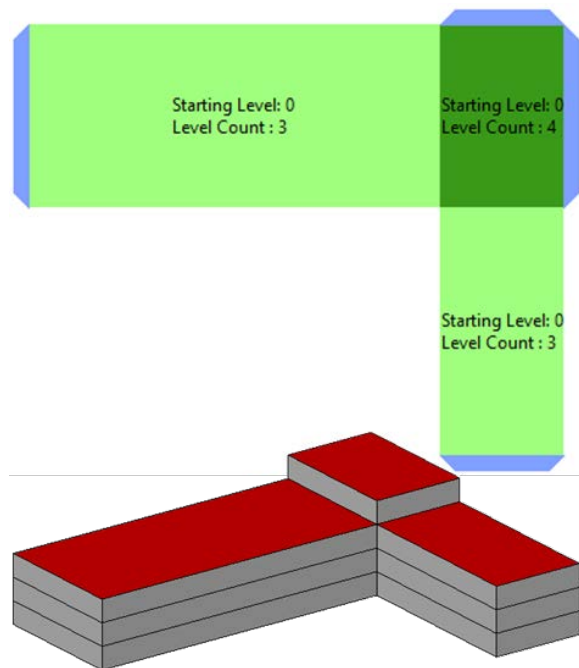


Abbildung 2: Beispiel eines einfachen Gebäudegrundrisses und die entsprechende 3D-Darstellung

Gebäudelage

Für die Bestimmung der Gebäudelage kann der Gebäudeumriss in eine OpenStreetMap (OpenStreetMap, 2018) Karte eingebildet, an die gewünschte Position geschoben und in die richtige Orientierung gedreht werden (siehe Abbildung 3).



Abbildung 3: Bestimmung der Gebäudelage auf einer OpenStreetMap Karte

Raumbuch

Für das Erzeugen eines für den EDC konformen Raumbuchs gibt es ein Excel-Template, das manuell ausgefüllt werden und als CSV (Comma-separated values)-Datei abgespeichert werden kann. Zusätzlich gibt es für die Anforderungsmanagement Applikation BriefBuilder (BriefBuilder, 2018) eine entsprechende Schnittstelle, um eine EDC

konforme CSV-Datei zu exportieren (Koster, et al., 2015).

Um eine Interpretation zu ermöglichen, sind Spaltennamen und mögliche Werte der Tabelle festgelegt. Neben allgemeinen Angaben wie Raumname, Anzahl der gleichen Räume und Raumfläche, gibt es in der Klinikplanung eine große Menge von Raumattributen. Um diese Menge von Attribute in der Konzeptionsphase beherrschen zu können, wurde ein sogenannte Label-Konzept entwickelt (Traversari, et al., 2017). Das Konzept besteht darin, nicht alle möglichen Attribute einzeln zu verwalten und zu berücksichtigen, sondern in der Konzeptionsphase Attribute zu bündeln und diesen Labels wenige Werte zuzuordnen. Im Falle von Kliniken wurden folgende Labels definiert:

- *Hygienic Class* (Werte H1-H5)
- *Access and Security* (Werte A1-A5)
- *User Profile* (Werte U1-U4)
- *Equipment* (Werte EQ1-EQ6)
- *Comfort Class* (Werte CT1-CT8)
- *Construction* (Werte C1-C6)

Diese Labels, ergänzt durch die Angabe der zugehörigen medizinischen Abteilung (*FunctionalArea*), werden vom EDC eingelesen und können für die Generierung von Layouts herangezogen werden.

Zusätzlich können die Labels in einem separaten Prozess auch für die Auswahl von möglichen Haustechnikanlagen herangezogen werden (Traversari, et al., 2017).

Da für jedes Label die entsprechenden Attribute, inklusive deren Wertebereiche und Standardwerte, hinterlegt sind, können in einer späteren Design- bzw. Detaillierungsphase diese Attribute rekonstruiert werden.

Entwurfsregeln

In der Entwurfsphase fließt bereits viel implizites und explizites Wissen ein (Bektas, 2013). Die hier beschriebenen Entwurfsregeln beziehen sich lediglich auf den Teil der Entwurfsregeln, die sich aus den Parametern des Raumbuchs ableiten lassen. Weiterführende Regeln, die sich zum Beispiel aus baurechtlichen Regularien ableiten lassen, werden hier nicht berücksichtigt.

Die Entwurfsregeln, die im EDC verarbeitet werden, sind in einem XML (Extensible Markup

Language) -Schema formalisiert. Mit Hilfe eines Editors (Rule Editor (Sleiman, et al., 2017)) können die Regeln, inklusive Gewichtung/Priorität, definiert und in einer entsprechenden XML-Datei abgelegt und in den EDC importiert werden.

Entwurfsregeln sind prinzipiell immer gleich aufgebaut und lassen sich in vier Teile aufteilen:

- Selektion von Räumen aus dem Raumbuch,
- räumliche und logische Beziehungen, die für ausgewählte Räume gelten soll,
- zusätzliche beschreibende Parameter für die Beziehung,
- Gewichtung/Priorität.

Abbildung 4 verdeutlicht den Aufbau einer einfachen Regel. Die Auswahl der Räume erfolgt in diesem Beispiel anhand des Raumtyps (Type A, Type B). Zwischen den Räumen vom Typ A und Typ B besteht die Beziehung maximaler Abstand. Die Beziehung wird mit der Wertangabe des Abstandes näher beschrieben.

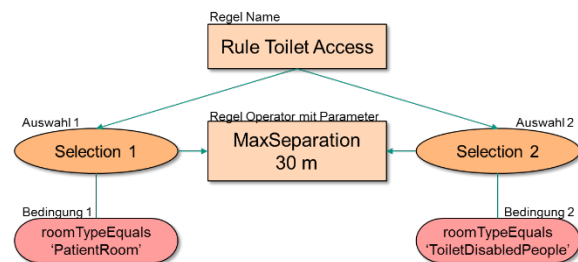


Abbildung 4: Beispiel einer Regel, bei der ein maximaler Abstand von 30 Metern zwischen den Räumen von Typ PatientRoom und Räumen von Typ ToiletDisabledPeople gefordert wird

Die Raumfilterung kann auf alle Attribute des Raumbuches angewendet werden. Besonders die Berücksichtigung der Labels bietet hier die Möglichkeit z.B. Räume mit gleicher Hygiene Klasse (*Hygienic Class*) zu gruppieren oder notwendige Mindestabstände zwischen Räumen mit bestimmter Ausstattung (*Equipment*) einzuhalten

Die Beziehungen lassen sich in zwei Gruppen einteilen:

- Unäre Beziehungen, die sich lediglich eine Gruppe von Räumen betreffen und ggf. Beziehungen zu anderen räumlichen Elementen (Gebäude, Stockwerk) herstellen;

- Binäre Beziehungen, die Beziehungen zwischen zwei Gruppen von Räumen herstellen.

Im Prototyp des EDC sind folgende unären Beziehungen implementiert:

- alle Räume müssen im gleichen Stockwerk liegen,
- alle Räume müssen räumlich gruppiert sein,
- alle Räume müssen einen bestimmten Mindestabstand zur Außenwand haben,
- alle Räume dürfen einen bestimmten Maximalabstand zur Außenwand haben.

Zwei Gruppen von Räumen können zurzeit wie folgt in Beziehung gesetzt werden (binäre Beziehungen):

- die Räume zweier Raumgruppen müssen auf demselben Stockwerk liegen,
- die Räume zweier Raumgruppen dürfen nicht auf demselben Stockwerk liegen,
- Raumgruppen 1 muss über Raumgruppe 2 liegen,
- Raumgruppen 1 muss unter Raumgruppe 2 liegen,
- zwei Raumgruppen müssen einen bestimmten Mindestabstand haben,
- zwei Raumgruppen dürfen nur einen bestimmten Maximalabstand haben.

Layout Generierung

Mit den beschriebenen Eingabedaten ist der EDC in der Lage Layouts zu erzeugen. Für die Generierung der Layouts kommt ein evolutionärer Algorithmus zum Einsatz (Hempel, et al., 2016).

Der EDC nutzt Nachbarschaftsbeziehungen und Beziehungen zwischen Räumen und Gebäudeelementen, und verwendet eine vereinfachte Methode zur Erzeugung der geometrischen Raumaufteilung. Mit diesem Ansatz können große Mengen von Räumen und deren funktionaler Zusammenhänge in Krankenhäusern verarbeitet werden.

Die Fitness-Funktion des evolutionären Algorithmus setzt sich aus verschiedenen Unterfunktionen für jede mögliche Beziehung zusammen. Als Eingabedaten für diese Funktionen dient die aktuelle Raumaufteilung. Für jede Entwurfsregel wird die passende

Unterfunktion aufgerufen. Das Ergebnis der Unterfunktion wird mit der Gewichtung/Priorität der Regel multipliziert und zur Gesamtfitness addiert.

In jeder Iteration wird die aktuelle Raumaufteilung zufällig mutiert, indem ein zufälliger Raum an eine zufällige Stelle verschoben wird. Das entstandene Layout wird mit der Fitnessfunktion bewertet. Resultiert die Änderung in einem verbesserten Layout, dann wird die Änderung behalten, ansonsten wird sie verworfen.

Im EDC wird das aktuell beste Layout immer grafisch dargestellt. Der Benutzer entscheidet, wann er mit dem Ergebnis zufrieden ist, und bricht die Erzeugung dann ab.

IFC Export

Die Layout-Erzeugung wird für jedes Stockwerk als zweidimensionales Problem betrachtet. Da Wandgrundrisse im Gebäudegrundriss beträchtliche Flächen einnehmen können, werden sie bei der Layout-Erzeugung berücksichtigt. Deshalb enthält ein Layout die Raumgrundrisse und die erforderlichen Wandgrundrisse. Da in den Grundeinstellungen auch die Stockwerks- und die Deckenhöhen hinterlegt sind, kann ein einfaches 3D-Modell erzeugt werden. Dieses Modell wird gemäß den Vorgaben in den Grundeinstellungen mit Fenstern und Türen ergänzt.

Um die erzeugten Modelle weiterverarbeiten zu können, müssen alle Elemente mit relativen Koordinatensystemen versehen werden. Dabei ist nicht nur auf die richtige Position, sondern auch auf die Orientierung zu achten. Bauelemente wie Wände und Decken müssen als Extrusionskörper exportiert werden, wobei zu beachten ist, dass Wände eine gültige Wandachse aufweisen. Räume sind unbedingt als Extrusionskörper zu exportieren. Um Zielsysteme, die eine Typisierung der Bauteile ermöglichen, bestmöglich zu unterstützen, werden für alle Bauelemente IFCOBJECTTYPE erzeugt, die alle gemeinsamen Attribute und die Materialinformationen beinhalten. Für Fenster und Türen müssen entsprechende Relationen zu Öffnungselementen und der zugehörigen Wand erzeugt werden. Die Größe der Türen ist konstant während die Größe der Fenster vom Fenster-Raumflächen-Verhältnis abhängt. Die Geometrien von Fenstern und Türen werden als

„Mapped Items“ abgespeichert, um die Dateigröße klein zu halten und die Zuordnung gleicher Bauteile im Zielsystem zu erleichtern.

Um thermische Simulationssysteme zu unterstützen werden zusätzlich die Raumbegrenzungen (Space Boundaries 2nd Level) erzeugt und exportiert.

Die Modelle können als IFC in der Version 2x3 oder in der Version 4 exportiert werden. Zusätzlich bietet der EDC auch eine CityGML Exportoption an.

BEISPIEL

Das hier besprochene Beispiel ist eine starke Vereinfachung eines realen Projektes. Das Raumbuch wurde auf 20 verschiedene Raumtypen reduziert und enthält insgesamt 79 Räume (Gesamtfläche 1018 m², ohne Korridore) mit entsprechende Labels. Als Gebäudeumrisse wurden eine L-förmige und eine rechteckige Kontur gewählt, die etwa die gleichen Gesamtgrundflächen über zwei Stockwerke bieten (L-förmig: 1920 m²; rechteckig: 2000 m²). Beide Umrissvarianten (siehe Abbildung 5) gelten sowohl für die jeweiligen Erdgeschosse als auch für die Obergeschosse. Als Standort wurde ein entsprechendes Klinikgelände in den Niederlanden gewählt.

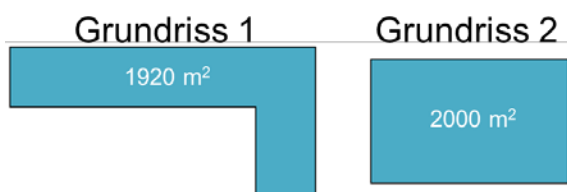


Abbildung 5: Die beiden Umrissvarianten des Beispiels

Als Entwurfsregeln wurden folgende Regeln gewählt:

- bestimmte Raumtypen müssen im untersten Stockwerk platziert werden,
- bestimmte Räume vom gleichen Typ müssen gruppiert werden,
- der Abstand zwischen Räumen von zwei bestimmten Raumtypen muss weniger als 20m sein.

Nachdem der Generierungsprozess gestartet wurde, wird jeder Iterationsschritt auf dem Bildschirm als zweidimensionaler Grundriss dargestellt. Da der evolutionäre Algorithmus des EDC keine Abbruchbedingungen kennt, muss der Benutzer den Prozess stoppen, wenn ein

Layout sinnvoll erscheint. Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen jeweils ein Layout für die beiden Gebäudeumrisse. Die Farben der Räume korrespondieren mit den zugeordneten Abteilungen (FunctionalArea). Die weißen Flächen zeigen noch verfügbaren Raum an.

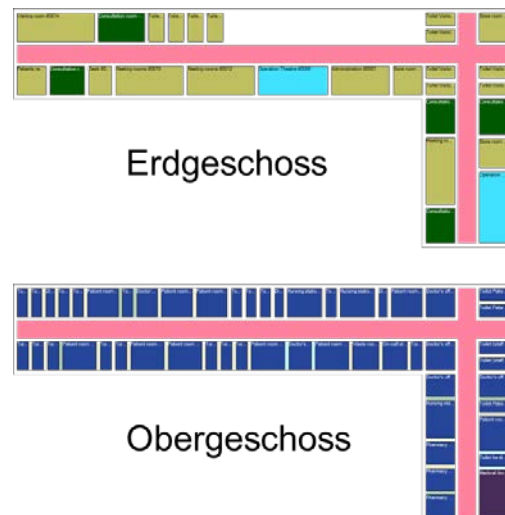


Abbildung 6: Ein Layout für den L-förmigen Umriss

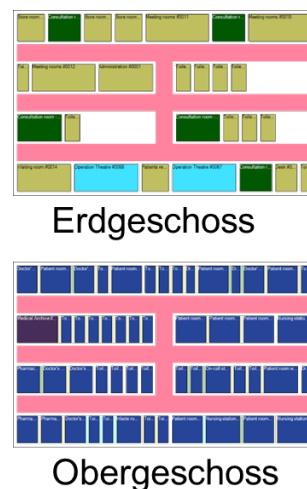


Abbildung 7: Ein Layout für den rechteckigen Umriss

Diese erzeugten Layouts können zur weiteren Verarbeitung als IFC-Modell exportiert werden.

Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen die Ergebnisse der beiden Umrissvarianten, wobei jeweils oben die Bauteile, in der Mitte die Räume und unten die Raumbegrenzungen dargestellt sind.

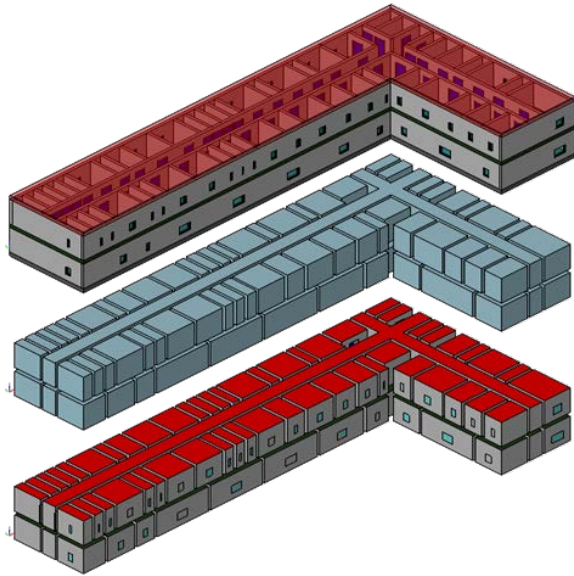


Abbildung 8: IFC-Modell erzeugt für den Umriss 1 (oben: Gebäudeelemente, mitte: Räume, unten: Raumbegrenzungen)

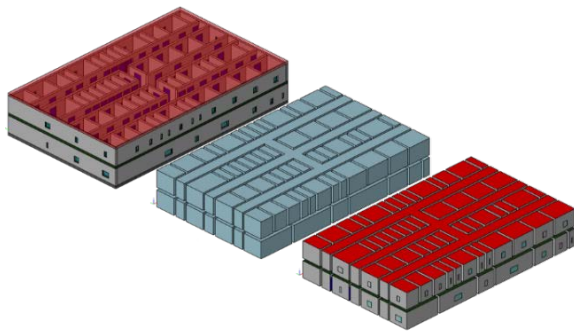


Abbildung 9: IFC-Modell erzeugt für den Umriss 2 (oben: Gebäudeelemente, mitte: Räume, unten: Raumbegrenzungen)

Importtests mit den CAAD-Systemen Allplan, ArchiCAD und REVIT haben gezeigt, dass die vom EDC erzeugten Modelle eingelesen und modifiziert werden können.

Für den Nachweis, dass die IFC Modelle auch für thermische Simulationen geeignet sind, wurden die Beispiele in das TNO Energy Calculation Tool (TECT) (Traversari, et al., 2017) eingelesen und verifiziert.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der in dieser Arbeit beschriebene Early Design Configurator (EDC) erzeugt auf der Basis von Raumbüchern, Gebäudeumrissen und Entwurfsregeln Layouts, die als Building Information Models (BIM/IFC) weiteren Planungsphasen zur Verfügung stehen. Der EDC ist dabei nur ein Glied in einer Prozesskette, die auch die Validierung,

thermische Simulation und Entscheidungsfindung umfasst.

Der aufgezeigte Weg von den Eingabedaten bis zum interoperablen Gebäudemodell ist prototypisch implementiert und an einzelnen Beispielen getestet. Die jeweiligen Akteure werden in diesem Prozess nicht ausgeschlossen, sondern sollen nur entlastet werden. Wichtig für den ganzen Prozess ist, dass einmal eingegebene und erzeugte Informationen in einem neutralen Datenmodell (IFC) für die weitere Verarbeitung bereits in dieser frühen Phase zur Verfügung stehen.

Entwicklungspotentiale gibt es in jedem Prozessschritt. Der beschriebene Gebäudeeditor ist für Sanierungsprojekte ungeeignet. Die Eingabe komplexerer Gebäudeumrisse und das Blockieren von Räumen, die nicht verändert werden dürfen, sind nur zwei Beispiele für notwendige Erweiterungen. Die Entwurfsregeln sind teilweise implementiert und auf Krankenhäuser zugeschnitten. Eine Verallgemeinerung der Entwurfsregeln und die Einbeziehung von baurechtlichen Regeln kann die Anwendungsbasis des EDC verbreitern. Die Layout Generierung selbst, die zurzeit auf einem evolutionären Algorithmus basiert, hat nur wenig manuelle Eingriffsmöglichkeiten. Hier könnte der Nutzer noch besser einbezogen werden.

Der Schwerpunkt des EDC liegt zurzeit auf der Erfüllung von baulichen Anforderungen. Gerade in Krankenhausprojekten fallen nutzungsabhängigen Anforderungen, wie zum Beispiel Laufwege, besonders ins Gewicht. Ein zukünftiges Ziel für diese Arbeiten könnte die gleichzeitige Berücksichtigung von baulichen und anwendungsrelevanten Anforderungen sein.

DANKSAGUNG

Die hier vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen des EU-Projekts STREAMER (Streamer, 2013) durchgeführt und finanziert (European Community's Seventh Framework Programme grant agreement No. 609739)

LITERATURVERZEICHNIS

- Bektas, Esra. 2013.** *Knowledge Sharing Strategies for Large Complex Building Projects*. s.l.: Architecture and the Built environment, 2013. ISBN 978-94-6186-174-0.
- Benner, Joachim, et al. 2014.** Interoperable tools for designing energy-efficient buildings in healthcare districts. *10th European Conference on Product and Process Modelling (ECPM 2014)*. Vienna, Austria : s.n., 2014.
- BriefBuilder. 2018.** *BRIEFBUILDER Homepage*. [Online] 2018. [Zitat vom: 18. April 2018.] <http://www.briefbuilder.com/>.
- Helme, Lucy, Derix, Christian und Izaki, Asmund. 2014.** Spatial configuration: Semi-automatic methods for layout generation in practice. *The Journal of Space Syntax*. 2014, Bd. 5, 1.
- Hempel, Steffen, Benner, Joachim und Häfele, Karl-Heinz. 2015.** Generating Early Design Alternatives Based on Formalized Requirements and Geospatial Data. *CIB W78 2015 - Digital Processings*. Eindhoven : s.n., 2015, S. 255-264.
- Hempel, Steffen, et al. 2016.** STREAMER EARLY DESIGN CONFIGURATOR - A TOOL FOR AUTOMATIC LAYOUT GENERATION. *Central Europe towards Sustainable Building 2016, June 22–24, 2016, Prague*. June 22–24, 2016. Prague : s.n., 2016.
- ISO 16739. 2013.** ISO 16739:2013 Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries. 2013.
- Kohler, Niklaus und Moffatt, Sebastian. 2003.** Life-cycle analysis of the built environment. *UNEP Industry and Environment*. April-September 2003, S. 17-21.
- König, Reinhard und Knecht, Katja. 2014.** Comparing two evolutionary algorithm based methods for layout. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*. 2014.
- Koster, Marc, et al. 2015.** STREAMER semantic BIM design approach for hospital: research case of Rijnstate Hospital in Arnhem, The Netherlands. *Sustainable Places 2015*. Savona, Italy : s.n., 2015.
- Ligett, Robin. 2000.** Automated facilities layout: past, present and future. *Automation in Construction*. 2000, Bd. 9, S. 197-215.
- Liu, Han, et al. 2013.** Constraint-aware interior layout exploration for pre-cast concrete-based buildings. *The Visual Computer*. Volume 29, 2013, Bde. 6-8.
- OpenStreetMap. 2018.** OpenStreetMap. [Online] 2018. [Zitat vom: 20. 04 2018.] <http://www.openstreetmap.org/>.
- Schneider, Sven, Fischer, Jan-Ruben und König, Reinhard. 2011.** Rethink Automated Layout Design: Developing a Creative Evolutionary Design Method for the Layout Problems in Architecture and Urban Design. *Design Computing and Cognition*. 2011.
- Sleiman, Hassan A., et al. 2017.** An AssistedWorkflow for the Early Design of Nearly Zero Emission Healthcare Buildings. *Energies 2017*. 10(7), 2017.
- Streamer. 2013.** Streamer - European research on energy-efficient healthcare districts. [Online] 2013. [Zitat vom: 8. May 2015.] <http://www.streamer-project.eu/>.
- Traversari, Roberto, et al. 2017.** TOWARDS SUSTAINABILITY THROUGH ENERGY EFFICIENT BUILDINGS' DESIGN: SEMANTIC LABELS. *ENTREPRENEURSHIP AND SUSTAINABILITY ISSUES*. Volume 4, 2017, Bd. Number 3 (March).
- Whitehead, B und Eldars, M Z. 1965.** The Planning of Single-Storey Layouts. *Building Science*. 1965, Bd. Volume 1, Pergamon Press 1965.

GAMIFICATION AND BUILDING PERFORMANCE SIMULATION: FROM MODEL GENERATION TO NUMERIC THERMAL BRIDGE ANALYSIS

V. A. Kalaydzhieva¹, U. Pont¹ and A. Mahdavi¹

¹ Department of Building Physics and Building Ecology, TU Wien, Austria

ABSTRACT

This contribution explores the potential of gamification approaches in the architecture-engineering-construction domain. Gamification is generally defined as the application of game-design elements and game principles in non-game contexts. It has been suggested that this approach might improve learning processes, encourage user engagement, and benefit organizational productivity. While such approaches have been applied to architectural design (e.g. parametric design tools for "playful" handling of forms), less attention has been paid to the exploration of such concepts in the building performance assessment domain.

In this context, we explore the suitability of a well-known commercially available sandbox game as a potential model generation platform for the simulation-based numeric analysis of thermal bridges. Potential data transfer routines to an advanced thermal bridge simulation tool and associated workflows have been examined and documented. Both the transfer of geometry and semantic information (e.g., different building materials, thermal properties) were investigated. The contribution highlights advantages, disadvantages, and potential of one approach for simulation-supported workflows. Moreover, it identifies future research efforts necessary for improved interoperability between gamification-oriented model generation environments and numeric simulation applications.

INTRODUCTION

Gamification is a recent trend in many professional fields. The term is regularly understood as the application, implementation, and utilization of game-design elements in non-game contexts (Detering et al. 2011). There are obvious overlaps in the work of architects,

building planners, and building domain specialists with stakeholders in the gaming field. For instance, game designers often work with architects that help in designing virtual worlds in game universes. On the other hand, technologies that emerge from gaming, such as virtual reality or gaming engines, can be used for different architectural tasks, such as real-time architectural visualizations (Yan et al. 2010).

Recently, the AEC (Architecture-Engineering-Construction) domain shows, both in practice and educational facilities, a strong trend to the increased utilization of 3D drafting and visualisation tools. It is suggested that this might not only have to do with the availability of advanced tools in the domain, but also with the increased possibilities in expressing and representing design ideas (Ibrahim and Rahimian 2010). However, the AEC industry can be considered as relatively slow in comparison to other branches, for instance the automotive industry. Although the term BIM (Building Information Modelling) has been ubiquitous in recent days, professionals still switch frequently between different design media in 2D, 3D, and 3D with enriched semantic information. The rapid development of technologies pertaining to Virtual Reality (VR), Mixed Reality (MR), and augmented reality (AR), as well as the introduction of gamification strategies in building design and planning applications might, however, change this in the upcoming years.

Building Performance Simulation (BPS) tools have become widely available in recent years, and are capable of answering complex inquiries pertaining to buildings. However, their pervasive application has been hampered, due – amongst other things – to the effective results

visualization possibilities (Attia et al. 2010, Bucevac 2016) and cumbersome data input redundancies.

This contribution focusses on the connection between two environments: *i)* AnTherm (2017) is a well-established and state-of-the-art numeric building simulation tool, intended for the assessment of thermal bridges; *ii)* a well-known game (MineCraft 2017). The latter is a software environment, where building blocks can be arranged to any envisioned form (see Figure 1).

In principle, the idea for this contribution was to document the requirements to realise the process shown in Figure 2.

Given the strict definition of gamification as suggested by Detering et al. (2011), it might be suggested that no gamification elements can be found in the numeric thermal bridge simulation. As such, the term gamification is understood here in a wider context: The game-based model generation is considered in the term gamification as well. The present contribution is based on Kalaydzhieva (2017) and is also loosely connected to a previous development (Pont et al. 2016a). Moreover, this contribution is based on a master thesis, conducted at the TU Wien, Austria



Figure 1: Kings landing from Game of Thrones, modelled in Minecraft (<https://www.cnet.com/pictures/kings-landing-from-game-of-thrones-minecraft-style-pictures/>)

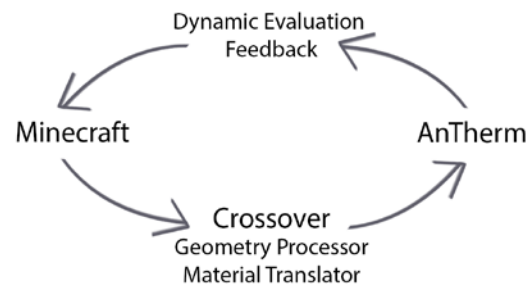


Figure 2: Concept scheme for the coupling between Minecraft and AnTherm

STARTING POINT

Deployed software environments

AnTherm

AnTherm (Analysis of the thermal behavior of building constructions with thermal bridges) is a software environment that is based on the numeric approach to solve two-dimensional and three-dimensional heat flow equations, based originally on Heindl et al. (1987). The latest improvements include a partial IFC (industry foundation classes) compatibility, the integration of sloped and rounded forms in modeling, and the transient analysis capability (Kornicki et al. 2012, 2016, Pont et al. 2016b, Volko et al. 2017). The simulation procedures in AnTherm follow the standards EN ISO 10211 (ISO 2017a) and ISO 10077 (ISO 2017b) for steady-state simulations, and ISO 13786 (CEN 2017c) for transient simulation. Simulation models for AnTherm can be generated in the software itself, be based on CAD drawings or IFC-compliant formats.

Minecraft and Mineways

Minecraft (Minecraft 2017) is a multi-platform, sandbox computer game, first released in 2011. It allows users to generate procedurally virtual worlds. Thereby, different 3D objects (cubes and fluids) can be freely manipulated. The basis is a voxel (volumetric pixel) based engine. Mineways (Mineways 2017) is an open-source program that was generated to facilitate data export from Minecraft. In principle, a number of blocks can be selected in Minecraft and exported in a number of data formats, which can be used in common 3D software tools for rendering, preparing 3D prints, and making animations. The supported formats include OBJ, STL, and VRML 2.0.

Case Studies

In the framework of this contribution, two case studies were conducted. The first case study is a rather simple corner detail, consisting of two stone walls and a wooden slab construction. Figure 3 illustrates the Minecraft-model of this common building construction detail. The model of the first case study detail was generated in "Void World". No modifications were made on the Minecraft blocks, as this first detail was generally only used for establishing and testing the data transfer possibilities. As Minecraft only allows 1 by 1 m blocks, the detail illustration can be considered as improperly dimensioned. However, different materials were defined as different blocks in MineCraft

The second case study detail is a more complex construction detail of a basement wall, based on an online thermal bridge catalogue (UNIPOR 2017). Figure 4 illustrates this second case study detail. This second detail was constructed in Minecraft as well based on the information given in that catalogue. In contrast to the first case study, the proportions of the detail were preserved. This required the educated selection of a "scale" for drafting in Minecraft. During the export it is possible to rescale the blocks. A mine craft block was understood as a 50 by 50 mm block. Given this convention, the detail could be modelled quite precisely (Figure 5).



Figure 3: First case study construction detail: Minecraft model of a corner detail

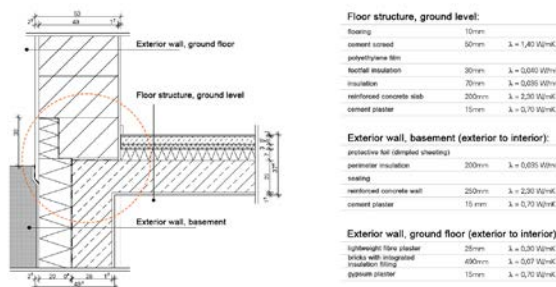


Figure 4: Second case study construction detail

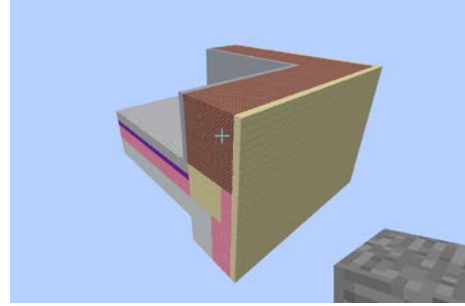


Figure 5: Minecraft model of the second case study.

WORKFLOW OF DATATRANSFER

Currently, there is no direct transfer routine between Minecraft and AnTherm. Hence, in the framework of this contribution, three alternative transfer schemes were tested, including pre-processing, transformation processes, and post-processing.

Data transfer via 3DS max and Autocad

Figure 6 illustrates the workflow of data transfer via the software tools 3DsMax and Autocad. In a first step, an object file (OBJ) is generated, which can be worked on in 3DsMax. The former blocks are understood as polygonal mesh by 3Ds max (2017). These meshes can be directly transferred to a dxf file. However, this directly generated dxf-file does violate the import file requirements of AnTherm and is thus not properly understood. Thus, the CAD file from 3DsMax requires a further checkup in a CAD tool, such as AutoCad. Dxf-files written by AutoCAD can be understood by AnTherm.

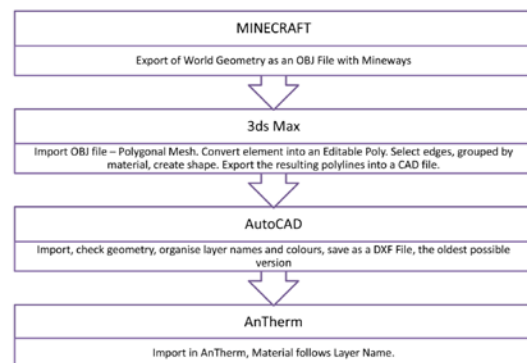


Figure 6: Data transfer from Minecraft to AnTherm via 3DsMax and AutoCAD.

A direct transfer of MineCraft OBJ-files via Autocad is not possible, as this file format cannot be understood by AutoCAD.

This data transfer routine seems cumbersome, given the number of tools involved. Moreover, while the geometry can be preserved, semantic data is only transferred via block names or colours. This however, can be used indirectly in AnTherm to quickly set up all required informational needs for a thermal bridge simulation (such as conductivity, specific heat, density, and vapour diffusion resistance).

Data transfer via Rhino

The above described workflow can be shortened, if Rhino is used. Rhino offers two different detail workflows (Figure 7). From the imported OBJ file, either polyface meshes can be exported as dxf file for AnTherm, or 3D Polylines can be written into the dxf file. In principle, the data transfer via Rhino has similar shortcomings as the data transfer via 3DsMax and Autocad, however, reduced by one intermediate tool.

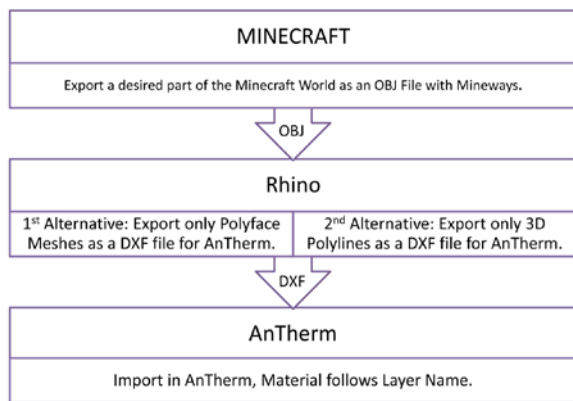


Figure 7: Data transfer from Minecraft to AnTherm via Rhino.

Data transfer via FME

The third workflows (Figure 8) that leads to a successful data transfer included the software environment FME (2017). FME is a data integration environment that focuses on data transfer between different applications. Originally coming from geographical data transfer routines, it can read 375 different file formats. Thereby, data transfer routines can be defined semi-graphically (Figure 9). FME does not require the Mineways exporter as it is able to directly read Minecraft files. As FME is able to export IFC-files, this format was chosen for data transfer experiments. It is required to graphically determine the data transfer routines in FME. FME understands the Minecraft file as a point

cloud, so it was necessary to define functions that extended the points into square in one step and then to extrude these to cubes. Additionally, the blockID-attribute that defines the material of the block in MineCraft can be considered as material name for the IFC file.

To sum up, Figure 10 illustrates the different data transfer procedures between Minecraft and Antherm.

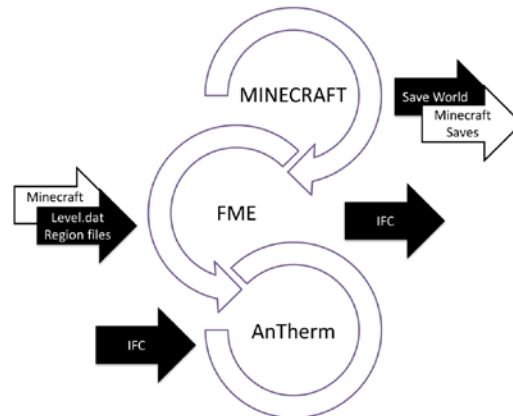


Figure 8: Data transfer from Minecraft to AnTherm via FME

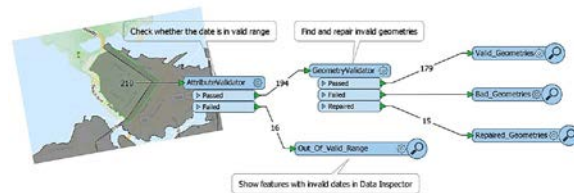


Figure 9: FME's graphical user interface for data validation and transfer (FME 2017).

1. Minecraft → Mineways → 3ds Max → AutoCAD → AnTherm
2. Minecraft → Mineways → Rhino → AnTherm
3. Minecraft → FME → AnTherm

Figure 10: Data transfer paths between Minecraft and AnTherm.

CASE STUDIES OF DATA TRANSFER

After principle experiments regarding the data transfer between the Minecraft game engine and the AnTherm simulation environment, the two case study construction details were subjected to the described transfer routines. As the geometry transfer via the CAD files can be considered as routine work for easy details

(involving the correct identification of settings in geometry handling), the data transfer via FME is described for the first case study. For the detailed description of all data transfer processes see Kalaydzhieva (2017).

Figure 11 illustrates the graphical algorithm for data transfer in the FME desktop, Figure 12 the imported and already converted IFC file, and Figure 13 the file after import into AnTherm.

For the second case study, data transfer via Rhino is described. Figure 14 shows the second case study after import to Rhino. Figure 15 illustrates the application of the Mesh2Nurbs functionality of Rhino, which results in a polyline model (that is ready for export to AnTherm, Figure 16). Figure 17 illustrates the simulation outcome of AnTherm (after importing and conducting the simulation).

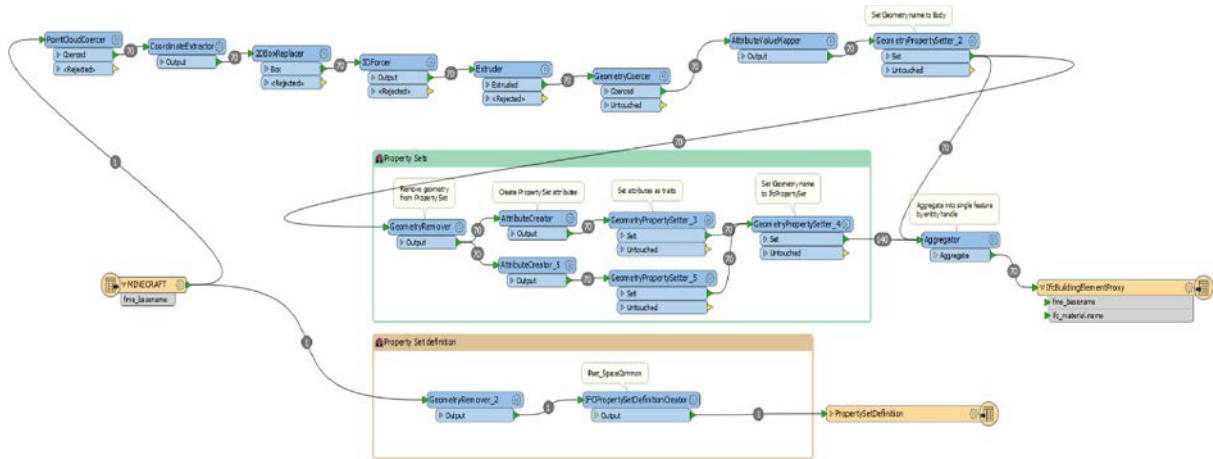


Figure 11: Graphical algorithm for the data transfer of the first case study building construction in the FME environment.

minecraft_generator_name	x	y	minecraft_generator_options	ifc_property_set_name	blockData	x	part_number	Category	Number	material_name	blockID
1 flat	8	-12	3minecraftair127/decoration	Pset_BuildingElementProx...	2	0	52	0	52	Birch Wood	5
2 flat	7	-13	3minecraftair127/decoration	Pset_BuildingElementProx...	4	-2	10	0	10	Wood	17
3 flat	6	-15	3minecraftair127/decoration	Pset_BuildingElementProx...	0	1	43	0	43	Stone	1
4 flat	6	-15	3minecraftair127/decoration	Pset_BuildingElementProx...	0	0	42	0	42	Stone	1
5 flat	8	-15	3minecraftair127/decoration	Pset_BuildingElementProx...	0	-1	19	0	19	Stone	1
6 flat	7	-14	3minecraftair127/decoration	Pset_BuildingElementProx...	0	1	26	0	26	Stone	1

Figure 12: The first case study building construction after translation to an IFC-file in the FME inspector software.

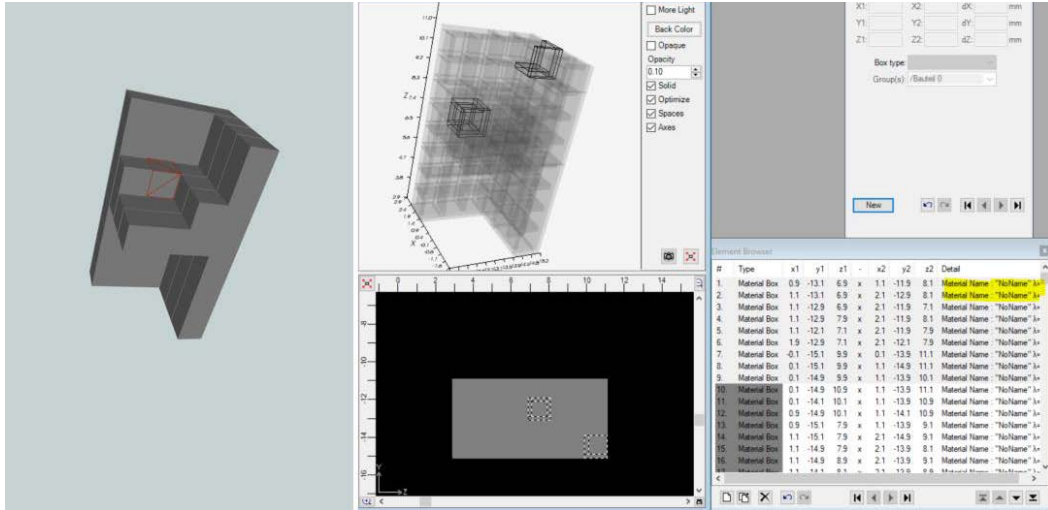


Figure 13: The first case study building construction after import as IFC file in AnTherm.

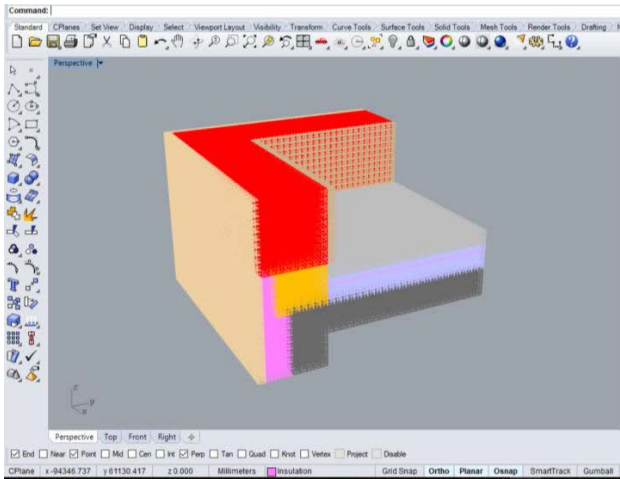


Figure 14: The second study case imported in Rhino as a mesh geometry

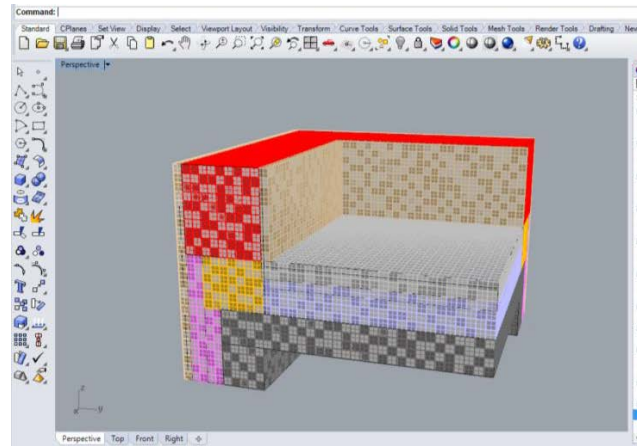


Figure 15: MeshtoNURBS command, adjusting the layer order of the second study case and extracting polylines

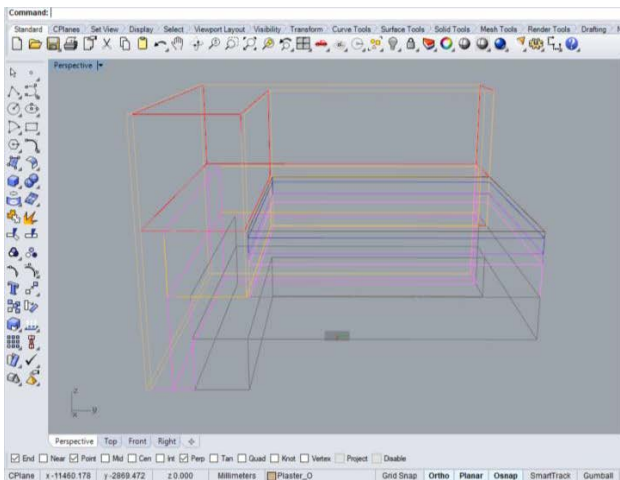


Figure 16: The polylines of the second study case ordered by layer

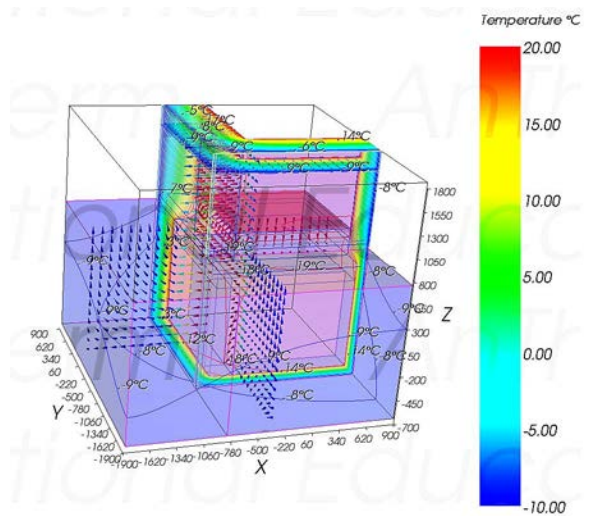


Figure 17: Graphical simulation result of the second case study (AnTherm graphical output)

CONCLUSION AND FUTURE RESEARCH

The present contribution sheds light on the possibilities of using Minecraft as geometry generator for numeric thermal simulation engines. Three different data transfer paths were explored. Results suggest that the geometry generation in Minecraft might be simple, but the data transfer to other applications can be rather cumbersome. Minecraft per se is not able to write data formats that can be processed by other applications. Either the Mineways exporter or tools such as FME or Altova (Altova 2017) are required to allow data export of formats other than the proprietary Minecraft format.

Moreover, a tiring data transfer process has to be conducted, if the data transfer is performed via 3D and CAD environments. As such, Minecraft in its current form might act as a form finding support tool or visualisation platform for ideas, but its application as source for building simulation models is rather inconvenient. Furthermore, it is not clear if the current state of transfer would attract user groups such as architects or people in educational settings.

In this context, a number of major drawbacks need to be mentioned: On the one hand, there is no possibility to attach semantic information to the Minecraft model, except for defining material blocks. Such blocks can be understood – in other software environments – be understood as a certain material. However, semantic properties such as conductivity or vapour diffusion resistance need to be set manually in post processing steps. In contrast, most full-fledge Building Information Modelling tools, such as Revit (2017) possess the possibility to set material properties to models (even if data export does not fully work in most cases). Another drawback is the inflexibility of Minecraft regarding the block format. This might have to do with the frequently discussed contrast between vector and pixel/voxel based representations of geometry. Hence, it is difficult to imagine applying the presented routines in the everyday work practice of architects or building simulation domain specialists. The originally envisioned fast dynamic evaluation feedback could not be yet realized.

Note that the above listed shortcomings do not necessarily suggest that gamification approaches have no potential in the building simulation domain. However, the current state of the respective data transfer routines cannot be considered as competitive as compared to BIM-tools or even the generation of models directly in the simulation application (i.e., AnTherm, in this case). Consequently, extensive additional work on data transfer routines is needed. Such work should also explore the potential of the extended mark-up-language concept (XML), as realized in many software applications, as well as coupling via BIM-compliant environments.

REFERENCES

- 3Ds Max. 2017. <https://www.autodesk.com/products/3ds-max/overview> last accessed: 03/2018
- Altova. 2017. Altova XML comparison platform <https://www.altova.com> last accessed: 03/2018
- AnTherm. 2017. Numeric thermal bridge simulation engine. www.antherm.eu last accessed: 03/2018
- Attia S., Hensen J.L.M., Beltrán L., De Herde A. 2010. Selection criteria for building performance simulation tools: contrasting architects' and engineers' needs. *Journal of Building Performance Simulation* 5, no. 3 (January 31, 2010): 155-69. doi:10.1080/19401493.2010.549573.
- AutoCad. 2017. www.autodesk.com last accessed: 03/2018
- Bucevac M. 2016. Generation and Application of a BIM-based repository of highly insulated building construction details; Betreuer/in(nen): A. Mahdavi, U. Pont; Institut für Architekturwissenschaften, Abteilung Bauphysik und Bauökologie, 2016; Defended on 20.10.2016.
- Detering S., Khaled R., Nacke L. E., Dixon D. 2011. Gamification: Toward a Definition. CHI 2011, May 7–12, 2011, Vancouver, BC, Canada. ACM 978-1-4503-0268-5/11/05.
- FME 2017. FME Desktop. "Mojang Minecraft Reader/Writer." last accessed: 03/2018 https://docs.safe.com/fme/html/FME_Desktop_Documentation/FME_ReadersWriters/minecraft/minecraft.htm#.

- Heindl W., Krec K., Panzhauser E., Sigmund A. 1987. Wärmebrücken: Grundlagen - Einfache Formeln - Wärmeverluste - Kondensation - 100 durchgerechnete Beispiele; Springer; ISBN 978-3211820247
- Ibrahim R., Rahimian F.P. 2010. Comparison of CAD and manual sketching tools for teaching architectural design. *Automation in Construction* 19, no. 8 (2010): 978-87. doi:10.1016/j.autcon.2010.09.003.
- ISO 2017a. Thermal bridges in building construction — Heat flows and surface temperatures — Detailed calculations (ISO 10211:2017)
- ISO 2017b. Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 2: Numerical method for frames (ISO 10077-2:2017); German version EN ISO 10077-2:2017
- ISO 2017c. Thermal performance of buildings — Dynamic thermal characteristics — Calculation methods (ISO 13786:2017)
- Kalaydzieva, V.A. 2017. Requirements for an Interactive and Educational Construction Generation and Evaluation Tool. Master-thesis at the TU Wien, Supervisors: A. Mahdavi, U. Pont. Defended on 21.11.2017.
- Kornicki T., Nackler J. N., Kreč K. 2012. The implementation of a periodic thermal conduction model in a 4D simulation program, Tagungs- band Energodom 2012, Krakau
- Kornicki T., Volko C., Kornicki M., Pont U. 2016. Numeric thermal bridges simulation: Approaching optimized usability for sloped and rounded shapes.; *Applied Mechanics and Materials, Special Volume: Energy Saving and Environmentally Friendly Technologies - Concepts of Sustainable Building* (2016), 824; S. 527 - 535.
- Minecraft. 2017. <https://minecraft.net/> last accessed: 03/2018
- Mineways. 2017. <http://www.realtimerendering.com/erich/minecraft/public/mineways/>. last accessed: 03/2018
- Pont U., Swoboda S., Waldmayer F. 2016a. COGENT - Construction Generation & Assessment Tool - Forschungsantrag für die Excite-Initiative. Research Initiative of the Faculty of Architektur & Planning, TU Wien. 2016.
- Pont U., Proskurnina O., Kornicki M., Volko, C. Kornicki T. 2016b. Recent Developments in Application of Simplifications for Numeric Thermal Bridging Evaluation: A work Report; in: "(Printed) Proceedings of CESB 2016: Central Europe towards sustainable building 2016 - innovations for sustainable future", Book of (extended) abstracts; P. Hájek, J. Tywoniak, A. Lupisek (Hrg.); herausgegeben von: CESB2016; Prague, Czech Republic, ISBN: 9788027102488 S. 89 - 90.
- Rhino. 2017. <https://www.rhino3d.com/> last accessed: 03/2018
- UNIPOR. 2017 "Wärmebrücken katalog." <http://www.unipor.de/waermebrueckenkatalog> and last accessed: 03/2018
- Volko C., Kornicki M., Pont U., Mahdavi A. 2017. Numeric Thermal Bridge Simulation and Building Information Modelling: A Structured Coupling Approach; in *Proceedings of the 12th international enviBUILD conference 2017 - Buildings and Environments - From Research to Application*, U. Pont, M. Schuss, A. Mahdavi (ed.); Department of Building Physics and Building Ecology, TU Wien, (2017).
- Yan W., Culp C., Graf, R. 2011. Integrating BIM and gaming for real-time architectural visualization. *Automation in Construction* 20, no.4 (2011): 446-458. DOP: 10.1016/j.autcon.2010.11.013

TEILAUTOMATISIERTE GENERIERUNG VON HYDRAULISCH ABGEGLICHTEN HEIZUNGSNETZEN FÜR HEIZKÖRPER UND FUSSBODENHEIZUNGEN IM BEREICH GEBÄUDEENERGETISCHER SIMULATIONEN MIT MODELICA

P. Mehrfeld¹, J. Steinbüchel¹, M. Lauster¹ und D. Müller¹

¹ RWTH Aachen, E.ON Energieforschungszentrum, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimattechnik, Aachen, Germany
pmehrfeld@eonerc.rwth-aachen.de

KURZFASSUNG

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Werkzeug mit graphischer Oberfläche in Python entwickelt, um den zeitintensiven und fehleranfälligen Modellierungsprozess von hydraulischen Heizungsrohrnetzen zu verbessern. In dem Werkzeug werden anhand weniger Eingangsparameter alle notwendigen Verrohrungen, Druckverluste, Wärmeübergabe- und Ventileigenschaften berechnet und in Form einer Modelica-Bibliothek ausgegeben.

Simulationen eines Einfamilienhauses verifizieren ein erstelltes Heizkörper- und ein Fußbodenheizungssystem im Auslegungsfall. Obwohl die absoluten Differenzen zu Auslegungswerten hinsichtlich Rücklauftemperaturen und Massenströmen verhältnismäßig klein ausfallen, wird durch den automatischen hydraulischen Abgleich eine Verringerung der Diskrepanz zu den Auslegungswerten um ca. eine Zehnerpotenz erzielt. Zudem werden angegliche Aufheizzeiten der Räume nachgewiesen.

ABSTRACT

In the scope of this work, we created a Python based software tool with graphical user interface. The tool improves the time-consuming and error-prone modelling process for generating hydronic networks. On the basis of few input parameters, the tool exports a ready-to-run Modelica model library.

Simulations of a one family house verify the functionality for a radiator and an underfloor heating system. Although the absolute values for the discrepancy regarding the nominal return temperatures and mass flow rates are already satisfyingly

small, the use case shows that automatic hydronic balance minimizes the gaps to the nominal conditions by approximately one power of ten. Furthermore, the paper shows resulting curves of room temperatures during the initial heat up phase that are closer together.

EINLEITUNG

Gebäudeenergetische Simulationen stellen ein standardisiertes Werkzeug zur Auslegung und Betriebsanalyse von Anlagen zur Energieversorgung von Gebäuden dar. Als Teil einer Vielzahl von diesbezüglicher Software ist Modelica (Modelica Association, 2018) als quelloffene, objektorientierte und akausale Modellierungssprache eine Option für gebäudeenergetische Simulationen. Anknüpfend an das *IEA Annex 60* (Wetter & Treeck, 2017b), welches als *IBPSA Project 1* (Wetter & Treeck, 2017a) fortgeführt wird, und der damit verbunden frei-verfügbaren Bibliothek *AixLib* (EBC, 2018; Müller et al., 2016) behandelt dieses Paper eine pythonbasierte Software mit grafischer Benutzeroberfläche zur teilautomatisierten Generierung von Heizungsrohrnetzen für Heizkörper- und Fußbodenheizungssysteme. Diese Software, der sogenannte *Modelica Network Generator (MoNetGen)* (Steinbüchel, Dezember 2017), stellt insbesondere mit Hinblick auf die Fehleranfälligkeit sowie den sonst hohen Modellierungsaufwand solcher komplexen Systeme eine gewinnbringende Weiterentwicklung dar. Fehler treten vor allem beim Parametrieren der Vielzahl Komponenten (Rohre, Bögen, Verzweigungen, etc.) eines hydraulischen Netzwerks auf. Ein öffentlich und kostenlos verfügbarer Zugang zur Software ist geplant. Ein bisher fehlendes Werkzeug zur Generierung hydraulischer Netzwerke, basierend auf *AixLib*-Modellen, erhöht die Weite der *IPBSA-Bibliotheken*.

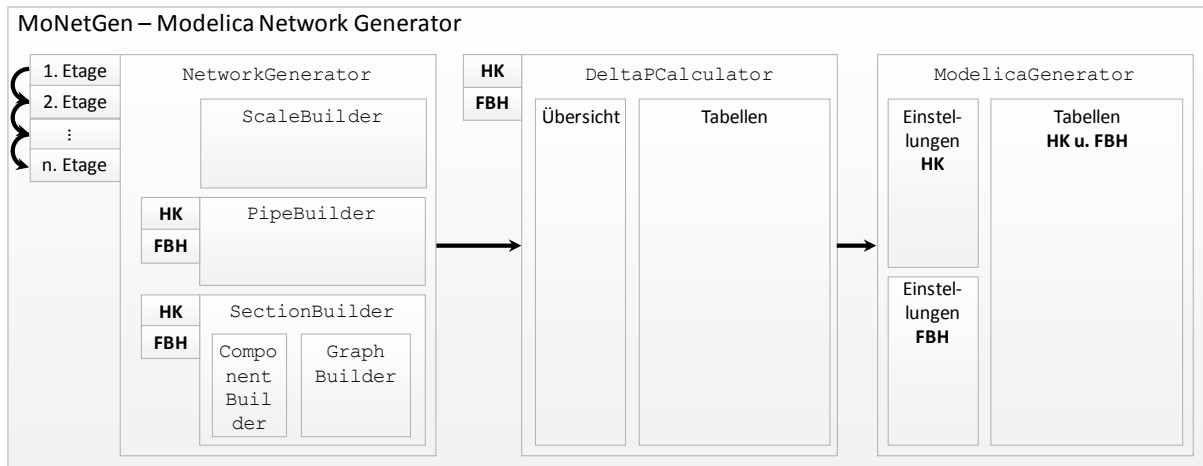


Abbildung 1: Struktur der Software MoNetGen (Pfeile visualisieren den Programmablauf)

Anforderung an die Software *MoNetGen* ist es, mithilfe weniger Eingabeparameter graphisch ein hydraulisches Netzwerk in Etagengrundrisse zu zeichnen und anschließend eine Modelica-Bibliothek zu exportieren, bestehend aus einem hydraulisch abgeglichenem Verteilnetz sowie ausgelegten Komponenten zur Wärmeübergabe in den Raum. Eingabewerte werden nicht in einem kompletten Satz zentral nach Aufruf der Software verlangt, sondern in den entsprechenden Modulen, ab denen sie relevant sind. Dadurch wird der Nutzer verständlicher durch das Programm geführt.

SOFTWAREAUFBAU MONETGEN

Die Struktur von *MoNetGen* gibt Abbildung 1 wieder. Die folgenden Unterkapitel sind in die Programmabfolge gegliedert (durch Pfeile in Abbildung 1 gekennzeichnet) und werden so in der Software seriell durchlaufen. Jedoch kann jederzeit zwischen den entsprechenden Bereichen gesprungen und an den gewünschten Stellen Änderungen vorgenommen werden. Der Nutzer hat jederzeit die Möglichkeit, das Projekt zu speichern oder zu laden.

Aus Abbildung 1 wird ersichtlich, dass an vorgesehenen Stellen zwischen den einzelnen Stockwerken sowie den Systemen für Heizkörper (HK) und Fußbodenheizung (FBH) unterschieden wird. In jedem Gebäudestockwerk können HK- und FBH-Systeme koexistierend erstellt werden. *MoNetGen* fußt im Grundsatz auf den Inputs für den Auslegungsfall:

- Raumaufgelöste Heizlasten $\dot{Q}_{\text{nom,R}}$

- Temperaturtripel: Vorlauf-, Rücklauf- und Raumlufttemperatur $(T_{\text{VL}} | T_{\text{RL}} | T_{\text{R}})_{\text{nom}}$
- Herstellerdaten bzw. Datensätze (ein repräsentativer Satz wird bereits mit der Software mitgeliefert)

NetworkGenerator

Beginnend auf der linken Seite von Abbildung 1 startet *MoNetGen* mit dem *NetworkGenerator*, welcher sich in die drei Abschnitte *Scale*-, *Pipe*- und *SectionBuilder* unterteilt. Der Prozess der Netzwerkerstellung in diesem Teil der Software wiederholt sich für jede Etage des Gebäudes.

ScaleBuilder

Im *ScaleBuilder*-Tab wird als Initialschritt der Geschossplan der gewünschten Etage in Form einer Bilddatei eingeladen. Alternativ kann ein leeres Gitternetz als Zeichengrundlage genutzt werden. Zusätzlich wird nun der Maßstab festgelegt.

PipeBuilder

Im sich daran anschließenden *PipeBuilder*, wovon Abbildung 2 eine Übersicht wiedergibt, wird das HK- und/oder FBH-Netzwerk eingezeichnet. Mit Mausklicks werden Einspeisepunkt, Biegungen, Verzweigungen sowie HK oder FBH-Flächen erstellt. Beide Netzwerktypen basieren auf Zweirohrsystemen mit gleich angeordnetem Vor- und Rücklauf und setzen sich als Knoten- und Kantenmodell zusammen. Während das HK-Netzwerk als Netztopologie vom Typ Baum beschrieben wird, stellt das FBH-Netzwerk den Typ

Stern mit zusammenlaufenden Strängen im Heizkreisverteiler dar. Der Startpunkt beider Netzwerke stellt jeweils die Verknüpfung zu vorangehenden Stockwerken bzw. zur Energiewandlungsanlage dar und kann im sich anschließenden SectionBuilder parametrierbar werden.

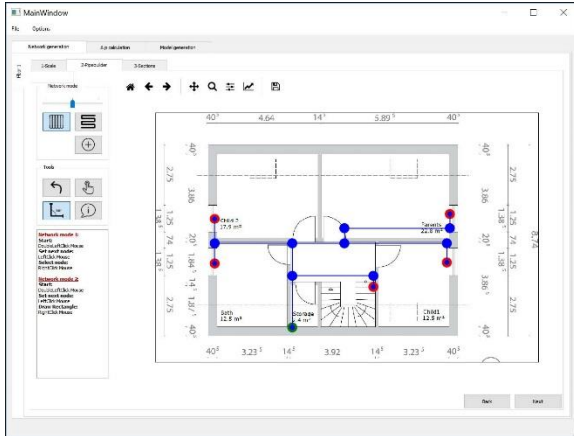


Abbildung 2: Übersicht des PipeBuilders

Die Enden eines Stranges im FBH-Netzwerk sind aufgespannte Flächen, aus denen sich mithilfe des zuvor festgelegten Maßstabs automatisch die wärmeübertragenden Flächen A ergeben.

SectionBuilder

Der SectionBuilder spaltet sich auf in den rein zur Netzwerk-Visualisierung vorhandenen GraphBuilder (s. Abbildung 3 rechts) und den für die Parametrierung wichtigen ComponentsBuilder (s. Abbildung 3 links).

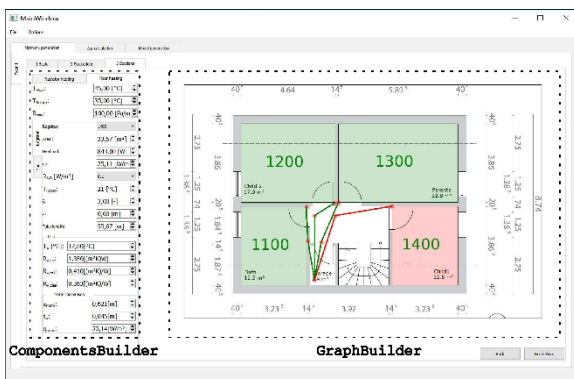


Abbildung 3: Übersicht des SectionBuilders

Mögliche Komponentenklassen sind Rohre, Einbauwiderstände, Heizkörper, Register (FBH) und Geschossanschlüsse.

Die ausgewählte Komponente bzw. Sektion wird im nebenstehenden GraphBuilder farblich markiert. MoNetGen identifiziert die Art eines Knotens und unterscheidet zwischen Bogen sowie verschiedenen Typen von Verzweigungen und berechnet jeweils in Abhängigkeit des Winkels einen Widerstandsbeiwert ζ (Idel'čik et al., 2008; Recknagel & Sprenger, 2006). Abschließend werden alle Komponenten zu der minimalen Anzahl an möglichen Sektionen zusammengefasst. Das bedeutet Rohre und Einbauten, die in Reihe liegen und den gleichen Massenstrom besitzen, werden aufsummiert.

DeltaPCalculator

Nachdem sämtliche Rohrnetze aller Etagen erstellt worden sind, erfolgt die automatische Rohrdimensionierung und gesamte Druckverlustberechnung. Zu diesem Zweck nutzt der DeltaPCalculator als Auslegungskriterium den vom Nutzer vorgegebenen längenbezogenen Druckverlust R , dessen Standardwert bei $R = 100 \text{ Pa/m}$ liegt.

Der Druckverlust einer Sektion (Index „Sek“) ergibt sich als Addition von Druckverlust durch Rohrreibung und Einbauten nach Gleichung (1) (Glück, 1988).

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{Sek}} &= \sum \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{\text{Sek}}^2 + \frac{f \cdot \rho}{2D} \cdot v_{\text{Sek}}^2 \cdot l_{\text{Sek}} \\ &= \sum Z + R \cdot l_{\text{Sek}} \end{aligned} \quad (1)$$

Hierbei sind ρ die Dichte des Heizungsmediums (Wasser), v_{Sek} die Geschwindigkeit in der Sektion, l_{Sek} die Länge der Sektion und D der hydraulische Durchmesser des Rohres.

Daten für den Druckverlust in Abhängigkeit der Rohrparameter für Kupfer (HK) und Polyethylen (FBH) liegen der Software exemplarisch bei. Falls jedoch keine passenden Rohrdatenblätter vorhanden sind, wird Gleichung (1) mithilfe des Darcy-Weisbach-Reibungsfaktors f berechnet. Der Faktor unterteilt sich nach der Reynolds-Zahl (Re) in die Bereiche laminar ($Re < 2320$), transient ($2320 < Re < 4000$) und turbulent ($Re > 4000$). Zwischen der Nutzung von Herstellerdaten und der aufwändigeren Berechnung des Reibungsfaktors ergeben sich lediglich marginale Unterschiede für den sich einstellenden Massenstrom (Steinbüchel, Dezember 2017).

Der `DeltaPCalculator` erzeugt zur Übersicht eine Tabelle. Hier können Rohrdurchmesser manuell angepasst werden, was für eine Druckverlustneuberechnung sorgt. Der Netzschlechtpunkt kann ebenfalls ausgelesen werden.

ModelicaGenerator

Im letzten Tab – dem `ModelicaGenerator` – werden letzte Informationen, die die Modellerstellung finalisieren, eingegeben. In diesem letzten Schritt kann die Ventilautorität (R. Koenigsdorff et al., 2010) sowohl global für alle Ventile gesetzt als auch individuell überschrieben werden. Des Weiteren wird beim Modell-Export, falls gewünscht, der hydraulische Abgleich durchgeführt.

Die erzeugten Modelica-Modelle untergliedern sich in die etagenweise Verteilung (s. Abbildung 4) und das Übergabesystem, bestehend aus Vorlauftemperatursensor, Ventil, Heizkörper/FBH-Modell und Rücklauftemperatursensor (s. Abbildung 5). Das Verteilnetz erhält beim Modell-Export die Option, den Geschossplan als Bild im Modell zu hinterlegen, um auch in der Modellansicht den Wiedererkennungswert des Netzes zu erhöhen. Das Modell des Übergabesystems beinhaltet die oben aufgelisteten Modelle in vektorieller Form, sodass eine einfache Parametrierung und Verknüpfung möglich ist. Als Input-Konnektoren liegen Fluid-Ports zum Anschluss von Vor- und Rücklauf, Signaleingänge für den Öffnungsgrad der Ventile sowie kombinierte Wärmestrom-Ports für den radiativen und konvektiven Wärmestrom der HK bzw. FBH an die Räume vor. Von außen kann eine beliebige Regelung für die Ventile angeschlossen werden, wie z. B. ein konventioneller Thermostatkopf.

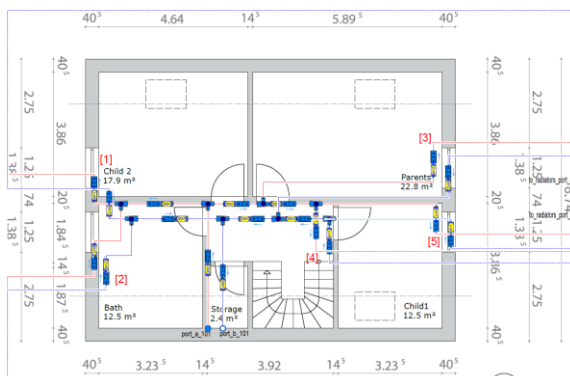


Abbildung 4: Modelica-Ansicht des generierten Verteilnetz-Modells

Da sich aufgrund des vektoriiellen Modellansatzes die Raumzuordnung erschwert, können bereits im `ModelicaGenerator` Bezeichnungen für die einzelnen Räume hinzugefügt werden. Diese erscheinen im exportierten Modelica-Modell in der Diagramm-Ansicht (s. Abbildung 5).

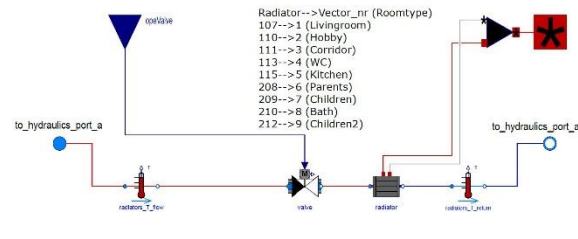


Abbildung 5: Modelica-Ansicht des generierten Übergabe-Modells in vektorieller Form

BERECHNUNGSANSÄTZE

Aufgeteilt nach HK und FBH folgt die Beschreibung der Berechnung der Wärmeübergabesysteme im nominellen Auslegungspunkt. Hierzu werden primär die raum aufgelösten Heizlasten sowie die nominellen Temperaturen für Vorlauf, Rücklauf und Raumluft benötigt. Basierend auf diesen essentiellen Charakteristiken berechnet das Werkzeug die nominellen Massenströme für den jeweiligen Strang bzw. Heizkreis.

Heizkörper

Für die Modellerstellung ist zum einen der mit der HK-Fläche multiplizierte Wärmeübertragungskoeffizient kA_{HK} notwendig. Dieser ergibt sich im Auslegungsfall zu:

$$kA_{HK} = \frac{\dot{Q}_{nom, HK}}{\Delta T_{ar.M.,R}} \quad (2)$$

Mit der arithmetisch gemittelten Temperaturdifferenz:

$$\Delta T_{ar.M.,R} = \frac{T_{VL} + T_{RL}}{2} - T_R \quad (3)$$

Der Auslegungsmassenstrom \dot{m}_{nom} errechnet sich über die Energiebilanz zwischen Vor- und Rücklauf:

$$\dot{m}_{nom, HK} = \frac{\dot{Q}_{nom, HK}}{c_p \cdot (T_{VL} - T_{RL})} \quad (4)$$

c_p steht für die spezifische Wärmekapazität vom Heizungsmedium (Wasser).

Fußbodenheizung

Die Berechnung und Auslegung der FBH erfolgt nach DIN EN 1264 (DIN EN 1264-2:2013-03; DIN EN 1264-3:2009-11) (Rohre innerhalb Estrich Typ A und C). Hierbei berechnet sich der im nominellen Fall von der FBH nach oben an den Raum abzugebende flächenspezifische Auslegungswärmestrom $\dot{q}_{\text{nom},R}$ zu:

$$\begin{aligned}\dot{q}_{\text{nom},R} &= \frac{\dot{Q}_{\text{nom},\text{FBH}}}{A} \\ &= B \cdot a_B \cdot a_T^{m_T} \cdot a_U^{m_U} \cdot a_D^{m_D} \cdot \Delta T_{\text{In},R} \\ &= K_H \cdot \Delta T_{\text{In},R}\end{aligned}\quad (5)$$

Mithilfe der logarithmischen Temperaturdifferenz zum Raum

$$\Delta T_{\text{In},R} = \frac{T_{\text{VL}} - T_{\text{RL}}}{\ln\left(\frac{T_{\text{VL}} - T_{\text{R}}}{T_{\text{RL}} - T_{\text{R}}}\right)}\quad (6)$$

und dem darin enthaltenen einzugebenden Auslegungstemperaturtripel $(T_{\text{VL}}, T_{\text{RL}}, T_{\text{R}})$ berechnet sich der äquivalente Wärmedurchgangskoeffizient K_H . In der Regel liegt K_H als tabellierter Wert aus Herstellerdaten (Eingabedaten) in Abhängigkeit der Rohrteilung T und des Wärmeleitwiderstands des Fußbodenbelags $R_{\lambda,B}$ vor. Somit beinhaltet der äquivalente Wärmedurchgangskoeffizient K_H Abhängigkeiten sowohl von der Systemcharakteristik als auch vom Fußbodenaufbau. $R_{\lambda,B}$ ist der Wärmeleitwiderstand oberhalb der FBH-Rohre ohne Wärmeleitwiderstand des Estrichs und Konvektionskoeffizient an der Fußbodenoberfläche. Der Wert für $R_{\lambda,B}$, z. B. Parkett oder Fliesen, wird vom Nutzer eingegeben. Die Software *MoNetGen* interpoliert aus den nun bekannten Größen K_H und $R_{\lambda,B}$ die notwendige Teilung T . Die substituierten Koeffizienten aus Gleichung (5) sind in (DIN EN 1264-2:2013-03, S. 8) erläutert.

Bei der Berechnung des Auslegungsmassenstroms $\dot{m}_{\text{nom},\text{FBH}}$ durch den entsprechenden FBH-Kreis ist darauf zu achten, dass neben dem Wärmestrom nach oben (Index „o“) ein zusätzlicher Wärmestrom nach unten (Index „u“) \dot{Q}_u auftritt. Dieser ist im Fall der untersten Etage ein reiner Verlustwärmestrom an das Erdreich, wohingegen er abgegeben an unterliegende Räume einen Gewinn darstellt, der jedoch bei der Auslegung nach Gleichung (5) noch nicht beachtet

wird. Für den von der FBH insgesamt abgegebenen flächenspezifischen Wärmestrom $\dot{q}_{\text{ges},\text{FBH}}$ bzw. den Massenstrom $\dot{m}_{\text{nom},\text{FBH}}$ gilt für gleiche wärmeübertragende Fläche A nach oben und unten folgender Zusammenhang im nominellen Punkt beginnend mit Gleichung (7) (DIN EN 1264-3:2009-11, S. 8).

$$\begin{aligned}\dot{q}_{\text{ges},\text{FBH}} &= \frac{\dot{m}_{\text{nom},\text{FBH}} \cdot c_p \cdot (T_{\text{VL}} - T_{\text{RL}})}{A} \\ &= \dot{q}_R + \frac{\dot{q}_R \cdot R_o}{R_u} + \frac{T_R - T_u}{R_u}\end{aligned}\quad (7)$$

Mit R_o als gesamter Wärmedurchgangswiderstand oberhalb und R_u als gesamter Wärmedurchgangswiderstand oberhalb der FBH-Verrohrung (DIN EN 1264-2:2013-03). Mithilfe der Substitution von $\dot{q}_R = \frac{\Delta T_{\text{ar},\text{M},R}}{R_o}$ und der Temperaturdifferenz

$$T_R - T_u = \Delta T_{\text{ar},\text{M},u} - \Delta T_{\text{ar},\text{M},R}\quad (8)$$

in Gl. (7) ergibt sich die allgemeine Energiebilanz:

$$\dot{q}_{\text{ges},\text{FBH}} = \dot{q}_R + \dot{q}_u\quad (9)$$

Während \dot{q}_R und T_R für die Merkmale zum Raum oberhalb darstellen, sind \dot{q}_u und T_u der flächenspezifische Wärmestrom in den Raum nach unten und die Raumtemperatur unterhalb der FBH.

SIMULATIONEN UND ERGEBNISSE

Neben der um ein Vielfaches verkürzten Dauer zur Modellerstellung und dem Vermeiden von Fehlern im Modell werden im Folgenden Simulationen zur Analyse der Genauigkeit vorgestellt. Zu diesem Zweck wird der Anwendungsfall eines Einfamilienhauses (EFH) mit neun beheizten Räumen untersucht. Das EFH lehnt sich an ein Beispielgebäude nach (Volland & Volland, 2006) an und befindet sich ebenfalls in der *AixLib* (EBC, 2018). Vorab wurde mithilfe einer Testsimulation mit idealem Heizer die raum aufgelöste Heizlast des Gebäudes ermittelt. Diese Heizlasten sowie die vorliegenden Geschosspläne stellen die wichtigsten Eingaben für das Programm *MoNetGen* dar.

Als zu vergleichende Größen werden die Rücklauftemperatur, der Massenstrom sowie die Aufheizphase für die Fälle HK und FBH von hydraul-

liche abgeglichenen sowie ungeglichenen Netzwerken ihren nominellen Auslegungswerten gegenübergestellt. Da in dem Testszenario der Auslegungsfall im sich einstellenden stationären Betrieb wiedergegeben werden soll, sind die Ventile vollständig geöffnet und bleiben unregelt.

Rücklauftemperaturen

Das HK-System ist in Anlehnung an (DIN EN 442-1:2015-03) auf das Tripel (75|65|20) °C ausgelegt.

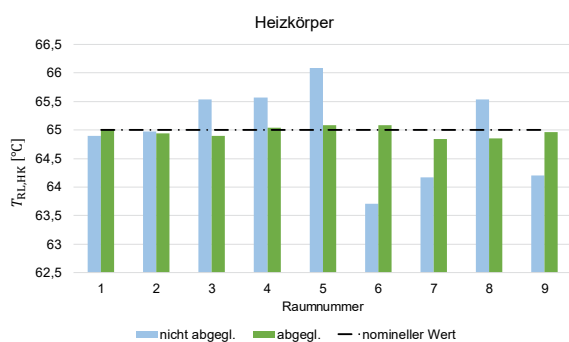


Abbildung 6: Rücklauftemperaturen im HK-Netzwerk für den stationären Fall

Die Diagramme in Abbildung 6 und Abbildung 7 stellen die sich im stationären Fall einstellenden Rücklauftemperaturen T_{RL} für das HK- bzw. FBH-System dar und vergleichen ein abgeglichenes mit einem nicht abgeglichenen System. Der Mean Absolute Error (MAE) über die neun Räume beträgt im Fall des HK-Netzwerks 0,64 K für den nicht abgeglichenen Fall und 0,08 K für den abgeglichenen Fall. Auch wenn der MAE im nicht abgeglichenen Fall bereits niedrig ausfällt, verbessert sich der MAE jedoch um das 7,8-Fache.

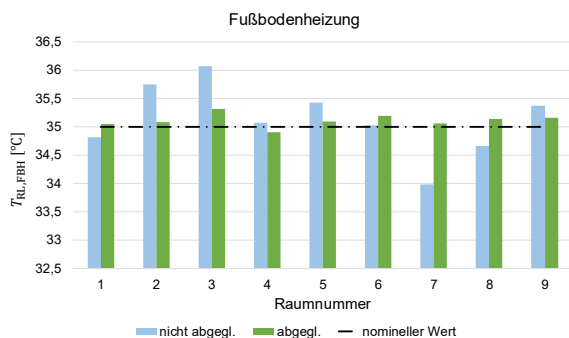


Abbildung 7: Rücklauftemperaturen im FBH-Netzwerk für den stationären Fall

Im Falle der FBH beträgt der MAE für die neun Räume 0,47 K im System ohne hydraulischen Abgleich und 0,13 K im Fall ohne Abgleich. Dies resultiert in einem Verhältnis von 3,6.

Massenströme

Analog zur Analyse der Rücklauftemperaturen sind die sich einstellenden Massenströme je Strang und deren Abweichung zum jeweiligen nominellen Wert von Interesse. Abbildung 8 zeigt die Werte des EFH mit HK-Netzwerk, während Abbildung 9 die Ergebnisse des FBH-Netzwerks darstellt.

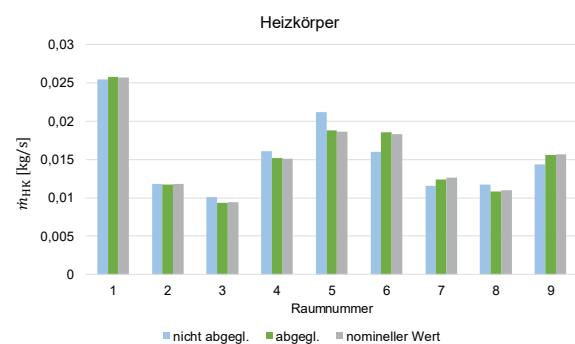


Abbildung 8: Massenströme im HK-Netzwerk für den stationären Fall

Anstelle des MAE wird bei den Massenströmen der Mean Absolute Percentage Error (MAPE) herangezogen, da jeder Strang einen unterschiedlichen nominellen Massenstrom aufweist im Gegensatz zur gleichbleibenden Rücklauftemperatur.

Der $MAPE(\dot{m}_{HK,n.abgegl.})$ beträgt 7,17 % im abgeglichenen Fall, wohingegen das System ohne hydraulischen Abgleich in einem $MAPE(\dot{m}_{HK,abgegl.}) = 0,92 \%$ resultiert.

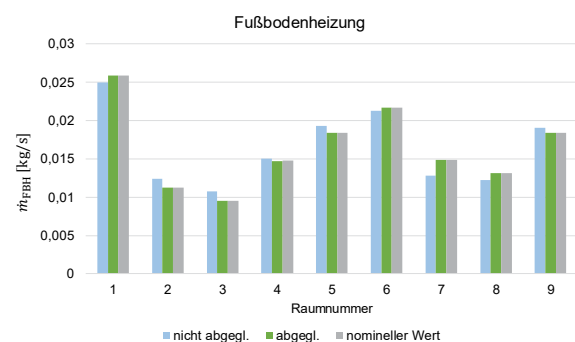


Abbildung 9: Massenströme im FBH-Netzwerk für den stationären Fall

Die Zusammenfassung für das FBH-Netzwerk ergibt einen $\text{MAPE}(\dot{m}_{\text{FBH},n,\text{abgeggl.}}) = 6,47\%$ sowie $\text{MAPE}(\dot{m}_{\text{FBH},\text{abgeggl.}}) = 0,09\%$.

Während die Druckverlustberechnung in den Rohrmodellen der *Modelica-Standard-Bibliothek* (Modelica Association, 2018) komplexer ausfällt, wird für den Druckverlustabfall über einen FBH-Kreis in dem zugehörigen Modelica-Modell ein quadratischer Term angesetzt. Daher kommt es, wie die Ergebnisse zeigen, bei der FBH zu geringeren Abweichungen zum theoretisch errechneten Wert für den nominellen Massenstrom.

Aufheizphasen

Der hydraulische Abgleich soll insbesondere die Über- bzw. Unterversorgung von Räumen verhindern und eine zeitlich gleichmäßige Wärmeverteilung gewährleisten. Aus diesem Grund zeigt Abbildung 10 die Aufheizphasen aller Raumtemperaturen. Die Simulation initialisiert den Raum mit 17 °C , während das System bei voll geöffneten Ventilen auf eine Temperatur von 20 °C ausgelegt ist. In Abbildung 10 sind die Raumtemperaturen des Erdgeschosses in Blautönen (T1 – T5) und die des Obergeschosses in Grüntönen (T6 – T9) visualisiert.

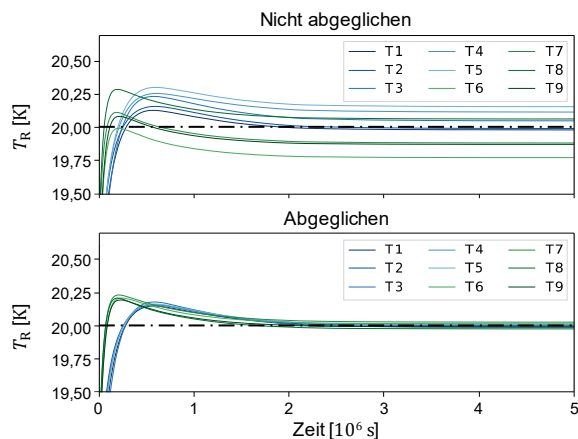


Abbildung 10: Aufheizphasen der Räume nach Simulation-initialisierung

Auch wenn – ähnlich zu den Beobachtungen bei den Rücklauftemperaturen – die absoluten Unterschiede marginal sind, entsteht durch den hydraulischen Abgleich eine gleichmäßigere Aufheizung der Räume. Das betrifft sowohl die instationäre Phase zu Beginn der Simulation, als auch den späteren stationären Bereich.

Aufgrund der Nähe zum kalten Erdboden und der Kapazität der Bodenplatte bilden sich insbesondere für den abgeglichenen Fall zwei Kurven aus. Die Temperaturen im Erdgeschoss (T1 – T5) benötigen eine längere Zeit, um die Solltemperatur von 20 °C zu schneiden.

Abschließend lassen sich die Ergebnisse der Vergleichssimulationen so bewerten, dass im Allgemeinen verhältnismäßig kleine absolute Unterschiede zwischen hydraulisch abgeglichenem und nicht abgeglichenem Verteilnetzwerk festzustellen sind. Jedoch ist zu erkennen, dass sich die verglichenen Größen um ca. eine Zehnerpotenz den Auslegungswerten annähern und die relativen Kennzahlen nicht zu vernachlässigende Werte annehmen. Zudem zeigt Abbildung 10 eine gleichmäßigere Aufheizung der Räume aufgrund des hydraulischen Abgleichs.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen der Arbeit ist das Software-Werkzeug *Modelica Network Generator (MoNetGen)* (Steinbüchel, Dezember 2017) entstanden, das den Prozess zur Erstellung von Heizungsrohrnetzen im Bereich gebäudeenergetischer Simulationen mit Modelica (Modelica Association, 2018) vereinfacht und teilweise automatisiert. Sowohl die Dauer als auch die Fehleranfälligkeit bei der Modellgenerierung verbessert sich durch *MoNetGen* deutlich. Die Software bietet die Möglichkeit, Heizkörper- und Fußbodenheizungsnetzwerke zu erstellen. Das Programm benötigt eine geringe Anzahl an notwendigen Eingabeparametern und bringt bereits gute Standardwerte mit sich.

Auf Wunsch führt *MoNetGen* einen automatischen hydraulischen Abgleich durch, sodass anschließend mit idealem Rohrnetz simuliert werden kann. Es ist allerdings auch möglich, bestehende Netze nachzumodellieren, indem beispielsweise die automatische Netzdimensionierung angepasst wird.

Die generierte Modelica-Bibliothek beinhaltet Modelle der *Modelica-Standard-Bibliothek* (Modelica Association, 2018) und der *AixLib* (EBC, 2018; Müller et al., 2016) und ist in erster Linie aufgeteilt in etagenweise Modelle für das Verteilnetz sowie ein vektorisiertes Modell des Wärmeübertragungssystems.

Durchgeführte Simulationen eines repräsentativen Einfamilienhauses verifizieren zum einen die von der Software erzeugten Modelle und stellen zum anderen den Vergleich zwischen einem hydraulisch abgeglichenen Netzwerk und einem System ohne Abgleich dar. Das Netzwerk ohne hydraulischen Abgleich zeigt bereits Werte mit geringen Abweichungen zu nominellen Rücklauf-temperaturen und Massenströmen. Dies ist auf die ohnehin vorliegende automatische Rohrdimensionierung zurückzuführen. Nichtsdestotrotz werden die Diskrepanzen durch den hydraulischen Abgleich um ein Vielfaches reduziert. Tabelle 1 gibt die Ergebnisse quantitativ mithilfe statistischer Kennzahlen wieder.

Tabelle 1: Übersicht der Abweichungen für T_{RL} und \dot{m} bezogen auf nominelle Auslegungswerte

Fall	Nicht abgegl.	abgegl.	Verhältnis
MAE($T_{RL, HK}$)	0,64 K	0,08 K	7,8
MAE($T_{RL, FBH}$)	0,47 K	0,13 K	3,6
MAPE(\dot{m}_{HK})	7,17 %	0,92 %	7,8
MAPE(\dot{m}_{FBH})	6,47 %	0,09 %	74,6

Des Weiteren wird ein gleichmäßigeres raumbezogenes Aufheizen aufgrund des hydraulischen Abgleichs nachgewiesen.

Für die Zukunft ist eine Anbindung an Building Information Modelling (BIM) vorstellbar. Durch eine optionale Einbindung von z. B. *.ifc-Dateien kann der Automatisierungsgrad weiterhin erhöht werden. Im Rahmen dieses Projektes wurde jedoch darauf verzichtet, da vor allem eine Modellierung ohne zur Verfügung stehende BIM-Daten möglich sein soll Literatur.

LITERATUR

Deutsches Institut für Normung e.V. (2009-11). Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung. Teil 3: Auslegung. Berlin: Beuth Verlag, 91.140.10 (1264-3).

Deutsches Institut für Normung e.V. (2013-03). Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung. Teil 2: Fußbodenheizung: Prüfverfahren für die

Bestimmung der Wärmeleistung unter Benutzung von Berechnungsmethoden und experimentellen Methoden. Berlin: Beuth Verlag, 91.140.10 (1264-2).

Deutsches Institut für Normung e.V. (2015-03). Radiatoren und Konvektoren. Teil 1: Technische Spezifikationen und Anforderungen. Berlin: Beuth Verlag, 91.140.10 (442-1).

EBC (2018). AixLib: A Modelica model library for building performance simulations. <https://github.com/RWTH-EBC/AixLib>.

Glück, B. (1988). *Hydrodynamische und Gasdynamische Rohrströmung. Druckverluste*. Berlin: Verlag für Bauwesen.

Idel'čik, I. E., Malâvskaa, G. R. & Martynenko, O. G.'e. (2008). *Handbook of hydraulic resistance*. Mumbai: Jaico Publishing House.

Modelica Association (2018). *Modelica*. <https://www.modelica.org/>.

Müller, D., Lauster, M., Constantin, A., Fuchs, M. & Remmen, P. (2016). *AixLib – An Open-Source Modelica Library within the IEA-EBC Annex 60 Framework*, RWTH Aachen University.

R. Koenigsdorff, M. Becker, A. Floß & M. Haibel (2010). *Energieeffizienz in der Gebäudetechnik*: Springer Berlin Heidelberg.

Recknagel, H. & Sprenger, E. (2006). *Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 07/08*: Deutscher Industrieverlag.

Steinbüchel, J. (Dezember 2017). *Automized generation of hydronically balanced heating systems for building performance simulations in Modelica*. Masterarbeit, RWTH Aachen University.

Volland, K. & Volland, J. (2006). *Wärmeschutz und Energiebedarf nach EnEV 2006. Schritt für Schritt zum Energieausweis für Wohngebäude*. Köln: Rudolf Müller.

Wetter, M. & Treeck, C. van (2017a). IBPSA Project 1: BIM/GIS and Modelica framework for building and community energy system design and operation. Zugriff am 27.4.2018 <https://ibpsa.github.io/project1/index.html>.

Wetter, M. & Treeck, C. van (2017b). *IEA EBC Annex 60: New Generation Computing Tools for Building and Community Energy Systems*.

EIN ANSATZ FÜR DIE TYPOLOGIEBASIERTE VERVOLLSTÄNDIGUNG VON GE- BÄUDEINFORMATIONEN ZUR UNTERSTÜTZUNG DER FRÜHEN PLANUNGS- PHASEN AM BEISPIEL LCA

K. Rexroth¹, P. von Both¹, J. Gantner² und Ch. Schmid³

¹Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Germany

²Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Ganzheitliche Bilanzierung (GaBi), Stuttgart, Germany

³Intep - Integrale Planung GmbH, Zürich, Switzerland

KURZFASSUNG

In frühen Planungsphasen werden grundlegende Entscheidungen getroffen, welche die ökologischen Eigenschaften eines Gebäudes vorbestimmen. Dem Einsatz von Ökobilanzen (LCA) als planungsbegleitende Methode zur Beurteilung von Entwurfsvarianten steht gegenwärtig ein hoher zeitlicher Aufwand für deren Erstellung entgegen. Die Verwendung von BIM-Modellen als Informationsgrundlage für LCA-Werkzeuge bildet einen möglichen Lösungsansatz. Jedoch entspricht der Detaillierungsgrad, in welchem der Planungsgegenstand in frühen Planungsphasen über Modell-Informationen beschrieben werden kann, nicht der Tragweite der Entscheidungen in diesen Phasen. Zur Lösung wird ein mehrstufiger typologiebasierter Ansatz für die Integration von LCA-Informationen in den Planungsprozess vorgestellt. Der Ansatz wurde aus einer planungstheoretischen Betrachtung in Verbindung mit planungspraktischer und LCA-praktischer Expertise abgeleitet.

In early planning stages fundamental decisions are made that predetermine the ecological characteristics of a building. The use of Lifecycle Assessment (LCA) as a process accompanying method for the evaluation of design variants currently contrasts with a high expenditure of time for their preparation. The usage of BIM models as a database to LCA tools is seen as a possible approach. However, the degree of detailed information that can be used to represent the subject of planning doesn't meet the scope of the decisions made in early stages. To tackle this, a multi-staged typological approach to integrate LCA data into the planning

process is suggested. The approach was derived from reflection on present planning theory combined with practical expertise in building design and LCA.

EINLEITUNG

Die Idee der Integralen Planung¹ entstand aus einer systemischen, holistischen Denkrichtung und im Umfeld eines zunehmenden ökologischen Bewusstseins im Verlauf der 1960er und 70er Jahre. Begrifflich wurde die Integrale Planung zunächst in der Stadt- und Regionalplanung² erwähnt. In den 1970er Jahren entstanden erste Planungs- und Beratungsbüros in der DACH-Region, welche die Idee der Integralen Planung in ihre Unternehmensphilosophie aufnahmen und für den Gebäudebereich weiterentwickelten (z.B. ATP, Intep).

Für den Bereich der Gebäudeplanung wird eine Integrale Planung häufig dann gefordert, wenn ein komplexes Bauprojekt unter Berücksichtigung aller Aspekte der Hochbau- und Gebäudetechnik optimal verwirklicht werden soll. Mit dem Ziel den Energieverbrauch von Gebäuden drastisch zu reduzieren, wurde in den 1980er-Jahren im Auftrag des Schweizer Bundesamtes für Konjunkturfragen ein entsprechendes Konzept zur Umsetzung der Integralen Planung im Baubereich entwickelt und detailliert beschrieben. Kernpunkte dieses

¹ Integral (lat. integrare = wiederherstellen, ergänzen) bedeutet „zu einem Ganzen dazugehörend und es erst zu dem machend, was es ist“ (Duden).

² z.B. Kongress „Integrierte Planung und Durchführung in Stadtgebieten“, Amsterdam 1975.

Konzeptes waren beispielsweise die teamorientierte Einbindung der Planungsbeteiligten und eine Computerintegration im Planungsprozess (Bundesamt für Konjunkturfragen 1986).

In der Folge etablierte sich dieses Paradigma auch in Normen, in der Schweiz beispielsweise mit dem SIA Leistungsmodell 95. In Deutschland wurde das Konzept der Integralen Planung zu Beginn der 1980er Jahre aufgegriffen und im Rahmen von Forschungs- und Bauprojekten zum klimagerechten, solaren und ökologischen Bauen angewendet (XIA 2011).

Wenn auch heute keine vereinheitlichte Definition der Integralen Planung vorliegt, so ist doch das Paradigma der Integralen Planung in der Planungs- und Baupraxis häufig präsent. Dabei wird meist zwischen einer „horizontalen Integration“ zur Optimierung der Zusammenwirkung der Teilsysteme von Gebäuden (Fokus Systemtechnik) und einer „vertikalen Integration“ zur Berücksichtigung ökologischer, ökonomischer, technischer, funktionaler und sozialer Fragestellungen über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerkes (Fokus Nachhaltiges Bauen) differenziert (Bundesamt für Konjunkturfragen 1986).

Unsere Arbeit greift ein in der jüngeren Planungstheorie enthaltenes System-Umwelt-Paradigma auf. Die damit verbundenen und planungsmethodisch relevanten Grundannahmen sind beispielsweise: unvollständige Informationen, subjektive und wertebezogene Herangehensweisen, kognitive Grenzen, Untrennbarkeit von Problemverständnis und Problemlösung sowie ein im Planungsprozess veränderlicher Präferenzrahmen (vgl. Schönwandt 2002).

Nach diesem Grundverständnis erfordert eine Integrale Planung eine erweiterte Betrachtung des Planungsprozesses, welche insbesondere die Entstehung eines Präferenz- und Beurteilungsrahmens der Beteiligten und Betroffenen berücksichtigt. Solche qualitativen Dispositionen werden – meist noch ohne Einbindung von Architekten, Planern oder Beratern – in einer Phase getroffen, in der sich der Anlass für ein späteres Projekt erst herausbildet. In unserem Ansatz wollen wir am Beispiel der LCA aufzeigen, wie sich eine modellbasierte Planung

bereits hier anlegen und schrittweise bis zur Phase einer Nachhaltigkeitsbewertung im Rahmen einer Gebäude-Zertifizierung fortschreiben lässt.

LCA UND NACHHALTIGKEITSBEWERTUNG

Ökobilanzen (LCA) sind ein zentrales Instrument zur quantitativen Beurteilung der ökologischen Qualität von Gebäuden. Die Methodik ist im europäischen und internationalen Kontext definiert, beispielsweise durch die Normen EN 15978, EN 15804, ISO 14040 und ISO 14044, und in Zertifizierungssystemen zur Beurteilung der Nachhaltigkeit, wie beispielsweise BREEAM, LEED, BNB oder DGNB, enthalten.

Für die Erstellung einer Ökobilanz werden zumeist einfache Softwaretools oder Excel-Anwendungen verwendet (Kreißig 2013). Ökobilanzen werden dabei für bestimmte, i.d.R. abgeschlossene Planungsstände erstellt. Die erforderlichen Angaben werden momentan eher unstrukturiert und manuell übertragen. Eine entsprechende Fehleranfälligkeit und der zeitliche Aufwand bei der Dateneingabe lassen es in der Praxis gegenwärtig nicht zu, die Ökobilanzierung als begleitendes Werkzeug zur Optimierung des Gebäudeentwurfes bereits in den frühen Planungsphasen zur Variantenuntersuchung von verschiedenen Grundkonzepten einzusetzen. Eine Gebäude-Ökobilanz wird darum i.d.R. erst am Ende des Planungsprozesses und frühestens auf Grundlage von Ausschreibungsunterlagen erstellt.

Bisher verfügbare Softwaretools mit einer Schnittstelle zwischen BIM und LCA stellen die Umwelteinwirkungen nur vereinfacht dar (z.B. IMPACT), verlangen sehr spezialisierte IFC-Daten oder sind dem Bereich eines „closed BIM“ zuzuordnen und können erst in ausführungsnahen Planungsständen eingesetzt werden (z.B. One Click LCA). Die Funktion einer planungsbegleitenden Ökobilanz wird durch diese Ansätze nicht erfüllt. Auch die im universitären Umfeld bisher entwickelten Konzepte und Lösungsansätze für die Thematik „BIM und LCA“ konnten sich in der Praxis bisher nicht durchsetzen (z.B. Neuberg 2004).

SYSTEMATISIERUNGSANSATZ

Die planungsbegleitende Ökobilanzierung bildet einen Anwendungsfall für die konzeptionelle

Weiterentwicklung der Integralen Planung und für den planungsbegleitenden Zugriff auf Modellinformationen bereits in frühen Planungsphasen. Für diesen Anwendungsfall ist zunächst zu definieren, welche Informationstiefe in den einzelnen Planungsphasen erforderlich ist und ob diese bereits in impliziten Festlegungen über vorausgegangene Entscheidungen enthalten sind. Der Systematisierungsansatz soll aus dem für jede Planungsphase eigenen Fokus auf bestimmte Themen und Betrachtungsausschnitte entwickelt werden. Eine „einfache“ Vorverlegung von detaillierten Planungsinhalten in frühere Planungsphasen ist dabei nicht zielführend, da die erforderlichen Inhalte der frühen Phasen nicht ersetzt oder übersprungen werden können, wenn eine Varianz im Lösungsraum erreicht werden soll.

Aus dem Systems Engineering sind hierzu die wichtigsten Grundgedanken als zweckmäßig zusammengefasst (Haberfellner et al. 2012):

- die Vorgehensweise vom Groben zum Detail,
- das prinzipielle Denken in Varianten und (damit) die Bereitschaft zur Suche nach weiteren Lösungsansätzen,
- die Gliederung des zeitlichen Ablaufes in eine Phasenstruktur (Makrologik),
- und die Anwendung einer wiederkehrenden Arbeitslogik (Problemlösungszyklus).

Unter Berücksichtigung dieser Grundgedanken wurde ein Phasenmodell konzipiert, welches sich aus den Betrachtungsausschnitten, vorrangigen Inhalten (prior concerns) und den sich ändernden Rollen im Lebenszyklus eines Gebäudes ableitet. Bei der Entwicklung des Phasenmodells wurden praktische Erkenntnisse von Planungs- und Beratungsbüros mit ausgewiesener Expertise im Bereich der Integralen Planung einbezogen. Darüber hinaus – ohne dies bei der Konzeption bereits zu fordern – korrespondiert die Phasenstruktur in den frühen Phasen mit dem aktuell für Bundesbauten festgelegten Planungsablauf (vgl. RBBau 2017).

Um keine idealistische oder strikte Vorgehensstruktur zu entwickeln, sollte die Phasenstruktur auch das „naturwüchsige“ Planungsverhalten angemessen berücksichtigen und darauf hin

überprüft werden, an welchen kritischen Stellen im Planungsprozess wichtige Entscheidungen über die Nachhaltigkeit eines Gebäudes getroffen werden und wie der Planungsprozess in Richtung einer Integralen Planung methodisch und informationstechnisch unterstützt werden kann (neuralgische Punkte).

Phasenstruktur

Projekte entstehen im Kontext eines übergreifenden alltags- oder lebensweltlichen Entwicklungsprozesses (z.B. politisch, wirtschaftlich, gesellschaftlich) und durch die Initiative einzelner Personen mit beispielsweise politischen, unternehmerischen oder persönlichen Zielen. Vor dem eigentlichen Beginn von bereits auf ein Projekt verweisenden Aktivitäten ist eine Übergangsphase zu explizieren (Beobachtung und Orientierung, latente Bedarfserkennung), die gegenüber einem Projekt noch dem lebensweltlichen Kontext zuzuordnen ist, in der aber bereits eine Verknüpfung von Aktivitäten zur Entstehung eines Projektanlasses führt. Daran anschließende Aktivitäten wirken bereits auf die Etablierung und Konkretisierung eines Projektes.

Aus der Struktur von Phasen- und Aktivitäten-Modellen verschiedener Planungsdisziplinen, kann der Planungsprozess zunächst qualitativ in einen Bereich der Problembestimmung (Transformation zur abstrakten Beschreibung → Problemmatisierung) und einen Bereich der Lösungsbestimmung (Transformation zur konkreten Maßnahme → Planung und Realisierung) differenziert werden (Rexroth u. Both 2014).

Lebensweltliche Planungsaufgaben sind i.d.R. durch eine hohe Unklarheit im Bereich der Problembestimmung gekennzeichnet. Da die Suche nach Lösungen zunächst zurückgestellt werden muss, bis über die Situation und die Zielkriterien eine Klärung erfolgt ist, bezeichnet Dörner dies als das Vorliegen einer dialektischen Barriere, welche zu überwinden sei (Dörner 1979).

Bereits hier zeigt sich eine Kaskade von Selektionsentscheidungen mit einem inhaltlich-qualitativen und organisationalen Bezug. Mit dem Gewähr werden von Bedürfnissen und Zielen sind bereits Vorstellungen verknüpft, die Einfluss darauf nehmen, welcher Personenkreis den Beteiligten und Betroffenen zugerechnet

und welcher Kreis daraus inhaltlich an der Planung beteiligt wird. Das Planungsverständnis der Planungsbeteiligten beeinflusst wiederum die Selektion des Realitätsausschnittes, welcher als Entwicklungs- oder Planungsgegenstand expliziert wird. Mit den vorhandenen Kenntnissen und Erfahrungen in diesem Realitätsausschnitt wird wiederum ein Spektrum von Themen und Lösungsansätzen erkannt, die priorisiert und zur weiteren Bearbeitung ausgewählt werden.

Diese Selektionsschritte bewirken – implizit oder explizit – eine „Initialisierung“ des Projektes und sind damit als notwendiger und integraler Bestandteil einer Planung zu berücksichtigen. Dabei wird noch nicht die Lösung selbst determiniert, jedoch wird der Begriffsraum für mögliche Problemdefinitionen und damit mental verknüpfte Lösungsansätze eingegrenzt. Um eine hohe Varianz auf Ebene der verfügbaren Lösungsansätze zu erreichen, ist bei diesem initialen Selektionsprozess eine angemessene Varianz auf allen Ebenen anzustreben und zu reflektieren (vgl. Rexroth u. Both 2014).

In der Immobilienwirtschaft erfolgt in den frühen Projektentwicklungsphasen, neben den Aktivitäten zur Zusammenführung von Standort, Kapital und Projektidee, insbesondere die Überprüfung der Plausibilität und Machbarkeit auf verschiedenen kritischen Ebenen, wie beispielsweise Markt und Risiken, aber auch der Bebaubarkeit oder der Nutzungskosten (Alda u. Hirscher 2016). Die Phase endet an einem Punkt, an dem über die Durchführung weiterer Schritte (z.B. Grundstückserwerb und Investition, Beauftragung der Entwurfs- und Genehmigungsplanung) entschieden werden kann.

Da eine hohe Verlässlichkeit der Informationen zur Absicherung der Investitionsentscheidung beiträgt, werden zu diesem Zeitpunkt bereits wesentliche Grundzüge eines Projektes vorbestimmt, wie beispielsweise Qualitäts-, Zeit- und Kostenrahmen, aber auch objektbezogene Konkretisierungen, wie das städtebaulich-räumliche Konzept und die Baukörperdimensionen, und dadurch bereits implizierte architektonische, konstruktive und technische Lösungsprinzipien. Damit ist eine solche Phase der „Bedarfsplanung und Grundkonzeption“ bereits von besonderer Bedeutung für die Konzeption nachhaltiger Gebäude und erfordert im Sinne einer Integralen Planung bereits

fachlich fundierte Entscheidungen auf Grundlage von Architekten- und Ingenieurleistungen.

Darauf folgend sind aus einer übergeordneten Betrachtung zwei qualitativ unterschiedliche Phasen zu differenzieren, die im allgemeinen Verständnis mit den traditionellen Architekten- und Ingenieurleistungen im engeren Sinne verbunden werden. Mit Fokus auf die räumlich-architektonische, bautechnische und baurechtliche Konkretisierung ist die „Entwurfs- und Genehmigungsplanung“ herauszustellen, die mit der Erteilung einer baurechtlichen Genehmigung abschließt. Daran anschließend erfolgt mit der „Ausführungsplanung“ eine technisch-konstruktive Spezifizierung der einzelnen Bauteile eines Gebäudes als Grundlage der Herstellung.

Die Differenzierung dieser beiden Phasen wird häufig auch organisatorisch vollzogen – durch einen Wechsel in der Auftrags- und Rollenkonstellationen. Beispielsweise ist es in der Praxis häufig anzutreffen, dass die Ausführungsplanung als Vertragsleistung eines Generalunternehmers beauftragt wird und gegenüber der Entwurfsplanung zu einer neuen Auftragsituation führt: Von „Bauherr beauftragt Architekt“ hin zu „Bauherr beauftragt Unternehmer und dieser beauftragt Architekt als Nachunternehmer“.

Die bis hier beschriebenen Phasen der Konzipierung und Konkretisierung dienen letztlich der Vorbereitung zur „Herstellung“ eines Gebäudes – den eigentlichen baulichen Eingriff in die Umwelt – und dem intendierten Ziel der „Nutzung“ eines Gebäudes.

Über diese Phasenabgrenzung hinausgehend, zeigen die Praxiserfahrungen der Projektpartner, dass bei zunehmend technisch anspruchsvollen Gebäudekonzepten am Ende der Herstellungsphase eine gesonderte Phase zur „Inbetriebnahme“ der technischen Systeme herauszustellen ist. Dabei werden die technischen Systeme in mehreren Zyklen auf die lokalen und nutzerspezifischen Besonderheiten eingeregelt, was je nach Komplexität der Gebäudetechnik eine gesonderte Begleitung und Dokumentation sowie spezialisierte Kenntnisse und Erfahrungen erfordert.

Erweitert man darüber hinaus den Betrachtungsausschnitt auf den gesamten Produkt- oder Gebäudelebenszyklus mit dem Ziel einer

ganzheitlichen Optimierung, so kann neben der Erst-Herstellungphase und der intendierten „Nutzungs- und Betriebsphase“ auch eine Bedarfsänderung eintreten, welche einen weiteren Zyklus mit einem neuen Fokus einleitet (z.B. Erweiterung, Revitalisierung, Teil- oder Komplettrückbau). Das hieraus abgeleitete Phasenmodell in seiner zyklischen Darstellung kann Abbildung 1 entnommen werden. Die Phasen der projektbezogenen Ebene wurden gegenüber der alltags- oder lebensweltlichen Ebene dunkel abgesetzt.

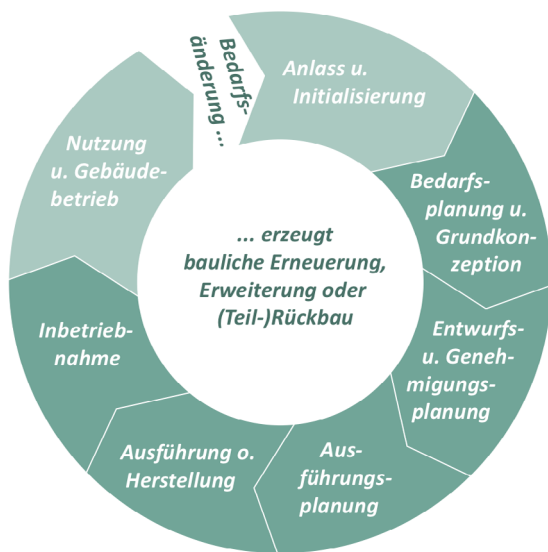


Abbildung 1: Grundlegende Phasenstruktur

Problematisierung und Planung

Für einen frühzeitigen, planungsbegleitenden Einbezug von modellbasierten Informationen zu Fragen der LCA, werden die ersten vier Phasen des Modells adressiert, welche im Lebenszyklus die Bereiche der Problematisierung und Planung umfassen. Zunächst werden die „Prior Concerns“ und die „Neuralgischen Punkte“ kurz dargestellt, welche eine Grundlage für den typologiebasierten Ansatz bilden.



Abbildung 2: Neuralgische Punkte in den Phasen der Problematisierung und Planung

Neuralgische Punkte bilden sich an Entscheidungspunkten am Ende einer Phase bei denen

festgelegt wird, welche bis dahin erkannten oder erarbeiteten Möglichkeiten weiter konkretisiert werden sollen (vgl. Abbildung 2).

(1) In der ersten Phase „Anlass und Initialisierung“ liegt der Prior Concern auf einer Entscheidung zur Frage „Bearbeiten oder Aufschieben?“ welche durch den Initiator getroffen wird. In dieser Phase werden auf Grundlage von eigenen Vorerfahrungen, eingeholten Meinungen, gesellschaftlich oder politisch diskutierten Themen bereits „Suchrichtungen“ eingeschlagen oder ausgeblendet – diese Entscheidungen sind meist qualitativ und häufig nicht explizit. Hier erfolgt i.d.R. auch eine Zuordnung von Verantwortungen und Ressourcen bei der weiteren Vorbereitung und Durchführung von projektbezogenen planerischen Aktivitäten.

Neuralgischer Punkt 1 ist die erste Formulierung der Aufgabenstellung – initialer Design-Brief – welche bereits Informationen zur intendierten Hauptnutzung und zu bevorzugten Bauweisen oder Qualitätssegmenten enthalten kann wie beispielsweise „gehobener Wohnungsbau in Massivbauweise“. Für die Fragen der Nachhaltigkeit ist hier bereits entscheidend, dass ein entsprechendes Bekenntnis oder ein Grundsatzentscheid zur Nachhaltigkeit und zur angestrebten Gebäudequalität – insbesondere in ökologischer Hinsicht – expliziert wird.

(2) Als Prior Concern der zweiten Phase „Bedarfsplanung und Grundkonzeption“ ist die Absicherung einer anstehenden Investitionsentscheidung zu sehen, welche häufig auf strategische oder wirtschaftliche Aspekte (z.B. Bedarfs- oder Marktentwicklung, Gebäudeportfolio, Amortisation) ausgerichtet ist, aber auch durch soziale oder ökologische Aspekte maßgeblich beeinflusst werden kann (z.B. Planungsverständnis, Partizipation, akzeptierte Umwelteingriffe). Im Industrie- oder Wohnungsbau kann auch die kurz- oder mittelfristige Bedarfsdeckung oder Marktbedienung im Vordergrund stehen (z.B. Erhöhung der Produktionskapazität, Mangel an Wohnraum).

Neuralgischer Punkt 2 ist die Entscheidung für ein Grundkonzept am Ende der Phase, welches bereits erste Festlegungen der Geometrie und Nutzung aus der Bebaubarkeit des Grundstückes (z.B. Art und Maß der baulichen Nutzung), der städtebaulichen Figur und implizite Entscheidungen über die bau- und

anlagentechnische Qualität beinhaltet. Als neuralgischer Prozess ist der gesamte Entwicklungsprozess der Vorbereitung dieses Grundkonzeptes zu sehen. Zunächst sollte eine umfängliche Bedarfserfassung losgelöst von Entwurfsgedanken im Vordergrund stehen. In der Praxis wird häufig auf eine strukturierte Bedarfsplanung verzichtet, vor allem auch auf die Prüfung alternativer Möglichkeiten zur Bedarfsdeckung. Wird die Bedarfsplanung erst im Laufe der Entwurfsplanung konsolidiert führt dies meist zu zusätzlichen Planungsschleifen und Planungskosten.

(3) Als Prior Concern der dritten Phase „Entwurfs- und Genehmigungsplanung“ ist ein realisierbarer und genehmigungsfähiger Gebäudeentwurf zu sehen, welcher die maßgebliche Voraussetzung für die Erteilung der Baugenehmigung und für den Beginn der Bauausführung darstellt. Begleitende Themen sind in dieser Phase die Einhaltung des angestrebten Projekt-Zeitrahmens, des Kostenrahmens, sowie die Akzeptanz des Projektes im Umfeld.

Neuralgischer Punkt 3 ist der baurechtlich festgelegte Gebäudeentwurf am Ende der Phase. Maßgebliche Entwurfs- und Konstruktionsänderungen sind ab hier zu dokumentieren und der Baurechtsbehörde zur Genehmigung vorzulegen. Zudem sind im Falle einer funktionalen Leistungsvergabe die genehmigten Pläne in dem zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Detaillierungsgrad meist Vertragsgrundlage, sodass Änderungen unmittelbar eine Nachkalkulation des Unternehmers bewirken.

(4) Prior Concern der vierten Phase „Ausführungsplanung“ ist die abgestimmte Zusammenstellung und Bereitstellung aller Informationen, die zur qualitäts-, zeit- und kostengerechten Herstellung und Montage der Bauteile erforderlich sind. Dabei werden auch Anforderungen aus dem geplanten Herstellungs- oder Montageverfahren in die Planung einbezogen. Bei einer vorgesehenen Sonderwunsch- oder Mieterplanung sind ggf. zusätzliche Bewertungs- und Freigabeprozesse zu berücksichtigen.

Neuralgischer Punkt 4 ist die Übersetzung und Übertragung der Nachhaltigkeitsanforderungen in konkrete technische Spezifikationen in Ausführungsplänen, Leistungs- und Positionsbeschreibungen.

Es zeigt sich, dass in allen Phasen bereits LCA-relevante Festlegungen getroffen werden, welche den Spielraum für nachgelagerte Optimierungen begrenzen. Um eine integrale und nachhaltige Planung umzusetzen, sind darum LCA-Informationen in der Vorbereitung der Entscheidungen – neuralgische Prozesse – in einer auf den jeweiligen Prior Concern abgestimmten Informationsqualität im Planungsprozess bereitzustellen.

Ausgangspunkt der weiteren Überlegungen ist, dass die Ökobilanz eines Gebäudes sich in ihrer Größenordnung bereits über wenige planerische Festlegungen bestimmt: Nutzung, Energiestandard, (technischer) Ausstattungsstandard und die verwendeten Materialien. Diese Merkmale sollen über einen mehrstufigen typologiebasierten Informationsansatz in den frühen Planungsphasen bereitgestellt und schrittweise verdichtet oder konkretisiert werden.

Typologie-basierte Informationen in den frühen Planungsphasen

(1) Bereits in Phase 1 „Anlass und Initialisierung“ spielt die „Grunddisposition“ des Initiators eine wichtige Rolle. Sind die ökologische oder energetische Qualität für den Initiator bereits wichtige Themen im Vorfeld? Besteht bereits ein Interesse für leichte Bauweisen, natürliche Baustoffe oder Holzbau? Liegt die Wertschätzung eher auf technischen Features oder passiven Lösungen?

Darüber hinaus werden bereits mit dem Standort, dem zulässigen Maß und der Art der Nutzung bestimmte technische Anforderungen initialisiert (z.B. Brandschutz, Schallschutz), die jenseits einer in der Praxis erprobten Bauweise, meist nur mit finanziellem Mehraufwand zu erfüllen sind und damit Zielkonflikte gegenüber den wirtschaftlichen Anforderungen erzeugen können.

Aus der qualitativen Festlegung, wie z.B. ein Passivhaus zu errichten, kann bereits der Heizwärmebedarf des Gebäudes $\leq 15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ angesetzt werden. Mit einer qualitativen Festlegung, wie z.B. „kostengünstiger Wohnungsbau“ können bereits implizite, erfahrungsbasierte Informationen verknüpft werden, wie (tendenziell) 2 - 2,5 geschossiger Baukörper mit 35° - 40° Dachneigung als kostengünstige Bauform, Mauerwerksbau (tragende

Außenwände) mit KS-Plansteinen und WDVS als kostengünstige Bauweise oder die Begrenzung der Fensterflächen auf ein Mindestmaß (vgl. Schmitz et al. 2015). Abweichungen von diesen „Referenz-lösungen“ sind als kostenrelevant einzuordnen und damit bereits bewusst zu treffen.

Für diese Phase sollen LCA-Informationen in Form von Benchmarks für ausgewählte *Bausysteme* erarbeitet und bereitgestellt werden. Hierfür werden zunächst bestehende Gebäude analysiert und die LCA-Informationen als Durchschnittswerte auf Planungskenngrößen wie Bruttorauminhalt, Brutto- oder Nettogeschossfläche bezogen, vergleichbar mit Kostenkennwerten, die z.B. durch das BKI³ bereitgestellt werden. Dadurch können intendierte Bauweisen bereits ohne vorliegenden Baukörper gegenübergestellt werden.

(2) In Phase 2 „Bedarfsplanung und Grundkonzeption“ erfolgen bei Neubau- und Erweiterungsprojekten zur Investitionsabsicherung bereits eine Variantenuntersuchung zur Bebaubarkeit und Ausnutzung eines Grundstückes. Neben qualitativen Informationen aus Phase 1, liegen hier bereits geometrische Informationen vor, beispielsweise zur Baukörperanordnung und Gliederung, Funktionsflächenverteilung und Geschossstruktur. In Abhängigkeit von der Nutzung können bereits (tendenziell) Festlegungen zur erforderlichen Raumhöhe oder Gebäudetiefe getroffen werden. Aber es lassen sich auch plausible Annahmen für Raumtiefen und erforderliche Deckenstärken treffen. Beispielsweise können Bürogebäude (tendenziell) mit einer Gebäudetiefe um ca. 140m konzipiert werden, da hier verschiedene gängige Bürotypologien flexibel umsetzbar sind. Diese Gebäudetiefe ist wiederum i.d.R. mit einer Betonskelett-Konstruktion wirtschaftlich zu realisieren, wobei Deckenplatten vorab mit einer Deckenstärke von etwa 16 cm angenommen werden können, um den erforderlichen Schallschutz einhalten zu können. Fassaden können hier nicht-tragend ausgebildet werden.

Für diese Phase soll eine Bereitstellung von LCA-Informationen für ausgewählte „Referenz-

Tabelle 1: Spektrum und Mittelwerte für Öffnungsflächen und Innenwandflächen ausgewählter Gebäudetypen – Auszug – (Quelle: BKI, eigene Berechnung)

Typ	NE	BRI	BGF	ÖFF/ BGF	IWF/ BGF
Mittelgr. MFH einf. Standard	7	3291	1311	0,10	1,03
	16	9621	3352	0,19	0,67
	12	4681	1522	0,16	0,90
	15	8103	3019	0,11	0,78
	18	7224	2339	0,15	1,04
Mittelwert				0,14	0,89
Mittelgr. MFH geh. Standard	7	4087	1435	0,18	0,74
	18	7711	2777	0,19	0,94
	9	5213	1605	0,14	0,88
	10	4218	1588	0,13	0,71
	11	3929	1276	0,20	1,15
Mittelwert				0,17	0,88
EFH einf. Standard	1	879	250	0,30	0,44
	1	933	325	0,16	0,73
	1	1039	366	0,17	0,30
	1	656	220	0,28	0,60
	1	1004	261	0,15	0,58
Mittelwert				0,21	0,53
EFH geh. Standard	1	948	288	0,10	0,84
	1	716	195	0,21	0,90
	1	969	353	0,22	0,39
	1	1050	297	0,44	0,41
	1	1444	388	0,11	0,91
Mittelwert				0,22	0,69
Büro- u. Verwaltungs- gebäude	455 AP	37260	11097	0,23	0,78
	183 AP	13556	3680	0,01	1,23
	18 AP	2031	515	0,20	1,03
	48 AP	7279	1984	0,45	0,79
	100 AP	12366	3725	0,22	0,93
Mittelwert				0,22	0,95

Abkürzungen: NE=Nutzungseinheiten, BRI=Bruttorauminhalt [m³], BGF=Bruttogeschossfläche [m²], ÖFF=Öffnungsfläche, IWF=Innenwandfläche

lösungen“ von *Funktionssystemen* wie z.B. Geschossdecken, Außenwänden, Innenwände etc. erfolgen. Aus dem Modell liegen bereits geometrische Informationen zur Fläche der Außenwände, Geschossdecken, Dach und Gründung vor. Auch wenn in dieser Phase noch

³ Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern

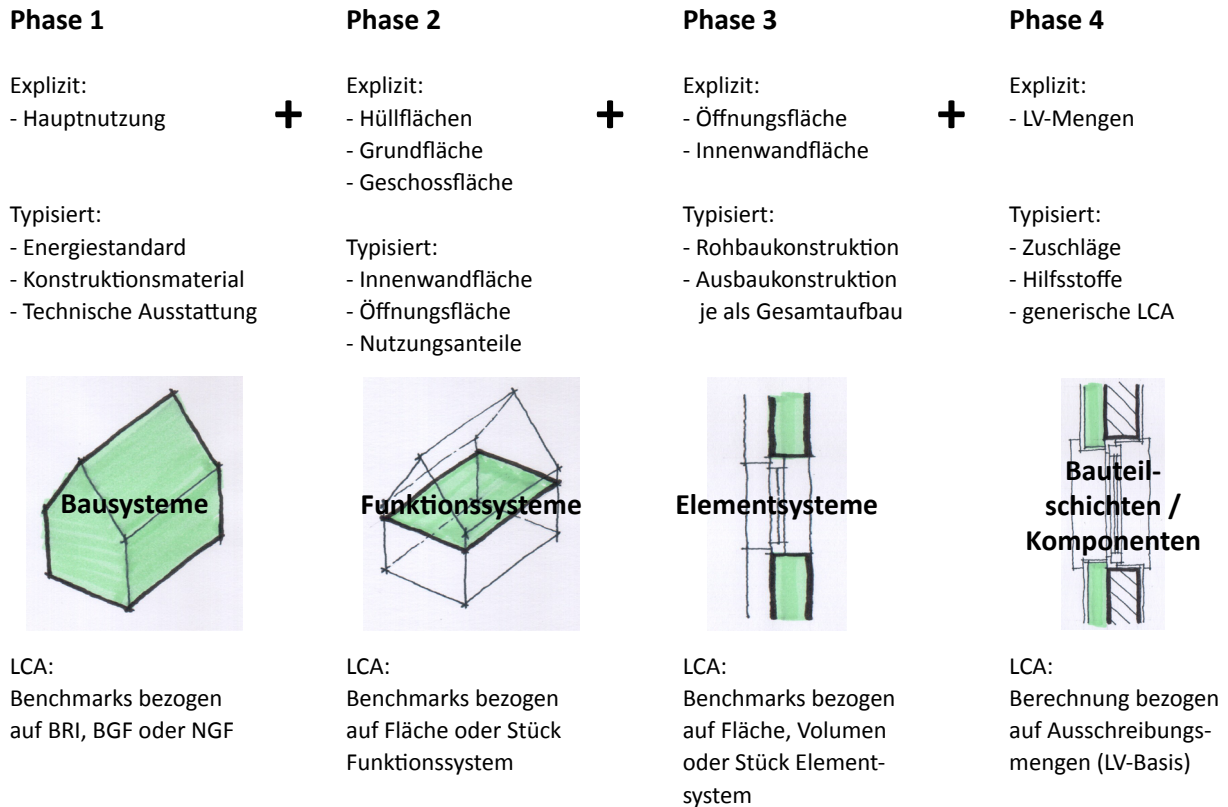


Abbildung 3: Mehrstufiger Ansatz zur Integration von LCA-Informationen in frühen Planungsphasen

kein ausgearbeiteter Entwurf zur Grundriss- und Fassadengestaltung vorliegt, können überschlägige Informationen aus der Nutzungsart und dem Gebäudetyp ergänzt und zu einem ersten Mengengerüst verknüpft werden (vgl. Tabelle 1). Hierzu wurden beispielhaft Daten aus jeweils fünf zufällig ausgewählten realisierten Gebäuden des entsprechenden Gebäudetyps ausgewertet, aus welchen Kennwerte zu Öffnungsflächen und Innenwandflächen in Relation zur Bruttogeschossfläche berechnet wurden.

(3) In Phase 3 „Entwurfs- und Genehmigungsplanung“ liegt bereits ein ausreichend detailliertes Geometriemodell zur Verknüpfung mit LCA-Informationen auf Ebene von *Elementsystemen* (Grobelemente) vor. Hier können beispielsweise Rohbaukonstruktionen und Ausbaukonstruktionen typisiert und mit LCA-Informationen hinterlegt werden.

(4) In Phase 4 „Ausführungsplanung“ liegen alle Informationen für eine normbasierte LCA in der erforderlichen Planungstiefe von *Bauteilschichten bzw. Komponenten* vor. Von hier an können Informationen der Planung durch Informationen der Realisierung ersetzt und fortge-

schrieben werden, um die Zustände „as build“ und „as used“ zu dokumentieren.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der vorgestellte Ansatz wurde aus einer planungstheoretischen Betrachtung in Verbindung mit planungspraktischer und LCA-praktischer Expertise entwickelt. Es wird eine Möglichkeit zur durchgängigen, planungsbegleitenden Bereitstellung von LCA-Informationen in Verbindung mit vorhandenen BIM-Daten aufgezeigt. Dabei wurde ein mehrstufiges, typologiebasiertes Verfahren auf die Merkmale der frühen Planungsphasen abgestimmt.

LCA-Informationen können mit dem vorgestellten typologiebasierten Ansatz bereits niederschwellig in frühen Planungsphasen bei der Beurteilung und Auswahl von Varianten eingesetzt werden.

Zur Evaluierung des Ansatzes soll ein bestehendes Gebäude modelliert und bilanziert werden. Insbesondere sollen die Zwischenergebnisse für alle Detaillierungsstufen der Phasen 1 bis 4 ausgewertet werden, um jeweils die Abweichungen zwischen der stufenweisen Annäherung und den bisher für die Gebäude-

zertifizierung erforderlichen Berechnungen überprüfen zu können. Die Evaluierung des Ansatzes ist im Rahmen des Projektes bis 09/2019 vorgesehen.

DANKSAGUNG

Das diesem Beitrag zugrunde liegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 03ET1466A gefördert.

LITERATUR

- Alda, W., Hirscher, J. 2016. Projektentwicklung in der Immobilienwirtschaft, 6. Aufl., Wiesbaden, Springer Vieweg.
- Bundesamt für Konjunkturfragen (Hrsg.) 1986. Haustechnik in der Integralen Planung, Band A, Bern, EDMZ.
- Dörner, D. 1979. Problemlösen als Informationsverarbeitung, 2. Aufl., Stuttgart, Kohlhammer.
- Rexroth, K., von Both, P. 2014. Planungsprozessmodelle: Synthese und Übertragbarkeit für den Anwendungskontext energieeffiziente Stadt. In: Koch, M., McKenna, R. (Hrsg.): Wettbewerb Energieeffiziente Stadt, Band 3, Methoden und Modelle, Berlin, LIT Verlag, S. 51-60.
- Kreißig, J. 2013. Gebäudeökobilanzen im Zertifizierungsprozess, BAU 2013, München.
- Neuberg, F. 2004. Ein Softwarekonzept zur internet-basierten Simulation des Ressourcenbedarfs von Bauwerken, Dissertation, TU München.
- RBBau 2017. Richtlinie für die Durchführung von Bauaufgaben des Bundes, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz Bau und Reaktorsicherheit.
- Schmitz, H., Gerlach, R., Meissel, U. 2015. Baukosten 2014/15, Preiswerter Neubau von Ein- und Mehrfamilienhäusern, 20. Aufl., Essen, Wingen.
- Schönwandt, W. 2002. Planung in der Krise?, Stuttgart, Kohlhammer.
- XIA 2010. Solidar Planungswerkstatt Berlin, XIA Intelligente Architektur, Heft 07-09/2011, S. 50-51.

METAMODELLIERUNG VON KLÄRANLAGEN

H. Söbke¹, E. Tauscher¹ und K. Smarsly¹

¹Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, Germany
{heinrich.soebke|eike.tauscher|kay.smarsly}@uni-weimar.de

KURZFASSUNG

Building Information Modeling (BIM) steigert die Effizienz von Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken. Voraussetzung für eine BIM-basierte Nutzung von Bauwerksinformationen über den Lebenszyklus eines Bauwerks ist ein standardisiertes Datenformat, wie die Industry Foundation Classes (IFC). Obwohl die IFC digitale Beschreibungen von Bauwerksinformationen ermöglichen, die für weite Teile der Bauindustrie (z.B. Gebäude und Infrastruktur) relevant sind, werden Kläranlagen von den IFC nicht ausreichend unterstützt. Dieser Artikel stellt ein Metamodell, d.h. ein semantisches Datenmodell, vor, das zur Beschreibung von Kläranlagen auf IFC-Basis genutzt werden kann. Das semantische Datenmodell, das nach Standards für die deutsche Abwasserinfrastruktur entwickelt wurde, kann als Grundlage einer Kläranlagenspezifischen Erweiterung des IFC-Schemas dienen und somit BIM-basierte Planung, Bau und Betrieb von Kläranlagen befördern.

ABSTRACT

Building information modeling (BIM) advances the efficiency of planning, construction, and operation of buildings. A prerequisite for life cycle use of building information is a standardized data format, such as the Industry Foundation Classes (IFC). Although the IFC enable digital descriptions of information relevant to large parts of the construction industry, wastewater treatment plants are not sufficiently supported by the IFC. This paper presents a metamodel, i.e. a semantic data model, for describing wastewater treatment plants. The semantic data model, which has been developed following German standards for wastewater infrastructure, may

serve as a basis for domain-specific extensions of the IFC schema with entities relevant to describing wastewater treatment plants, enabling BIM-based collaborative planning and reliable information exchange of wastewater treatment plants.

EINLEITUNG

Kläranlagen sind komplexe Ingenieurbauwerke, für deren Planung und Betrieb unterschiedliche Prozesse aus den Bereichen Strömungsmechanik, Mikrobiologie und Chemie zu berücksichtigen sind. Planung und Betrieb von Kläranlagen erfordern deshalb eine enge Zusammenarbeit von Planern verschiedener Fachrichtungen. Effektives und zuverlässiges Informationsmanagement, einschließlich Erfassung, Speicherung und digitalem Austausch von Informationen, ist für die erfolgreiche Planung und den erfolgreichen Betrieb von Kläranlagen unerlässlich. Building Information Modeling (BIM) ist ein Konzept, das sich als integriertes Informationsmanagement-Tool in der Bauindustrie etabliert hat, um Informationen über den gesamten Lebenszyklus von Bauwerken zu speichern und auszutauschen (Azhar, 2011). Einhergehend mit der fortschreitenden Digitalisierung von Bauprozessen ist BIM zu einem zentralen Bestandteil für die Planung und den Betrieb von Bauwerken geworden (BMVI, 2015, 2017).

Building Information Modeling kann in *Closed BIM* und *Open BIM* unterteilt werden. *Closed BIM* zeichnet sich durch eine BIM-Umgebung aus, in der ein proprietäres BIM-Softwarepaket von allen Beteiligten verwendet wird. Ein Beispiel für *Closed BIM* im Bereich der Abwasserbehandlung ist die Erweiterung der Kläranlage

Liverpool (Bezant, 2017). Bei der Planung der Kläranlage Liverpool wurden rund 400 digitale Modelle von allen am Planungsprozess beteiligten Planern mit Hilfe einer zentralen Software gekoppelt. Eine sogenannte „BIM-Station“, die die Zusammenarbeit unterstützt, ermöglicht es den Planern, durch die Modelle zu navigieren. Open BIM hingegen basiert auf nicht-proprietären, neutralen Datenformaten, d.h. auf standardisierten BIM-Datenformaten, die den Informationsaustausch unabhängig von spezifischen BIM-Softwarepaketen ermöglichen. So kann jedes BIM-Softwarepaket, das in der Lage ist, Informationen in standardisierten BIM-Datenformaten zu verwalten, für Open BIM-Projekte genutzt werden. Derzeit sind das einzige standardisierte BIM-Datenformat die Industry Foundation Classes (IFC). Die IFC sind weithin als Norm anerkannt, namentlich von der Internationalen Organisation für Normung (ISO), dem Deutschen Institut für Normung (DIN) und dem Europäischen Komitee für Normung (DIN, 2017). Der IFC-Standard wird durch ein Datenschema, dem sogenannten IFC-Schema, beschrieben.

Seit ihrer Einführung wurden die IFC in verschiedene Richtungen erweitert, z.B. zur Beschreibung von Brücken (Amann & Borrmann, 2016) oder zur Integration von Informationen über Sensorkomponenten (Legatiuk u.a., 2017; Smarsly u.a., 2017). Auch wird über die IFC-basierte Beschreibung von Bauwerksinformationen berichtet, die im Rahmen von Bauwerksmonitoring-Ansätzen ermittelt werden (Theiler u.a., 2017; Theiler & Smarsly, 2018). Obwohl die IFC bereits in vielen Disziplinen zur Beschreibung von Gebäuden und Infrastrukturbauwerken etabliert sind, ist die IFC-basierte Beschreibung von Kläranlagen bisher nur rudimentär möglich. Planung, Bau und Betrieb von Kläranlagen werden durch das aktuelle IFC-Schema (IFC4) nicht mit fachspezifischen Informationen unterstützt. Aus diesem Grund existiert bisher kein Open BIM-Ansatz für Planung und Betrieb von Kläranlagen.

Als Vorarbeit eines Open BIM-Ansatzes wird in diesem Artikel ein semantisches Datenmodell zur Beschreibung von Kläranlagen vorgestellt. Das semantische Datenmodell ist auf die Bemessung von Kläranlagen ausgerichtet, einem Teilaspekt bei der Planung von Kläranlagen. Hierbei dient die Bemessung einer ausgewählten Kläranlagekomponente – das Nachklärbe-

cken – als anschauliches Beispiel. Das semantische Datenmodell ist die Grundlage für eine IFC-Schemaerweiterung, die notwendig für die Anwendung des BIM-Konzepts auf Planung, Bau und Betrieb von Kläranlagen ist. Dieser Artikel ist wie folgt aufgebaut. Im nächsten Abschnitt wird die Entwicklung des semantischen Datenmodells beschrieben, wobei ein besonderer Schwerpunkt auf die bemessungsrelevanten Informationen für das Nachklärbecken gelegt wird. Anschließend wird ein konzeptueller Rahmen für die Implementierung des semantischen Datenmodells in das IFC-Schema vorgestellt (IFC-Schemaerweiterung). Schließlich werden mögliche zukünftige Arbeiten diskutiert, gefolgt von einer Zusammenfassung der hier vorgestellten Studie.

EIN SEMANTISCHES DATENMODELL ZUR BESCHREIBUNG VON KLÄRANLAGEN

In diesem Abschnitt wird das semantische Datenmodell zur Beschreibung von Kläranlagen vorgestellt. Zunächst wird der Umfang des semantischen Datenmodells definiert. Anschließend werden die Quellen diskutiert, die als Grundlage für das semantische Datenmodell dienen. Danach wird das semantische Datenmodell dargestellt und am Beispiel der Bemessung des Nachklärbeckens vertieft. Die Bemessung von Kläranlagen zielt u.a. auf die Berechnung von Beckengrößen und Pumpenleistungen ab. Die Bemessung erfolgt für jede der Kläranlagekomponenten, die in einem sogenannten „Fließschema“ dargestellt sind, einer schematischen Beschreibung des Abwasserstroms durch alle Kläranlagenkomponenten, vom Zulauf bis zum Ablauf. Das Nachklärbecken ist im Fließschema nahezu am Ende positioniert. Im Nachklärbecken werden aufbereitetes Wasser und Schlamm, die Reststoffe der vorherigen biologischen Reinigungsprozesse, voneinander getrennt. Der Schlamm setzt sich auf dem Boden des Beckens ab, und das gereinigte Wasser passiert den Überlauf des Beckens. Im Fließschema unmittelbar vor dem Nachklärbecken ist das Belebungsbecken angeordnet, in dem die biologischen Reinigungsprozesse ablaufen. Ein Teil des im Nachklärbecken anfallenden Schlammes wird zur Unterstützung der biologischen Reinigungsprozesse in das Belebungsbecken zurückgeführt (Rücklaufschlamm). In einer Verfahrensvariante erfolgt die Rückführung über

ein sogenanntes anaerobes Mischbecken. Die Bemessung des Nachklärbeckens ist mit der Bemessung des Belebungsbeckens und – abhängig von der Verfahrensvariante – ggf. auch mit der Bemessung des anaeroben Mischbeckens abzustimmen.

Quellen für die semantische Modellierung von Kläranlagen

Die Qualität eines semantischen Datenmodells hängt in erster Linie von der Qualität und der Quantität der Quellen ab, die zur Definition des semantischen Datenmodells herangezogen werden. Deshalb werden in diesem Abschnitt die zur Definition des semantischen Datenmodells nutzbaren Quellen erläutert.

Standardisierte Datenformate sind Kandidaten für zuverlässige Quellen, da standardisierte Datenformate, die als formale Ergebnisse von Standardisierungsprozessen betrachtet werden können, semantische Informationen enthalten. Eine Übersicht über standardisierte Datenformate für die Wasserinfrastruktur stellen Ackermann und Bock (2017) bereit. Sie unterteilen die Datenformate abhängig von der räumlichen Ausdehnung der abzubildenden Informationen in makroskopisch, mesoskopisch und mikroskopisch anwendbare standardisierte Datenformate. Ein makroskopisch anwendbarer Standard ist durch die INSPIRE-Richtlinie gegeben (Europäisches Parlament und der Rat der Europäischen Union, 2007). Hier sind georeferenzierte Informationen für das Gebiet der Europäischen Union bereitzustellen. Ein Beispiel eines Standards auf mesoskopischer Ebene ist das ISYBAU-Datenformat (BMUB, 2013), das auf die Beschreibung von Kanalisationssystemen einer Ortslage ausgerichtet ist. Auf mikroskopischer Ebene siedeln Ackermann und Bock als einziges standardisiertes Datenformat die IFC zur Umsetzung von Open BIM an. Ackermann und Bock weisen jedoch darauf hin, dass die IFC in der Wasserwirtschaft noch nicht anwendbar sind. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es keine standardisierten Datenformate gibt, die für die Definition eines semantischen Datenmodells von Kläranlagen verwendet werden können.

Weitere Quellen zur Definition des semantischen Datenmodells sind Standards für die Abwasserinfrastruktur. Die Deutsche Vereinigung für Wasser, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) ist

für die Abwasserinfrastruktur in Deutschland zuständig und stellt Standards für die Planung, den Bau und die Instandhaltung von Abwasserinfrastruktur bereit. Ein für die Definition des semantischen Datenmodells relevanter Standard ist das DWA-Arbeitsblatt A 131 (DWA, 2016). Das Arbeitsblatt A 131 beschreibt die „Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen“. Darüber hinaus verweist das Arbeitsblatt A 131 auf die Vorgaben des Arbeitsblattes A 198 (ATV-DVWK, 2003a). Deshalb werden in dieser Studie das Arbeitsblatt A 131 und das Arbeitsblatt A 198 als Quellen zur Definition des semantischen Datenmodells herangezogen. Zusätzlich zu diesen Standards werden Ergebnisse von Normungsprozessen als Quellen genutzt, wie z.B. die deutsche Norm DIN 4261 (DIN, 2010) und die von der DWA vorgeschlagene Norm A 222 (DWA, 2011). Neben Datenformaten und Standards werden auch Medien der Aus- und Weiterbildung als Quellen für das semantische Datenmodell betrachtet (Weiterbildendes Studium „Wasser und Umwelt“, Bauhaus-Universität Weimar, 2006).

Semantisches Datenmodell zur Beschreibung von Kläranlagen

In diesem Abschnitt wird das semantische Datenmodell für Kläranlagen vorgestellt, das am Beispiel der Bemessung von Nachklärbecken vertieft wird. Im semantischen Datenmodell werden alle Informationen beschrieben, die benötigt werden, um die notwendigen Größen von Kläranlagenbauwerken und die Kapazitäten der technischen Ausrüstungen zu bestimmen. Mit Hilfe der objektorientierten Analyse (Booch u.a., 2007) werden Klassen und Attribute aus den Quellen identifiziert. Klassen und Attribute werden mit englischen Fachbegriffen benannt, da Englisch die für das IFC-Schema genutzte Sprache ist. Als Quellen zur Ermittlung der korrekten englischen Fachbegriffe werden insbesondere die englischen Übersetzungen der DWA-Arbeitsblätter genutzt (ATV-DVWK, 2003b; DWA, 2000). Abbildung 1 zeigt die Hauptklassen des semantischen Datenmodells als UML-Klassendiagramm mit zwei allgemeinen Klassen. Die Klasse `Structure` umfasst alle Bauwerke von Kläranlagen, und die Klasse `TechnicalEquipment` ist die Oberklasse für alle technischen Ausrüstungen von Kläranlagen, wie Pumpen und Rührwerke.

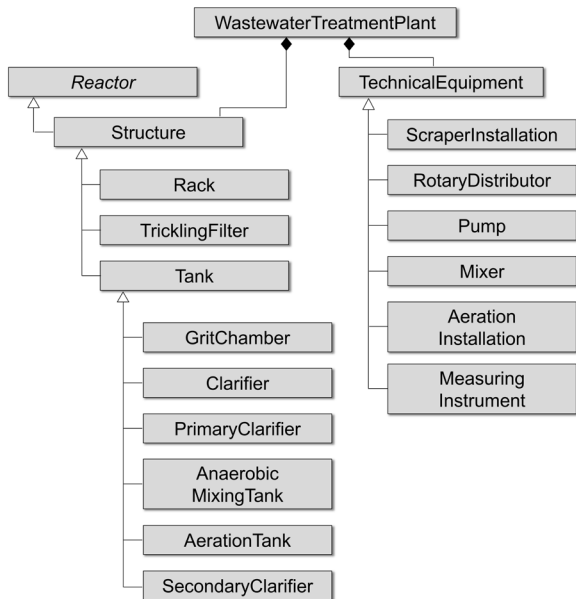


Abbildung 1: Klassendiagramm des semantischen Datenmodells zur Beschreibung von Kläranlagen.

Neben Klassen für Kläranlagen werden auch Parameter für die Bemessung von Kläranlagen in das semantische Datenmodell aufgenommen. Die Parameter werden in Form von Attributen der entsprechenden Klassen dargestellt. Die abstrakte Klasse *Reactor* beschreibt die Sicht eines Beckens als Prozessraum: *Reactor* enthält die bezüglich Reinigungsprozessen relevanten Parameter eines Beckens. Wie bereits erwähnt, erfolgt die Bemessung der drei Becken aufgrund der Wechselbeziehung von Nachklärbecken, Belebungsbecken und anaeroben Mischbecken aufeinander abgestimmt, d.h. iterativ, bis Abbruchbedingungen erfüllt sind. Abbildung 2 zeigt exemplarisch die Attribute der Klasse *SecondaryClarifier*, die das Nachklärbecken repräsentiert. *SecondaryClarifier* ist eine Unterklasse der Klasse *Tank*. Die Klasse *Tank*, die Oberklasse der verschiedenen Beckentypen von Kläranlagen ist, ist wiederum eine Unterklasse der Klasse *Structure*. Deshalb sind die Attribute von *Structure* und *Tank* über den Mechanismus der Vererbung in der Klasse *SecondaryClarifier* nutzbar. Die Attribute – namentlich sind dies *populationEquivalent*, *combinedWaterInflow*, *dryWeatherInflow*, *volume* und *surface* – beschreiben Parameter, die allgemein für die Bemessung von Kläranlagenkomponenten genutzt werden.

Zu den für die Bemessung von Nachklärbecken wichtigsten Attributen gehören Parameter, die

- Planungsanforderungen definieren (z.B. *populationEquivalent* und *combinedWaterInflow* bestimmen die technische Kapazität, für die eine Kläranlage zu bemessen ist),
- Entwurfsentscheidungen beschreiben (z.B. *geometry* ist ein abgeleitetes Attribut, das die Grundform und damit die Fließeigenschaften von Nachklärbecken beschreibt)
- und Berechnungsgrundlagen dokumentieren (z.B. *sludgeVolumeIndex* beschreibt die Schlammkonsistenz).

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden einige Attribute von anderen Klassen gespiegelt. So bezieht sich z.B. *operationModeDenitrifikation* auf eine technische Funktion des Belebungsbeckens, die sich (indirekt) auf die Bemessung des Nachklärbeckens auswirkt. Tabelle 1 fasst die Attribute der Klasse *SecondaryClarifier* zusammen.

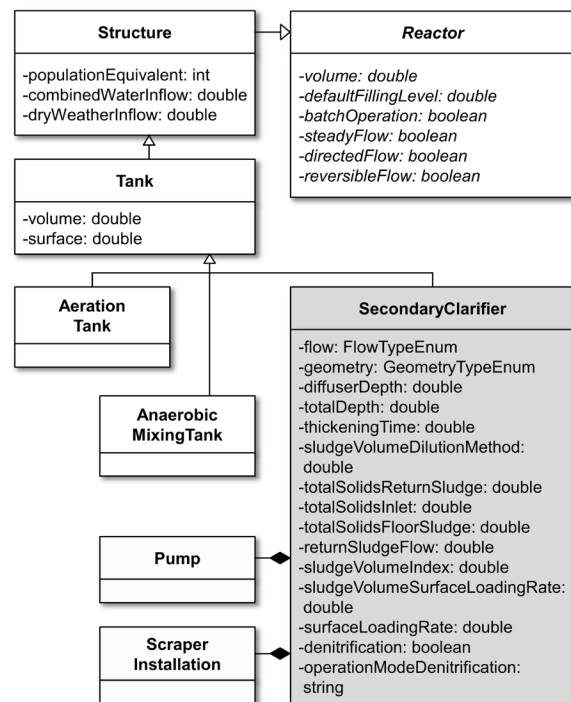


Abbildung 2. Auszug aus der Klasse *SecondaryClarifier* im semantischen Datenmodell.

ANSATZ ZUR ERWEITERUNG DES IFC-SCHEMAS

Um Kläranlagen mit dem IFC-Standard auch für eine Bemessung umfassend beschreiben zu können, wird eine IFC-Schemaerweiterung vorgeschlagen, die dem IFC-Schema Informationen

zur Bemessung von Kläranlagen hinzufügt. Es sei darauf hingewiesen, dass als Alternative zur Erweiterung des IFC-Schemas generische Erweiterungsmechanismen, wie benutzerdefinierte Proxy Elements (Proxyelemente), Object Type Definitions (Objekttypen) und Property Sets (Merkmalslisten), zur Beschreibung von Kläranlagen verwendet werden können (Smarsly u.a., 2017). Abbildung 3 zeigt exemplarisch eine BIM-Visualisierung der Attribute der Klasse `SecondaryClarifier`, die durch ein benutzerdefiniertes Property Set definiert sind. Die Verwendung generischer Erweiterungsmechanismen kann jedoch zu einem Verlust von semantischen Informationen führen (Theiler u.a., 2017). Deshalb wird in dieser Studie anstelle von generischen Erweiterungsmechanismen eine IFC-Schemaerweiterung zur Beschreibung von Kläranlagen verfolgt. Bei der Erweiterung des IFC-Schemas um kläranlagenrelevante Informationen können einige Klassen des semantischen Datenmodells von Kläranlagen über IFC-Entitäten implementiert werden, die bereits im aktuellen IFC-Schema vorhanden sind (z.B. `IfcPump` und `IfcFooting`). Für andere Klassen des semantischen Datenmodells (z.B. `ScraperInstallation` und `RotaryDistributor`) müssen neue IFC-Entitäten definiert werden.

DISKUSSION UND ZUKÜNFTIGE ARBEITEN

Die Standards der DWA, die als wesentliche Quellen für die Erstellung des semantischen Datenmodells (und der IFC-Schemaerweiterung) dienen, beschreiben die Besonderheiten der deutschen Abwasserinfrastruktur. Generell ist jedoch davon auszugehen, dass die Informationen der DWA-Standards zum überwiegenden Teil landesunabhängig anwendbar sind. Dennoch sind weitere Quellen zu integrieren, um die fachliche Basis für das semantische Datenmodell sowohl in fachlicher als auch internationaler Hinsicht zu verbreitern. Zu den weiteren zu betrachtenden Quellen sind die Norm DIN SPEC 91400 (Schiller u.a., 2017), der internationale Quasi-Standard von Metcalf & Eddy Inc (2014) und das Datenformat Xanadu (Datenaustauschformat für die Abwasserwirtschaft) (Schütze u.a., 2004) zu zählen. Auch Softwarepakete werden als Quellen betrachtet, wie die Softwarepakete `design2treat` (ISA – RWTH Aachen, 2017) und `Belebungs-Expert` (Fröse, 2017), die De-Facto-

Tabelle 1: Ausgewählte Attribute der Klasse `SecondaryClarifier`

Attribute (Datentyp)	Beschreibung (Wert/Einheit)
<code>flow</code> (FlowTypeEnum)	Die Art der Durchströmung muss mit der Geometrie der Nachklärbecken abgestimmt sein. (Vertical/horizontal)
<code>geometry</code> (GeometryTypeEnum)	Die Grundform des Nachklärbeckens wirkt sich auf die Bemessung aus, da sie die Fließeigenschaften bestimmt. (Round/Rectangular)
<code>diffuserDepth</code> (double)	Tiefe des Einlasses in das Becken. (m)
<code>totalDepth</code> (double)	Tiefe des Beckens bei 2/3 des Radius. (l/m ³)
<code>thickeningTime</code> (double)	Die Zeit, die für die Eindickung des Schlammes benötigt wird, bis die für die Weiterverarbeitung notwendige Konsistenz erreicht ist. (h)
<code>sludgeVolumeDilutionMethod</code> (double)	Produkt aus Schlammvolumenindex (<code>sludgeVolumeIndex</code>) und Gesamtfeststoffgehalt des Rücklaufschlammes (<code>totalSolidsReturnSludge</code>). (l/m ³)
<code>totalSolidsReturnSludge</code> (double)	Trockensubstanzgehalt des Rücklaufschlammes. (kg/m ³)
<code>totalSolidsInlet</code> (double)	Trockensubstanzgehalt des Zulaufstroms. (kg/m ³)
<code>totalSolidsFloorSludge</code> (double)	Trockensubstanzgehalt des Bodenschlammes. (kg/m ³)
<code>returnSludgeFlow</code> (double)	Die Menge an Rücklaufschlamm, die vom Nachklärbecken zurück ins Belebungsbecken (oder in das anaerobe Mischbecken) geleitet wird. (m ³ /h)
<code>sludgeVolumeIndex</code> (double)	Maßzahl zur Beschreibung des Absetzverhaltens des Schlammes. (l/kg)
<code>SurfaceLoadingRate</code> (double)	Die Flächenbeschickung hängt von der Funktion des Beckens sowie der Durchflusszeit ab. Sie ist der Quotient aus dem Beckenzufluss und der Beckenoberfläche. (m/h)
<code>sludgeVolumeSurfaceLoadingRate</code> (double)	Die Oberflächenbeschickung ist der Quotient aus Regenwetterzufluss und zulässiger Flächenbeschickung. (l/(m ² h))
<code>Denitrification</code> (boolean)	Zeigt an, ob im vorgeschalteten Belebungsbecken eine Denitrifikation vorgenommen wird. Diese hat Einfluss auf die Bemessung des Nachklärbeckens. (Yes/No)
<code>OperationModeDenitrification</code> (String)	Art der Denitrifikation im Belebungsbecken.

Standards für die Bemessung von Kläranlagen sind. Die Bemessung eines Nachklärbeckens wurde als Beispiel eines in Gänze nicht im IFC-Schema beschriebenen Aspektes einer Kläranlage gewählt. Das Beispiel ist als übertragbar auf die weiteren noch zu beschreibenden Aspekte anzusehen.

Ein organisatorischer Rahmen einer IFC-Schemaerweiterung kann von buildingSMART, der das IFC-Schema betreuenden Organisation, in Form einer Arbeitsgruppe bereitgestellt werden. Für die semantische Modellierung sollten dann – im Unterschied zur hier durchgeführten prototypischen Modellierung – die durch buildingSMART etablierten Methoden zur IFC-Schemaerweiterung, wie Business Process Model and Notation genutzt werden. Als Ergebnisse sind ein Information Delivery Manual sowie ein Data Dictionary bereitzustellen. Der konzeptuelle Rahmen zur Implementierung des semantischen Datenmodells in das IFC-Schema ist weiter zu verfeinern. Da das semantische Datenmodell zur Beschreibung aller Kläranlagenkomponenten entlang des Fließschemas entwickelt wurde, erscheint das IFC-Konzept des Port Nestings, das die Modellierung von Stoffströmen durch verbundene IFC-Entitäten ermöglicht, für IFC-basierte Beschreibungen von Kläranlagenkomponenten geeignet. Gleichfalls ist zu prüfen, wie das Konzept der Model View Definitions (MVD) für die IFC-basierte Beschreibung von Kläranlagen verwendet werden kann. Die Bemessung einer Kläranlage ist nur einer von vielen Aspekten des semantischen Datenmodells, für die zu klären ist, ob sie jeweils in einer eigenen MVD abgebildet werden.

Da Änderungen am IFC-Schema einen zeitaufwändigen Standardisierungsprozess erfordern, ist das IFC-Schema als eher starr anzusehen. Obwohl die Wasserwirtschaft technologisch stabil ist, sind technische Veränderungen nach wie vor üblich. So wird unter anderem in der Fachwelt diskutiert, Kläranlagen um eine weitere Komponente, die sogenannte „vierte Reinigungsstufe“, zu ergänzen, um beispielsweise Mikroschadstoffe, wie Rückstände von Pharmazeutika und Körperpflegemitteln, zu eliminieren.

Die hierfür notwendigen technischen Änderungen müssten auf die zugrundeliegenden Datenformate abgebildet werden, was weitere Erweiterungen des IFC-Schemas mit sich bringen würde.

ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Beschreibung von Kläranlagen mit standardisierten BIM-Datenformaten beschränkt sich derzeit auf grundlegende Bauwerksinformationen, wie Geometrien und Materialien, unterstützt jedoch nicht die BIM-basierte kollaborative Planung sowie Bau und Betrieb.

Dieser Artikel hat ein Metamodell, d.h. ein semantisches Datenmodell, zur Beschreibung von Kläranlagen und einen konzeptuellen Rahmen für die Implementierung des semantischen Datenmodells in das IFC-Schema vorgestellt. Zur Veranschaulichung ist das semantische Datenmodell auf die Bemessung von Nachklärbecken fokussiert und wurde unter Verwendung zuverlässiger Wissensquellen, wie z.B. der DWA-Standards A 131 und A 198 zur Bemessung von Kläranlagen, entwickelt. Der vorgeschlagene konzeptuelle Rahmen für die Implementierung des semantischen Datenmodells in das IFC-Schema umfasst neue IFC-Entitäten, wie z.B. *ScrapperInstallation*. Es wird davon ausgegangen, dass das vorgeschlagene semantische Datenmodell und der konzeptionelle Rahmen für die Implementierung des semantischen Datenmodells in das IFC-Schema die BIM-basierte kollaborative Planung und den zuverlässigen Informationsaustausch für Planung, Bau und Betrieb von Kläranlagen maßgeblich mitbestimmen wird. Die hier beschriebene wissenschaftliche Herangehensweise zur Erstellung des semantischen Datenmodells bis hin zur Implementierung des semantischen Datenmodells in das IFC-Schema ist auf andere Prozessanlagen, wie Biogasanlagen, übertragbar.

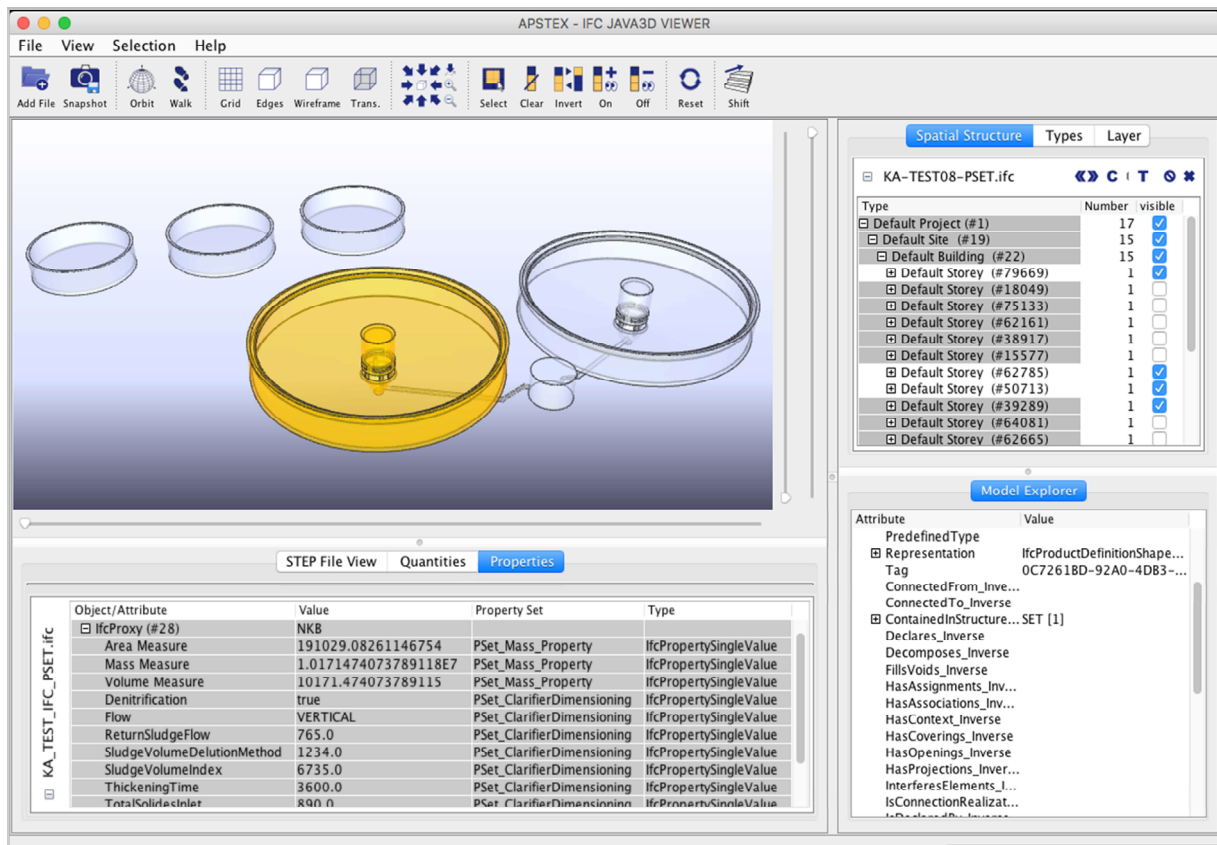


Abbildung 3. Visualisierung eines Nachklärbeckens-Modells unter Nutzung von benutzerdefinierten Property Sets (APSTEX, 2017).

DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Fördervereinbarung FKZ 01IS17007C. Dankenswerterweise wurde diese Arbeit teilweise auch von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Projekts mit dem Geschäftszeichen SM 281/7-1 unterstützt. Abschließend möchten sich die Autoren bei Dr. Martin Armbruster und Dr. André Spindler von der hydrograv GmbH (Dresden, Deutschland) bedanken, deren wertvolle Ratschläge und Anregungen ebenfalls gewinnbringend aufgenommen wurden. Die in diesem Artikel zum Ausdruck gebrachten Ansichten sind die der Autoren und spiegeln nicht unbedingt die Meinungen der oben genannten Institutionen wider.

LITERATUR

Ackermann, Y. & Bock, B. (2017). Datenstandards in der Wasserwirtschaft: Von der makroskopischen zur mikroskopischen Abbildung. In: BWK Seminar, Mainz, 27. April 2017.

APSTEX (2017). IFC TOOLS Project. Abgerufen 11.11.2017, von <http://www.ifctoolsproject.com/>

ATV-DVWK (2003a). Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 198 Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen. ATV-DVWK-Regelwerk. Hennef: DWA.

ATV-DVWK (2003b). STANDARD ATV-DVWK-A 198E Standardisation and Derivation of Dimensioning Values for Wastewater Facilities. ATV-DVWK-RULES AND STANDARDS. Hennef: DWA.

Azhar, S. (2011). Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. *Leadership and Management in Engineering*, 11(3), 241–252.

BMUB (2013). ISYBAU-Austauschformate Abwasser, Arbeitshilfen Abwasser. Abgerufen 19.09.2017, von http://www.arbeitshilfen-abwasser.de/html/ISYBAU_Austauschformate_Abwasser.14.08.html

BMVI (2015). Stufenplan Digitale Planen und Bauen. Abgerufen 17.1.2018, von <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publik>

- ationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.pdf?__blob=publicationFile
- BMVI (2017). Strategiepapier Digitale Souveränität: Innovationsführerschaft beim digitalen Planen und Bauen übernehmen. Abgerufen 27.9.2017, von https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage-/Digitales/strategiepapier-masterplan-bauen.pdf?__blob=publicationFile
- Booch, G., Maksimchuk, R. A., Engle, M. W., Young, B. J., Conallen, J. & Houston, K. A. (2007). *Object-Oriented Analysis and Design with Applications* (3. Auflage). Addison-Wesley Professional.
- DIN (2010). DIN 4261-1:2010-10 Kleinkläranlagen – Teil 1: Anlagen zur Schmutzwasservorbehandlung.
- DWA (2000). STANDARD ATV-DVWK-A 131E Dimensioning of Single-Stage Activated Sludge Plants. Hennef: DWA.
- DWA (2011). Arbeitsblatt DWA-A 222 Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von kleinen Kläranlagen mit aerober biologischer Reinigungsstufe bis 1.000 Einwohnerwerte. Hennef: DWA.
- DWA (2016). Arbeitsblatt DWA-A 131 Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Hennef: DWA.
- Europäisches Parlament und der Rat der Europäischen Union (2007). RICHTLINIE 2007/2/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft (INSPIRE).
- Fröse, G. (2017). Belebungs-Expert. Bemessung und Nachrechnung von Belebungsanlagen nach dem DWA-Arbeitsblatt A-131. Abgerufen 17.10.2017, von http://software.gfroese.de/bx_detail.html
- ISA – RWTH Aachen (2017). design2treat. Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISA) der RWTH Aachen: Abgerufen 14.12.2017, von <http://www.design2treat.de/>.
- Amann, J. & Borrmann, A. (2016). Embedding Procedural Knowledge into Building Information Models: The IFC Procedural Language and Its Application for Flexible Transition Curve Representation. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 30(5). doi: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000592.
- Legatiuk, D., Theiler, M., Dragos, K. & Smarsly, K. (2017). A categorical approach towards metamodeling cyber-physical systems. In: *The 11th International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM)*. Stanford, CA, USA, 12.12.2017.
- Metcalf & Eddy Inc. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. (G. Tchobanoglous, H. D. Stensel, R. Tsuchihashi, & F. Burton, Hrsg.) (5. Ausgabe). New York, USA: McGraw-Hill Education.
- Schiller, K., Hubert, M., Aengenvoort, K., Scharmman, R., Heuer, F. & Faschingbauer, G. (2017). DIN SPEC 91400:2017-02 Building Information Modeling (BIM) – Classification according to STLB-Bau; Text in German and English. Berlin, Deutschland: Beuth-Verlag
- Schütze, M., Alex, J. & Ogurek, M. (2004). An XML-based format for data exchange in the wastewater industry. In: *2nd IWA Conference on Automation in Water Quality Monitoring (AutMoNet)*; Vienna, Austria, 19./20.4.2004 (S. 125–132).
- Smarsly, K., Theiler, M. & Dragos, K. (2017). IFC-based modeling of cyber-physical systems in civil engineering. In: *Proceedings of the 24th International Workshop on Intelligent Computing in Engineering*, Nottingham, United Kingdom, 10.7.2017.
- Theiler, M., Dragos, K. & Smarsly, K. (2017). BIM-based design of structural health monitoring systems. In: *The 11th International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM)* Stanford, CA, USA, 12.9.2017.
- Theiler, M. & Smarsly, K. (2018). IFC Monitor – An IFC extension for modeling structural health monitoring systems. *Advanced Engineering Informatics*, 37(2018), 54-65.
- Weiterbildendes Studium „Wasser und Umwelt“, Bauhaus-Universität Weimar (2006). *Abwasserableitung: Bemessungsgrundlagen, Regenwasserbewirtschaftung, Fremdwasser, Netzsanierung, Grundstücksentwässerung* (2. Auflage). Weimar: Bauhaus-Universität Weimar Verlag.

ENTWICKLUNG EINER SCHNITTSTELLE ZWISCHEN BIM-MODELLEN UND THERMISCH-ENERGETISCHEN GEBÄUDESIMULATIONEN

J. Taraben¹, A. Benz², G. Morgenthal¹ und C. Völker²

¹ Professur Modellierung und Simulation - Konstruktion, Bauhaus-Universität Weimar

² Professur Bauphysik, Bauhaus-Universität Weimar

E-Mail: jakob.taraben@uni-weimar.de

ABSTRACT

Durch die Anwendung des Building Information Modeling (BIM) können Gebäudemodelle konsistent über den Lebenszyklus abgebildet werden und über standardisierte Übergabeformate, wie die Industry Foundation Classes (IFC), an externe Anwendungen übergeben werden. Bestehende Lösungen zur Übertragung von Bauwerksinformationen an thermisch-energetische Gebäudesimulationen weisen häufig Probleme hinsichtlich der verlustfreien Übertragung auf oder sind auf ausgewählte Softwares beschränkt. Zur Behebung dieser Probleme wurde von den Autoren eine Methode entwickelt, welche die thermisch-energetische Gebäudesimulation auf Basis des IDF (Intermediate Data Format) mit dem standardisierten IFC-Format über ein einfaches internes Modell verknüpft. Dabei kann das Bauwerksmodell mit allen nötigen geometrischen und bauphysikalischen Informationen angereichert und an die Gebäudesimulation übergeben werden.

The application of building information modeling (BIM) enables the consistent representation of building-models over the whole life-cycle. These models can be transferred to external applications by using standardised formats for the data-transfer, such as the Industry Foundation Classes (IFC). Existing solutions for the transfer of building-information often show problems regarding the lossless transfer or are limited to certain software. To remove these problems, the authors developed a method which connects the thermal-energetic building-simulation based on the IDF (Intermediate Data Format) with the standardised IFC-format by a simple internal model. In this process, the building-model can be enriched with all necessary geometry and physical information

and can be transferred to the building-simulation.

EINFÜHRUNG

Die Grundlage thermisch-energetischer Gebäudesimulationen stellt immer ein geometrisches und physikalisches Gebäudemodell dar. Die geometrische Modellbildung wird in der Regel individuell basierend auf Bauplänen oder Vor-Ort-Begehungen erstellt und aktualisiert, was mit einem sehr hohen Aufwand in dieser Phase der Modellbildung verbunden ist (Bazjanac, 2001). Des Weiteren werden durch die manuelle Nachmodellierung subjektive Einflüsse in das abgeleitete Gebäudemodell eingebracht (Bazjanac, 2001; Bazjanac, 2008). Die Nutzung von Bauwerksinformationsmodellen (BIM-Modellen) erlaubt es, bereits vorliegende Informationen für die thermisch-energetische Gebäudesimulation zu nutzen und dadurch den Prozess der Modellbildung zu beschleunigen und objektiver zu gestalten. Dabei wird häufig ein fortgeschrittener Detaillierungsgrad der Eingangsmodelle vorausgesetzt, der beispielsweise die Modellierung von Räumen und Bereichen erforderlich macht (Park, 2014). Neben der Informationsübergabe aus dem standardisierten IFC-Format (BuildingSMART, 2018) in das für die thermisch-energetische Gebäudesimulation genutzte Eingabeformat IDF über ein internes Modell besteht zudem die Möglichkeit zur Rückführung der Ergebnisse aus der Simulationsanwendung. Hierdurch wird es möglich, das Bauwerk in bauphysikalischer Hinsicht über den Lebenszyklus zu beschreiben und Änderungen bezüglich eines Ausgangszustands zu bewerten.

Zur Durchführung der beschriebenen Arbeitsweise wurde von den Autoren eine Methode entwickelt, welche durch möglichst

einfache Modellierungskonventionen eine Überführung von IFC in das von der thermisch-energetischen Simulation genutzte IDF über ein internes Datenmodell realisiert. Dabei werden Bauteile, Materialdefinitionen und zusätzliche bauphysikalische Parameter interpretiert. Somit dient die Methode im vorliegenden Artikel als Schnittstelle zwischen IFC und IDF. Bestehende Probleme bei der Informationsübergabe aus dem IFC-Format werden auf diese Weise reduziert. Außerdem bleiben Bauteilbeziehungen zwischen beiden Formaten durch die Verwendung von zugeordneten Bauteil-IDs bestehen und ermöglichen so das einfache Einarbeiten von Modifikationen des Ausgangsmodells.

Am Beispiel eines Referenzobjekts wird die entworfene Schnittstelle erprobt. Vorangegangene Anwendungen einer früheren Version der Schnittstelle zeigten an einem fiktiven Gebäudemodell bereits gute Ergebnisse (Benz et al, 2018). Zudem werden am Referenzobjekt Möglichkeiten zur Optimierung aufgezeigt. Für die thermisch-energetische Gebäudesimulation wird die Software TRNSYS (Thermal Energy System Specialists, 2018) genutzt.

KONZEPT

ALLGEMEINES

Grundlage des Ansatzes ist ein IFC-Modell, welches aus den meisten üblichen CAD-Programmen exportiert werden kann. Dieses wird in das für die thermisch-energetische Simulation benötigte Eingabeformat IDF umgeformt, wobei die Ergebnisse einer solchen Simulation wieder eingelesen werden können. Hierfür werden neben geometrischen Gebäudeinformationen auch direkt verknüpfte Informationen zu Material, Nutzung und bauteilspezifischen Eigenschaften ausgelesen. Mithilfe einer, in der Programmiersprache JAVA implementierten Anwendung, wird dieses IFC-Modell eingelesen. Die äußere Gebäudehülle wird über extrahierte Wandachsen und Geschosshöhen abgeschätzt, mit Materialparametern belegt und in ein internes Datenmodell überführt. Dieses ist ein semantisches Datenmodell, welches Bauteilgeometrien, Materialdefinitionen, Nutzerverhalten, Eingangsparameter für die thermisch-energetische Simulation und

möglicherweise bereits ermittelte Simulationsergebnisse beschreibt. Es dient als Zwischenebene bei der Umformung der IFC in IDF und zum Vergleich mehrerer Simulationen. Das IFC-Modell fungiert dabei als Basis und kann in späteren Bearbeitungsschritten ohne den Verlust von globalen Simulationseinstellungen aktualisiert werden. Import und Export sind somit entkoppelt und können in weiteren Entwicklungen auf andere Formate angewendet werden. Die im Beispiel genutzte Software TRNSYS benötigt für die Durchführung der Berechnungen eine IDF-Datei als Eingabe. Möglicherweise fehlende, aber dennoch benötigte Informationen werden beim ersten Ausführen vom Nutzer ergänzt. Simulationsergebnisse aus entsprechenden Ergebnisdateien können ebenfalls interpretiert werden und ermöglichen dadurch beispielsweise die Beurteilung von Effekten aus baulichen Änderungen. Die entwickelte Methode soll dabei auch für Modelle in frühen Entwurfsstadien, welche noch über einen geringen Detaillierungsgrad verfügen, anwendbar sein. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Geometrieextraktion, welche sich lediglich an Wandgeometrien und nicht an der Definition von Räumen und Zonen orientiert. Außerdem werden Fehlstellen, wie beispielsweise kleine Lücken in der Gebäudehülle, welche bei der Umformung der Formate auftreten können, möglichst automatisch behoben.

GEOMETRISCHE MODELLBILDUNG

Bei der Extraktion von Simulationsmodellen aus IFC werden eine Reihe von geometrischen Annahmen und Konventionen getroffen, wodurch als Ergebnis eine Abschätzung der Gebäudehülle entsteht, welche nicht für präzise Simulationsvorgänge geeignet ist. Das geometrische Modell basiert hierbei auf der thermischen Gebäudehülle, die durch die lückenlose Geometrie der umschließenden Flächen eines Gebäudes beschrieben wird. Eine weitere Unterteilung unter Berücksichtigung der Innenräume wird nicht getroffen, da ausschließlich 1-Zonen-Modelle betrachtet werden. Im entwickelten IFC-Import werden folglich nur die Bauteile Außenwände, Fenster, Dächer und Bodenplatten ausgewertet. In den IFC werden diese durch die Klassen `IfcWall`, `IfcWindow`, `IfcRoof` und `IfcSlab` beschrieben. Zusätzlich zu den geometrischen Bauteilinformationen werden die im IFC-Modell

befindlichen Zugehörigkeiten, wie beispielsweise von Fenstern zu Wänden oder Wänden zu Geschossebenen übernommen. Zur Identifikation der Außenwände wird außerdem der standardmäßig in den Eigenschaften hinterlegte Wert `IsExternal` genutzt. Eine eindeutige Zuordnung der Bauteile in den unterschiedlichen Formaten kann durch die Übertragung der Element-IDs realisiert werden. Abbildung 1 stellt schematisch den Workflow der Umformung von einem IFC-Modell bis zur thermisch-energetischen Simulation dar.

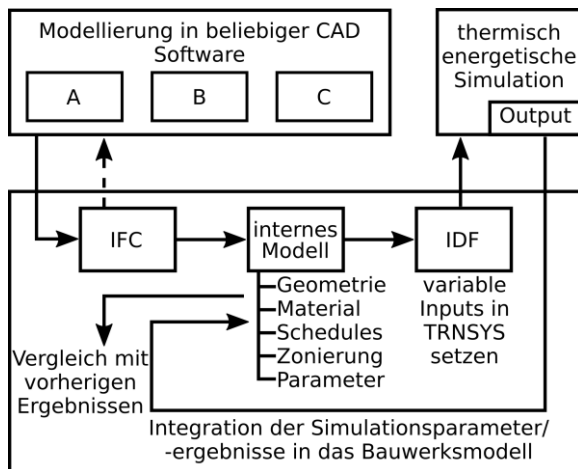


Abbildung 1: Workflow der entwickelten Schnittstelle von der Modellierung des Gebäudemodells über die Anreicherung mit bauphysikalischen Parametern für die thermisch-energetische Simulation bis zur Rückführung und Einordnung der Simulationsergebnisse in das IFC-Modell.

Das interne Modell nutzt für die geometrische Beschreibung der Flächen der Gebäudehülle geschlossene Polygonzüge. Dabei werden während des Imports die im IFC-Modell enthaltenen Volumenkörper zu Flächen vereinfacht. Exemplarisch ist in Abbildung 2 die Umformung eines Wandvolumens auf eine Wandfläche durch die Wandmittelachse dargestellt. Alle anderen Bauteile werden analog vereinfacht. Die Höhen der einzelnen Polygonpunkte beziehen sich dabei auf die jeweils zugehörige Geschosshöhe.

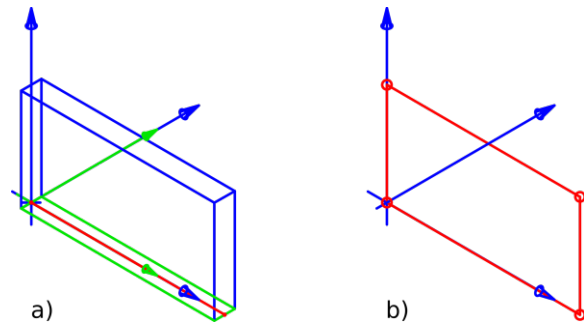


Abbildung 2: Geometrie als Volumenkörper aus IFC (a) und auf Fläche vereinfachte Wandgeometrie im internen Datenmodell (b)

Einige einfache Modellkonventionen müssen bereits das IFC-Modell erfüllen, damit eine fehlerfreie Überführung ermöglicht wird. Dazu gehören die Annahmen, dass (1) die Summe aller Wandachsen eines Geschosses einen geschlossenen Polygonzug ergibt, (2) von Wänden umrandete Flächen vollständig von Dachelementen überdeckt sind, (3) alle Wandhöhen gleich mit den jeweiligen Geschosshöhen sind und (4) eine stimmige semantische Zuordnung der Bauteile zu den IFC besteht. Kleinere nachträgliche Anpassungen, wie das Verschneiden nicht verbundener Wände oder Einfügen fehlender Dachelemente, leistet die entwickelte Software beim Import. Dabei kann auf die zusätzliche Definition von Räumen als thermische Zone im IFC-Modell verzichtet werden, wodurch auch die Nutzung von Modellen ermöglicht wird, die nicht speziell für die Anwendung im Kontext der thermisch-energetischen Gebäudesimulation exportiert wurden.

BAUPHYSIKALISCHE MODELLBILDUNG

Für die Bilanzierung und Bewertung ausgewählter Größen (z.B. zu-/abgeführte Wärmemenge, zeitlicher Temperaturverlauf) bedarf es im Rahmen der Modellbildung einer Zonierung des Gebäudes. Da eine zu große Anzahl der Zonen mit einem steigenden Rechenaufwand verbunden ist, wird zunächst die Bildung von 1-Zonen-Modellen angestrebt. Die Definition der zonenbegrenzenden Bauteile basiert auf den Angaben des Aufbaus und der zugehörigen Materialkennwerte (z.B. Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität). Die Einflüsse nicht zonenbegrenzender Bauteile, wie Innenwände und Zwischendecken, können über die interne Wärmekapazität der Zone berücksichtigt werden. Des Weiteren müssen auch spezielle

Bauteileigenschaften, beispielsweise winkelabhängige optische Eigenschaften transparenter Bauteile, in das Modell integriert werden. Neben den Bauteil- und Materialparametern müssen dem Gebäudemodell auch nutzungsabhängige Größen zugeordnet werden. Dies umfasst die internen Wärmegewinne durch Personen und Geräte, Heiz- und Kühlzyklen sowie Lüftungsvorgänge.

In einem IFC-Modell, welches aus einer Modellierungssoftware exportiert wird, sind in der Regel nicht alle für die Gebäudesimulation benötigten bauphysikalischen Parameter enthalten. Beispielsweise sind im allgemein definierten Eigenschaftssatz Pset_MaterialThermal die Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität hinterlegt, wohingegen spezielle Eigenschaften nicht vorgehalten werden. Diese zusätzlich benötigten Eigenschaften können über die IfcPropertySets direkt den Bauteilen oder Modellabschnitten zugeordnet werden. Für die Gebäudesimulation zwangsläufig notwendige Parameter sind beispielsweise die anzunehmenden Heiz- und Kühlregime, welche einen Teil der individuellen Nutzung darstellen. Des Weiteren bedarf es einer Definition der physikalischen Kennwerte transparenter Bauteile sowie der Rand- und Übergangsbedingungen (z.B. Emissionsgrad für langwellige Strahlung und Wärmeübergangskoeffizienten), welche in der Energiebilanz der Zone Berücksichtigung finden. Die Kennwerte der transparenten Bauteile werden über die Software WINDOW (Lawrence Berkeley National Laboratory, 2018) als DOE-2 Datei in einer Datenbank hinterlegt und über die Schnittstelle in die IDF-Datei integriert. Außerdem sind bauwerksspezifische Angaben, wie die Ausrichtung oder Lage, die ebenfalls Einfluss auf die angewendeten Randbedingungen haben, zu integrieren.

REFERENZOBJEKT

Am Referenzobjekt „Schule an der Hart“ (Standort: Stadtteil Oberweimar, Weimar) wird die entwickelte Schnittstelle erprobt. Das Schulgebäude stellt einen DDR-Typbau aus dem Jahr 1975 dar. Das Ausgangsmodell liegt im IFC2x3-Format vor und umfasst eine detaillierte Nachmodellierung des bestehenden Gebäudes nach Aufmaß, wobei bereits Bauteilaufbauten und Materialzuweisungen

enthalten sind. Die im weiteren Verlauf benötigten Materialkennwerte und Nutzungsbedingungen werden innerhalb der entwickelten Schnittstelle in das BIM-Modell eingearbeitet. Abbildung 3 zeigt ein Luftbild des Gebäudes und vergleichend Visualisierungen der Modelle in IFC und IDF.

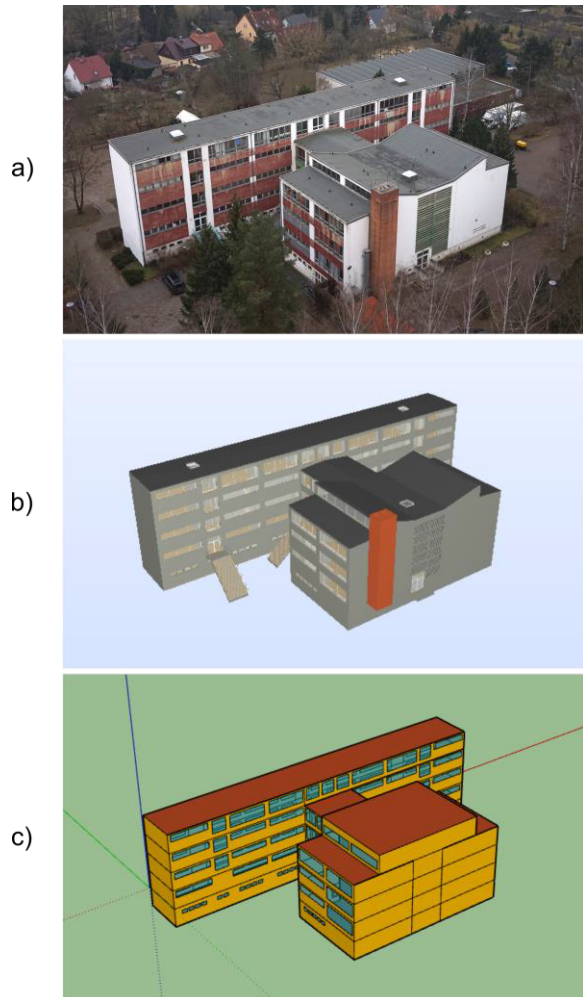


Abbildung 3: Luftbild des Bauwerks im Original (a), das IFC-Modell aus Modellierung der Schule nach Aufmaß (b), die extrahierte Abschätzung Gebäudehülle durch die von den Autoren entwickelte Software als IDF (c)

In Abbildung 3 ist außerdem zu erkennen, dass die Geometrie des extrahierten Simulationsmodells leicht vereinfacht ist und somit geringe Abweichungen zum Ausgangszustand bestehen. Beispielhaft ist hierfür die Sheddach-Konstruktion zu nennen, die im IDF-Modell lediglich als simple Quadergeometrie dargestellt wird. Nach dem Export des Modells über die IDF-Schnittstelle konnte diese fehlerfrei in TRNSYS eingelesen werden. Hierbei wurden alle nötigen geometrischen Informationen, Materialkennwerte sowie Nutzungsszenarien übertragen. Die anschließende Manipulation

(z.B. Format und Speicherort für ausgewählte Simulationsangaben sowie Simulationszeitraum) der obligatorisch generierten DCK-Datei innerhalb der Schnittstelle ermöglichte eine direkte Durchführung einer Jahres-Simulation in TRNSYS.

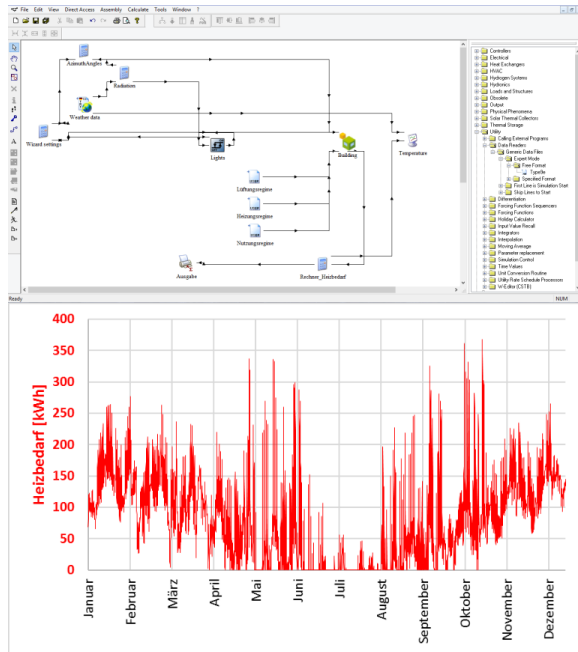


Abbildung 4: Ansicht der Nutzeroberfläche in TRNSYS und resultierende Simulationsergebnisse für das Referenzobjekt

Durch eine mögliche Integration der Simulationsergebnisse in das interne Modell können diese mit Ergebnissen aus unterschiedlichen Modellvarianten, beispielsweise resultierend aus Umbauten, oder für Parametervergleiche genutzt werden.

ERGEBNISANALYSE UND DISKUSSION

Die unterschiedlichen Beschreibungsarten von Geometrien, nicht zuletzt bei dem Transfer von Volumina auf Flächen, während des Imports eines IFC-Modells führen zwangsläufig zu Fehlerquellen. Die entwickelte Schnittstelle löst geringe Ungenauigkeiten, wie nicht korrekt verschnittene Wandachsen, falsche Wandorientierung oder Lücken durch nicht interpretierbare Bauteile in begrenztem Maße automatisch. Des Weiteren sind nur senkrechte Bauteile darstellbar, was schräge Dächer oder Wände ausschließt. Die manuelle Anreicherung des internen Modells, mit für die Simulation benötigten Informationen, ist bei korrekt importierter Geometrie der einzige nötige Eingriff vor dem Start einer Simulation.

Aufgrund des verwendeten 1-Zonen-Modells ist bei dem vorliegenden Referenzgebäude, welches ein Nicht-Wohngebäude darstellt, zwar eine deutliche Unschärfe hinsichtlich der Modellbildung hinzunehmen. Allerdings bietet die entwickelte Schnittstelle, vor allem im frühen Planungsstadium eines BIM-Modells sowie bei nicht auf den IFC-Export optimierten BIM-Modellen, Möglichkeiten für eine Einschätzung des Heizwärmebedarfs. Hierbei werden alle angesetzten Parameter und Randbedingungen im internen Modell vorgehalten, dessen Flexibilität mit der zusätzlichen Implementierung von Schnittstellen zu anderen Formaten erweitert werden kann.

ZUSAMMENFASSUNG

Die entwickelte Methode ermöglicht es, IFC-Modelle nahezu ohne Berücksichtigung von Konventionen in das Eingabeformat IDF für die Simulationssoftware TRNSYS zu konvertieren. Dabei werden alle nötigen Daten, wie beispielsweise Materialkennwerte, Nutzerverhalten oder simulationsspezifische Eingangswerte, in einem internen Modell hinterlegt. Ergebnisse können nach dem Ausführen der Simulation ebenfalls zu Vergleichszwecken in das Modell rückgeführt werden. Die entwickelte Methode mindert somit nicht nur den Aufwand der Modellierung vor der thermisch-energetischen Simulation durch die Übernahme von Geometrien und Materialdefinitionen aus dem Ausgangsmodell, vielmehr können auch bereits ermittelte Daten früher Planungs- und Entwurfsphasen, sowie grobe Bestandsaufnahmen verglichen werden.

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen der Forschergruppe „Digital Engineering für Planungs- und Revitalisierungsprozesse von Stadtquartieren“, welche vom Freistaat Thüringen aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds (ESF) gefördert wird.

LITERATUR

Bazjanac, V.: Acquisition of building geometry in the simulation of energy performance, IBPSA Building Simulation Conference. 2001.

- Bazjanac, V. (Hrsg.): IFC BIM-Based methodology for semiautomated building energy performance simulation. International Conference on Information Technology in Construction. 2008.
- Benz, A., Taraben, J., Lichtenheld, T., Morgenthal, G., Völker, C.: Thermisch-energetische Gebäudesimulation auf Basis eines Bauwerksinformationsmodells. Bauphysik 40 (2018) Heft 2, S. 61-67.
- BuildingSMART: Summary of IFC Releases. <http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/ifc-releases>, Letzter Zugriff am 22.04.2018.
- Lawrence Berkeley National Laboratory, Software WINDOW: <https://windows.lbl.gov/software/window>, LetzterZugriff am 22.04.2018.
- Park, C.-S.: BIM Interface for full vs. semi-automated building energy simulation. Energy and Buildings (68) January 2014, p. 671-678.
- Thermal Energy System Specialists, LLC. www.trnsys.com, Letzter Zugriff am 22.04.2018.

DIGITALE PLANUNG BIM IN DER TGA: KONZEPT-BASIERTE METHODEN ALS STRUKTURGEBER FÜR DEN INTEGRALEN PLANUNGSPROZESS

Christoph van Treeck^{1,2}, Jaroslaw Siwiecki^{1,2}, Peer Schmidt³ und Ulrich Zeppenfeldt⁴

¹RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen E3D, Germany

²E3D Ingenieurgesellschaft mbH, Aachen, Germany

³Heidemann und Schmidt GmbH, Stockach, Germany

⁴Viega Holding GmbH & Co. KG, Attendorn, Germany

KURZFASSUNG

Neben BIM stellt die Integrale Planung (IP) als Kooperationsform eine weitaus größere Herausforderung dar. BIM ist ein wichtiges Umsetzungsinstrument der IP, da es zu Beginn eines Projektes Festlegungen einfordert, welche Planungsleistungen zu welchem Zeitpunkt und in welcher inhaltlichen Tiefe und Qualität zu erbringen sind – Festlegungen, die messbar und überprüfbar sind. Gleichzeitig stellt die TGA ein wichtiges *strukturelles* Element für die methodische Umsetzung der Planung dar.

Der Beitrag erläutert eine neue methodische Herangehensweise mit besonderem Fokus auf der TGA, die in einem Bauvorhaben umgesetzt wurde. Hervorzuheben ist das Konzept-basierte Vorgehen als durch die Projektsteuerung entwickelter ganzheitlicher, Gewerke-übergreifender und am Lebenszyklus orientierter Ansatz (Heidemann und Schmidt, 2012). Dieser Ansatz basiert auf einer fundierten Bedarfsplanung vor Planungsbeginn und fordert Gewerke-übergreifende Abstimmungen zu einer frühen Leistungsphase, die für folgende Phasen eingefroren werden. Ein abgestimmtes und geometrisch grob modelliertes Trassenkonzept dient zur Vorgabe der horizontalen und vertikalen Erschließung, von Versorgungsbereichen und Technikzentralen. Ein Segment-/Achsenkonzept regelt aus Sicht der TGA und insbesondere der Gebäudeautomation (GA) die technische und funktionale Segmentierung, aus Sicht der Nutzung das Raumkonzept sowie aus Sicht des Tragwerks das Achsraster. Dieses Vorgehen liefert die methodische Voraussetzung zur Umsetzung der gemäß DIN EN ISO 19650 geforderten räumlichen Modellpartitionierung für die TGA. Als Lösungsansatz für die BIM-seitige Umsetzung dient ein über den Modell-

entwicklungsgrad eingeforderter Fertigstellungsgrad für die TGA. Besonderes Augenmerk liegt ferner auf dem BIM-Prozess eines einheitlichen Attributmanagements, der eine enge Abstimmung zwischen den Fachmodellen Architektur, Tragwerk, TGA, GA und Bauphysik vorsieht. Das einheitliche Klassifikationssystem für Objekte und Attribute berücksichtigt dabei erstmals funktionale Zusammenhänge der GA.

EINLEITUNG

In der Planungspraxis gewinnt man schnell den Eindruck, dass Building Information Modeling (BIM) ein inzwischen anerkanntes Werkzeug darstellt, jedoch für viele Akteure *die Methode der Integralen Planung* zur kooperativen Zusammenarbeit eine weitaus größere Herausforderung bedeutet. BIM ist ein wichtiges Umsetzungsinstrument der Integralen Planung, da es zu Beginn eines Projektes konkrete Festlegungen einfordert, welche Planungsleistungen zu welchem Zeitpunkt und in welcher inhaltlichen Tiefe und insbesondere in welcher *Qualität* zu erbringen sind. Für die Definition von BIM sei auf die Definition des Stufenplans Digitales Planen und Bauen (BMVi, 2015) verwiesen. Im Rahmen des Beitrags wird von "Integraler Planung BIM" gesprochen.



Abbildung 1: Integrale Planung BIM

Damit diese Leistungen im Planungs- und Ausführungsprozess messbar und seitens des

Qualitätsmanagements BIM auch überprüfbar werden, sind entsprechende Festlegungen erforderlich. Der Beitrag stellt diese Maßnahmen gezielt aus Sicht der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) vor.

Im Rahmen der "Integralen Planung BIM" als ganzheitlichen Ansatz wird BIM interpretiert als

- Digitales Gebäude- und Datenmodell, bestehend aus der Verknüpfung von Datenbanken, objektbezogenen Attributen, Dokumentenmanagement, Kosten- und Terminplanung, etc.,
- sowie *Methoden* und *Werkzeugen* zur Verwaltung dieser Daten und zur Kommunikation zwischen den Beteiligten,
- für festzulegende Bereiche der Objekt- und Fachplanungen und Bauausführung über den Lebenszyklus und
- zu Vorgaben zu Modellentwicklungsgraden bezüglich Modellinhalten und -qualitäten.

Die Anwendung und Umsetzung der integralen Methodik erfolgte im Rahmen des Neubaus eines Seminarcenters in Attendorn mit besonderem Fokus auf der TGA.

STRUKTURGEBER TGA

Für ein erfolgreiches Zusammenspiel in der integralen Planung ist es zielführend, die beiden Themen *Projektorganisation* und *Strukturgebung* getrennt voneinander zu betrachten. In der Praxis wird dies oft vermischt bzw. Organisationshierarchien verhindern die Priorisierung strukturgebender Aspekte.

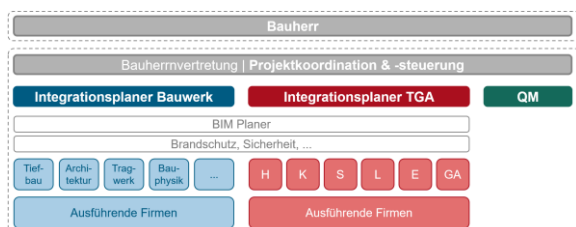


Abbildung 2: Projektorganisation (in Anlehnung an Heidemann et al. 2014)

Die zeitgemäße integrale Planung und Ausführung erfordert seitens der *Organisation* eines Projektes eine entsprechende Hierarchie. In Anlehnung an Heidemann et al. (2014), sind dabei insbesondere die Projektkoordination und -steuerung als Schnittstelle zum Bauherrn und

die Koordinationsfunktion der Integrationsplaner Bauwerk und TGA hervorzuheben. Werden seitens des Integrationsplaners Bauwerk alle bauseitigen Themen Tiefbau, Architektur, Tragwerksplanung und Bauphysik koordiniert, so ist es die Aufgabe des Integrationsplaners TGA, die gebäudetechnischen Gewerke Heizung, Klima, Sanitär, Lüftung, Elektro und Gebäudeautomation planungs- und ausfühungsseitig zu koordinieren sowie die für den Projekterfolg wichtigen Festlegungen zu organisatorischen und technischen Schnittstellen zwischen den am Projekt Beteiligten zu erarbeiten und dokumentieren. Aufgabe des BIM Planers, bzw. BIM-Koordinators bzw. Managers hingegen ist es, die Funktionsfähigkeit des BIM im Projekt sicherzustellen. Dies bezieht sich auf die Ausarbeitung und Umsetzung eines BIM Abwicklungsplanes (BAP), die technische Infrastruktur, das regelmäßige Zusammenführen und Prüfen von Modellen hinsichtlich Modellierungsrichtlinien und Vorgaben zur Modellqualität und weiteres. Aufgabe des BIM-Planers ist es nicht, und das ist ein weit verbreitetes Missverständnis, planungsseitig koordinierend tätig zu werden oder die inhaltliche Richtigkeit des BIM zu verantworten. Das Thema BIM stellt damit, siehe Abbildung 2, eine wichtige Querschnittsfunktion dar. Weiterhin ersetzt damit ein BIM-Planer in einem Projekt nicht die wichtige Koordinationsfunktion der Integrationsplaner Bauwerk und TGA. Die Koordination ist nach wie vor Aufgabe der Planung.

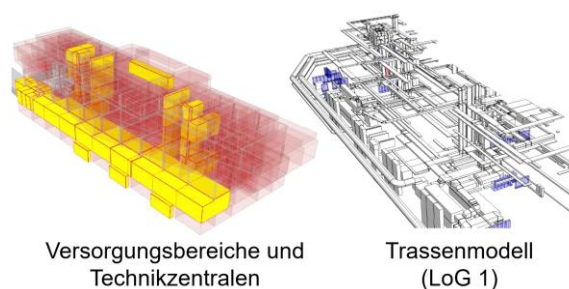


Abbildung 3: Strukturgebende Festlegungen in LPh 2

Seitens der *Strukturgebung* (nicht gemeint: Koordination) ist festzustellen, dass einzelne Aspekte zu verschiedenen Zeitpunkten eines Projektes unterschiedliche Relevanz und Einfluss besitzen. Diese grundsätzlich triviale Erkenntnis findet in der Praxis jedoch selten ein Ebenbild. Aufgabe der Architektur ist es, komplexe bauherrnseitige Nutzeranforderungen aus einem Raumprogramm in eine individuell

gestaltete Formensprache zu übersetzen und technisch-funktional umzusetzen; auch ästhetische Aspekte spielen eine Rolle (etwa in einer Wettbewerbsphase).

Entscheidender *Strukturgeber* vor dieser Phase und vor Beginn der Planung ist jedoch zunächst eine solide *Bedarfsplanung* (vgl. DIN 18205) – um baubegleitende Planungen zu vermeiden. Eine Bedarfsplanung, durchgeführt von einer kompetenten Bauherrnvertretung, deren Ergebnis in ein detailliertes Lastenheft mündet und damit Ziele und Bedarfe des Produktes Bauwerk umfassend beschreibt, ist eine elementare Voraussetzung für Transparenz, Termin- und Kostensicherheit.

Wichtigster Strukturgeber während der Planungsphase (Vorplanung und Entwurfsplanung) ist die technische Gebäudeausrüstung als komplexestes Gewerk. So sind beispielsweise, wie in Abbildung 3 verdeutlicht, die horizontale und vertikale Erschließung, die Führung von Trassen oder die Lage von Versorgungsbereichen und Technikzentralen zu lösen.

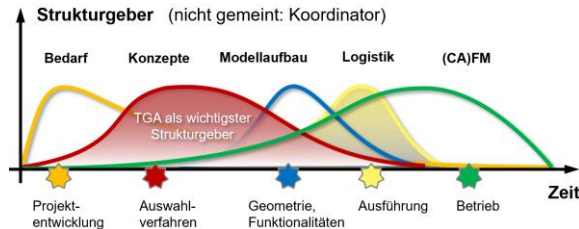


Abbildung 4: Wichtigste Strukturgeber je nach Phase

Für die Strukturgebung seitens der TGA sind folgende Gesichtspunkte zu unterscheiden:

- Auf übergeordneter, grober Ebene betrifft dies die Abbildung von grundlegenden Abhängigkeiten auf Basis von gegebenen Nutzungsprozessen, die Verortung von Nutz- und Nebenflächen, die Anordnung von Trassen und Schächten, die Definition von Versorgungsbereichen, die Verortung von Technikzentralen und Brandabschnitten.
- Auf der Ebene einzelner Segmente sind es das Bilden integraler Strukturen, die Typenbildung hinsichtlich der Ausprägung von Segment- und Raumtypen, das Ausnutzen von Wiederholfaktoren ("copy&paste" von Segmenten gleichen Typs und gleicher Ausstattung), womit zudem die Voraussetzung für die Vorfertigung von TGA

Baugruppen und die Vervielfältigung von Software (GA) geschaffen wird.

- Auf der Ebene von Systemkomponenten ist die Integration von Funktionen (Beispiel: integriertes Trinkwassermanagement) zu nennen mit dem Ziel der Reduktion der Komplexität in Planung und Ausführung sowie der Schaffung von einheitlichen Schnittstellen zur Gebäudeautomation.

Für die Phase der Ausführung bestimmt weiterhin die Logistik vor dem Hintergrund der Taktplanung bis hin zum Lean Management die Struktur, für die Betriebs- und Nutzungsphase ist es das Gebäudemanagement (CAFM). Abbildung 4 zeigt den Einfluss und die gegenseitigen Abhängigkeiten in der Strukturgebung.

KONZEPT-BASIERTES VORGEHEN IN DER INTEGRALEN PLANUNG BIM

Im Rahmen der zeitgemäßen Integralen Planung BIM geben zunächst ein projektübergreifendes Organisationshandbuch, ein Lastenheft und Besondere Vertragsbedingungen BIM (BIM-BVB) Aufgaben, Leistungsbilder, Ziele und Bedarfe sowie vertragliche Regelungen vor. Das Lastenheft dokumentiert im gleichen Zuge das Ergebnis der Bedarfsplanung gemäß DIN 18205. Im Einzelnen definieren (hier aus "BIM-Sicht")

- ein projektübergreifendes *Organisationshandbuch* den Projektaufbau, die Projektorganisation, Verpflichtungen zur Qualität, zur Integralen Planung BIM, Mitarbeit am BIM und zur Kooperation, Aufgaben und Leistungsbilder, Vorgaben zum Qualitäts-, Termin-, Kosten-, Baustellen- und Inbetriebnahmemanagement, BIM-Ziele und Vorgaben zur modellbasierten Koordination und Kommunikation (via BCF),
- ein *Lastenheft* sämtliche Ziele und Bedarfe zum Raumprogramm, zu Nutzungsanforderungen und zum BIM-Abwicklungsplan (BAP) sowie spezifische Vorgaben zur Umsetzung des BIM im Sinne von Auftraggeber-Informationsanforderungen (AIA), d.h. Vorgaben zu den Bestandteilen des BIM, zu Methoden und Werkzeugen zur Verwaltung des BIM, zum BIM-Reifegrad, zu BIM-Prozessen, zur Modellkoordination und Modellprüfung, Vorgaben zum Modellentwicklungsgrad und zur Modellrevision.
- Vertragliche Regelungen sind in Besonderen Vertragsbedingungen BIM (BIM-BVB) durch einen Rechtsanwalt einheitlich für alle

Beteiligten formuliert. Hierin sind Grundlagen zur Projektabwicklung, Regelungen zum Datenaustausch, Rollen, BIM-spezifische Leistungspflichten, die Vergütung, Abnahme, Verantwortlichkeit und Haftung, Versicherung, das geistige Eigentum am Modell sowie Vorgaben zu Vertraulichkeit und Datensicherheit geregelt. Bezüglich Verantwortlichkeit ist insbesondere geregelt, dass planerisch zu koordinierende Leistungen keine Behinderung darstellen, sondern eine planerisch durch koordinative Maßnahmen zu lösende Aufgabe sind.

- Ein Glossar subsumiert einheitliche Begriffsdefinitionen für alle Fachbegriffe und Dokumente. Seitens BIM betrifft dies etwa 60 einheitliche Definitionen.

Das "Konzept-basierte Vorgehen" nach Heidemann und Schmidt (2012) stellt einen methodischen Ansatz für eine ganzheitliche Gewerke-übergreifende und am Lebenszyklus orientierte Planungsmethodik dar. Diese Methode wurde im Projekt durch die Projektsteuerung in die Praxis umgesetzt. Im Rahmen der Erarbeitung von mehreren sogenannten "Konzepten" erfolgt vor Beginn der Entwurfsplanung durch die Fachplaner eine umfassende Gewerke-übergreifende Abstimmung und Ausarbeitung der technischen Umsetzung der Vorgaben des Lastenheftes. Im Folgenden werden die für die TGA relevanten Konzepte benannt.

Die Vorgehensweise stellt aus Sicht der TGA die methodische Voraussetzung für die Umsetzung der seitens DIN EN ISO 19650 geforderten räumlichen Modellpartitionierung ("Spatial Federation Strategy") eines Modells dar:

- Ein abgestimmtes *Trassenkonzept* (Abbildung 3) dient der verbindlichen Vorgabe der horizontalen und vertikalen Erschließung sowie von Versorgungsbereichen und Technikzentralen. Es resultiert auf Basis von Nutzungsprozessen, Energiekonzept und der Gewerke-übergreifenden Abstimmung aus einer entsprechenden Vordimensionierung und Verortung der TGA. BIM-seitig wurde das Trassenmodell in einem groben geometrischen Detaillierungsgrad (LoG) umgesetzt und mit dem Tragwerk abgestimmt.
- Ein *Segment-/Achsenkonzept* regelt aus Sicht der TGA und insbesondere der Gebäudeautomation die technische und funktionale Segmentierung nach VDI 3813 und 3814, aus Sicht der Nutzung das Raumkonzept sowie aus Sicht von

Architektur und Tragwerk das Achsraster (Abbildung 5). Das Konzept definiert die geometrische Begrenzung strukturgebender funktionaler Objekte im Modell.

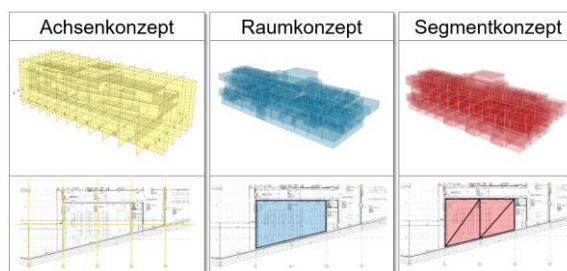


Abbildung 5: Achsen-/Raum-/Segmentkonzept

- Als *BIM-Abwicklungsplan (BAP)* dient ein detailliertes BIM-Konzept, in dem die Daten des BIM, die Modellinhalte und -qualitäten, BIM-Prozesse, Vorgaben zur technischen Umsetzung, Modellprüfung, Datenaustausch, Attributmanagement, Klassifizierungssystematik, Modellierungsrichtlinien, Konformitätstests, Datensicherung, Schulung und Einweisung und zur Modellrevision geregelt werden. Der BAP stellt damit eines der Konzepte dar, der vor Beginn der Planung abzustimmen ist (vorvertraglich als "Pre-BAP") und im Rahmen der Planung später als BAP fortgeschrieben wird.
- Weitere Konzepte betreffen das abgestimmte Energiekonzept, das Baustellenlogistikkonzept, das Brandschutzkonzept, das Schnittstellenkonzept und weitere.

Im Projekt setzen insgesamt 16 Konzepte die Vorgaben aus dem Lastenheft um. Für eine vollständige Darstellung wird auf die ausführliche Veröffentlichung der Autoren (In: van Treeck et al. 2018) verwiesen.

Die abgestimmten Konzepte stellen die Voraussetzung für den Beginn der Entwurfsplanung dar. Die Konzepte wurden im Projekt mit einem ganzheitlichen Ansatz in disziplin-/gewerkeübergreifenden Konzeptteams erarbeitet und durch die Projektsteuerung und die Integrationsplaner Bauwerk und TGA koordiniert.

BIM ist in diesem Zusammenhang ein wichtiges Umsetzungsinstrument der integralen Planungsmethodik, da es zu Beginn eines Projektes Festlegungen einfordern kann, welche Planungsleistungen zu welchem Zeitpunkt und in welcher inhaltlichen Tiefe und Qualität zu erbringen sind. Bestehende Lösungsansätze zur Vorgabe eines geometrischen oder informationstechnischen Detaillierungsgrades über ein Level of Geometry (LoG) bzw. Information (LoI)

reichen jedoch nicht aus, um die Gewerke-übergreifende Abstimmung auch BIM-seitig einzufordern. Auch bestehende Definitionen für Fertigstellungsgrade des BIM nach VDI 2552 Blatt 3 sind hierfür nicht hinreichend. Die Richtlinie fokussiert sich auf Mengen und Controlling unter dem Aspekt des Hochbaus und nicht aus Sicht der Gebäudetechnik. Der folgende Abschnitt präzisiert als Lösungsansatz das methodische Vorgehen zur Vorgabe von Modellinhalten und -qualitäten über die Einführung eines entsprechenden Fertigstellungsgrades für die TGA, der auch auf andere Gewerke Anwendung findet.

Es ist dabei anzumerken, dass grundsätzlich bereits heute nach HOAI Fachplaner eine Koordinations- und Integrationsleistung schulden (Eschenbruch et al. 2014, Elixmann et al. 2016). Der Unterschied liegt darin, dass durch den Einsatz von BIM diese vertraglich geschuldeten Leistungen heute präzise definierbar, die Festlegungen messbar und QM-seitig exakt überprüfbar sind (damit ist nicht (nur) die Kollisionsprüfung gemeint!).

MODELLINHALT UND MODELLQUALITÄT

Zur Vorgabe von Modellinhalt und Modellqualität wurde in (van Treeck et al. 2016) in Erweiterung des Ansatzes von Hausknecht und Liebich (2016) bzgl. Geometrie und Informationsgehalt ein neuer LoX Ansatz vorgestellt, der ein Level of Geometry (LoG) und Information (LoI), sowie einen Fertigstellungsgrad als Level of Coordination (LoC) und Logistik (LoL) vorsieht, kurz als LoGICaL-Modell bezeichnet. Hierbei wird unterschieden zwischen

- dem *Modellinhalt* hinsichtlich Geometrie (G) und Informationsgehalt (I) bezüglich Attribuierung, jeweils von 1 (grob) bis 5 (detailliert), sowie
- dem Fertigstellungsgrad bzw. der *Modellqualität*, ausgedrückt im Koordinationsgrad (C), von 1 (nicht abgestimmt) bis 5 (gewerkeübergreifend abgestimmt mit gebautem Zustand), und der logistischen (L) Verknüpfung mit dem Terminplan, jeweils von 1 (keine Verknüpfung) bis 5 (Lean Management mit Just-In-Time Lieferung, Montage bzw. Inbetriebnahme).

Für die TGA besonders relevant ist dabei der Fertigstellungsgrad des LoC, da hiermit das beschriebene Konzept-basierte Vorgehen – d.h. die frühzeitige Abstimmung jener struktur-

bildenden Elemente – verbindlich eingefordert werden kann.

Im einfachsten Fall betrifft dies beispielsweise die Vorgabe, dass die zuvor definierten Konzepte anzuwenden sind. So kann weiterhin vorgeschrieben werden, dass ein planerisch abgestimmtes und mit dem Tragwerk kollisionsfreies Trassenmodell (grob in LoG 1, einschließlich Toleranzen und Reserven) zum Ende der Entwurfsplanung vorzuliegen hat. Im Extremfall betrifft ein LoC 4 der Überprüfung der bauseits installierten Komponenten im Rahmen der As-Built Dokumentation, für LoC 5 sogar hinsichtlich ihres gewerkeübergreifenden Zusammenwirkens (wichtig für die Inbetriebnahme). Für eine ausführliche Darstellung der LoD Definitionen wird auf (van Treeck 2012) verwiesen.

Abbildung 6 verdeutlicht die projektseitige Vorgabe mittels einer Modellentwicklungsmatrix am Beispiel der Vorplanung (LPh 2). Hierbei wird für Elemente der einzelnen Kostengruppen nach DIN 276 für jeden Beteiligten definiert, welche Modellinhalte und -qualitäten zu welcher Phase zu liefern sind. Die Modellentwicklungsmatrix wird im Rahmen der AIA zwischen Bauherrn und Planern abgestimmt und wird Bestandteil des BAP und damit vertraglich festgeschrieben.

Wer muss was in welcher Qualität wann liefern?

Modellentwicklungsmatrix gemäß Kostengruppen DIN 276	Vorplanung (LPh 2)				Entwurfs- & Genehmigungplanung (LPh 3/4)			
	G	I	C	L	G	I	C	L
400 Bauwerk - Technische Anlagen								
410 Abwasser-, Wasser-, Gasanlagen	1	2	2	1	3	3	3	2
420 Wärmeversorgungsanlagen	1	2	2	1	3	3	3	2
430 Lufttechnische Anlagen	1	2	2	1	3	3	3	2
434 Kälteanlagen	1	2	2	1	3	3	3	2
440 Starkstromanlagen	1	2	2	1	3	3	3	2

Abbildung 6: Modellentwicklungsmatrix, Auszug

EINHEITLICHES ATTRIBUTMANAGEMENT

Neben der geometrischen Kollisionsvermeidung ist seitens der TGA die inhaltliche Attribuierung von besonderem Interesse. Für ein einheitliches BIM-Datenmanagement für das Modell des Bauvorhabens wurde eine einheitliche Struktur entwickelt. Die Modellstruktur verknüpft drei Ordnungssysteme miteinander und verwendet

- Baugruppenkennzeichen auf Basis einer Erweiterung der DIN 276,
- eine Bauwerksstruktur zur Darstellung von hierarchischen Abhängigkeiten zwischen BIM-Objekten,

- sowie eine Typenstruktur.

Grundlage für die Definition der Bauwerksstruktur stellt die Definition eines einheitlichen Kennzeichnungsschlüssels in Anlehnung an die Vorgaben für die Gebäudeautomation nach VDI 3813/3814 dar. Damit ist die Übertragbarkeit der Kennzeichnungssystematik auf alle Lebenszyklusphasen sichergestellt, insbesondere wird damit die Voraussetzung zur Verknüpfung zwischen BIM, GA und CAFM geschaffen.

Seitens des Informationsmanagements wird im Projekt nach DIN EN ISO 19650 ein Reifegrad der (höchsten) Stufe 3 umgesetzt; für die spätere Anbindung an CAFM ist die Übergabe eines konsolidierten Modells in IFC Version 4 vorgesehen (aktueller Projektstand: Übergabe an die Bauausführung). Die "Single Source of Truth" stellt im Projekt eine zentrale BIM-Datenbank dar, das Koordinationsmodell. Fachmodelle aus der Autorensoftware Autodesk Revit sind hierbei bidirektional an das Datenmanagementsystem DesiteMD angebunden und werden nach mehrstufiger Modellprüfung zu einem koordinierten Datenmodell zusammengeführt.

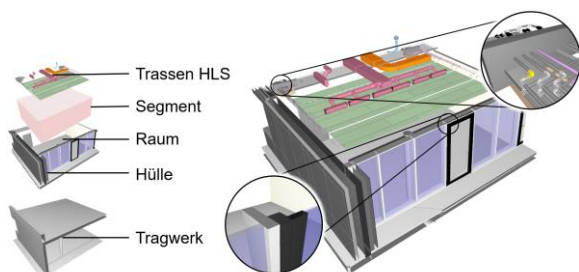


Abbildung 7: Zur Modellgranularität der Fachmodelle

Für die Attribuierung wurde ein Datenbankschema entwickelt, das Baugruppen und Bauteilen Attribute zuweist. Neben der Verknüpfung zum Baugruppenkennzeichen und der fachlichen Zuordnung erfolgt eine Zuordnung zum entsprechenden Level of Information (LoI). Damit ist anschaulich auch ein Zusammenhang zur Vorgabe zum LoI der Modellentwicklungsmatrix hergestellt. Mit dieser Verknüpfung wird die Umsetzung der Attribuierung hinsichtlich der Vorgabe des LoI modellseitig prüfbar.

Die Attribuierung berücksichtigt die Granularität der einzelnen Fachmodelle im Sinne der oben genannten Konzepte. Wie in Abbildung 7 dargestellt ist anzumerken, dass die Fachmodelle keine einheitliche Granularität aufweisen können. Dies liegt an der Besonderheit

des Gewerks der TGA mit objektbezogenen und funktionalen Zusammenhängen.

Wie in Abbildung 8 dargestellt, folgt die Attribuierung nach solchen objektbezogenen und funktionalen Gesichtspunkten. Funktionale Objekte, in Anlehnung an VDI 3813 und VDI 3814, definieren funktionale Zusammenhänge mit einem Segment als kleinste, nicht-teilbare Einheit. Funktionale Objekte werden damit genauso als zu attribuierende BIM-Objekte behandelt, wie "normale" objektbezogene Komponenten bzw. Bauteile wie Fenster, Türen, Pumpen und Rohrleitungen. Vorgaben des Lastenheftes sind beispielsweise als Attribute auf Raumebene gegeben (grob); die planerische Umsetzung resultiert in Komponenten und Bauteilen/Baugruppen (TGA) bzw. Segmenten als Objekte (fein); für die Betriebs- und Nutzungsphase liegen Attribute notwendigerweise wiederum auf Segment- bzw. Raumebene vor (grob).

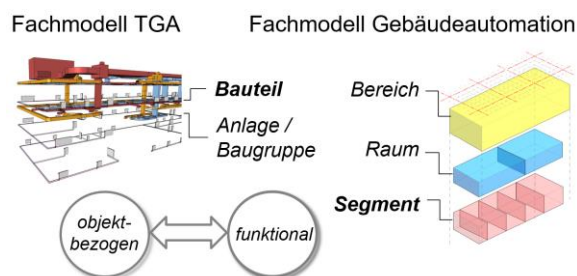


Abbildung 8: Funktionale und objektbezogene Attribuierung

Aktuell wird im Rahmen der Richtlinienarbeit zur neuen VDI 2552 Richtlinie sowie auf internationaler Ebene, unterstützt durch die Industrieverbände der TGA, an einheitlichen Klassifikationssystemen für Komponenten gearbeitet. Mangels einer einheitlichen Klassifikationssystematik für die TGA – insbesondere vor dem vorgenannten Hintergrund – wurde in Zusammenarbeit zwischen allen beteiligten Fachplanern eine eigene Systematik entwickelt, mit der eine Attribuierung auf Segment- und Raumebene vorgenommen wurde.

Die Umsetzung des Attributmanagements erfolgte, wie in Abbildung 9 dargestellt, in dem BIM-Datenbankmanagementsystem DesiteMD. Das einheitliche Attributmanagement wird, vergleichbar mit dem geometrischen Kollisionsmanagement, projektübergreifend durch einen Integrations- oder Fachplaner, den "Attributmanager" sichergestellt und überwacht.

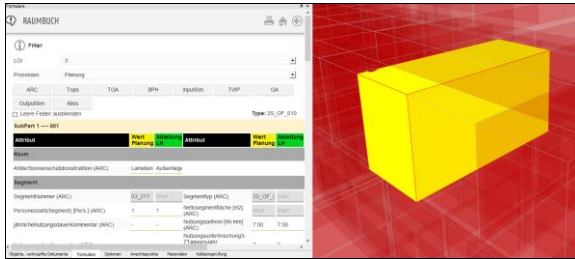


Abbildung 9: Umsetzung Attributmanagement in DesiteMD

Für das Attributmanagement wurde im Projekt ein BIM-Prozess entwickelt. Um die mit dem Datenschema einhergehende Komplexität für die Akteure beherrschbar zu gestalten, wurde das Datenschema in einem standardisierten Eingabeformat (Tabellenblatt) definiert. Das Eingabeformat beschränkte sich jeweils auf den Kontext der jeweiligen Fachdisziplin. Diese Teilschemata (Tabellenblätter) wurden regelmäßig durch den BIM-Planer technisch zusammengeführt. Diese wurden über einen automatisierten Skript-basierten Prozess in eine Eingabedatei für DesiteMD überführt. Im Schema war es Fachplanern möglich, Filterfunktionen zu definieren. Weiterhin konnten Schreib- und Leserechte definiert werden, um festzulegen, welche Attribute im bidirektionalen Austausch von welcher Seite (CAD oder DesiteMD) aktualisiert und/oder überschrieben werden durften und welche nicht. Die fachlich-inhaltliche Koordination der Attribute erfolgte vor der Synchronisation durch die Rolle des BIM-Attributmanagers.

UMSETZUNG IN EINEM BAUVORHABEN

Die oben beschriebene Methodik der Integralen Planung BIM wurde im Zuge des Bauvorhabens *Seminarcenter Ennest* (Bauherr Viega Holding GmbH & Co. KG) konkret umgesetzt. Mit Zieltermin des Nutzungsbeginns 2020 entsteht in Attendorn ein interaktives Weiterbildungszentrum für etwa 200 Gäste. Die Planung und der Betrieb als Solches werden Bestandteil von Fachausstellung und Seminarbetrieb, unterstützt durch neue Medientechnik und "sichtbare TGA". Im Projekt gilt es höchste bauherrnseitige Anforderungen an BIM umzusetzen, die eine vollständige digitale Dokumentation über den gesamten Lebenszyklus und den Einsatz von BIM für das Gebäudemanagement beinhalten.

Wie im Referenzprozess des Stufenplans Digitales Planen und Bauen (BMVi, 2015) vorgesehen, erfolgte bzw. erfolgt im Rahmen von Planung

und Ausführung eine zweimalige Kompetenzabfrage zur Auswahl der besten Planungs- und Ausführungsteams. Für die Planung wurde durch die Projektsteuerung als Bauherrnvertretung ein wettbewerbliches Auswahlverfahren "Integrale Planung BIM" entwickelt und durchgeführt. Aus 40 Bewerberteams namhafter Büros wurden Gutachten der acht Besten ausgewertet und, hier hinsichtlich BIM, seitens des QM BIM nach zehn Kriterien fachlich bewertet. Es zeigte sich seitens des Status Quo in Deutschland ein differenziertes Kompetenzbild. Die ausführliche Darstellung der anonymisierten Auswertung ist Gegenstand einer anderen Veröffentlichung der Autoren (van Treeck et al. 2018).

FAZIT

Das Konzept-basierte Vorgehen liefert als Gewerke-übergreifender Ansatz vor Beginn des eigentlichen Modellaufbaus die methodische Voraussetzung zur Umsetzung der gemäß DIN EN ISO 19650 geforderten räumlichen Modellpartitionierung für die TGA. Als Lösungsansatz für die BIM-seitige Umsetzung dient ein über den Modellentwicklungsgrad eingeforderter Fertigstellungsgrad für die TGA, der sich im Umsetzungsprojekt bewährt hat.

Aus der Erfahrung des Projektes ergeben sich für das Arbeiten mit CAD-Systemen zahlreiche Konsequenzen, von denen hier auf drei im Besonderen eingegangen werden soll:

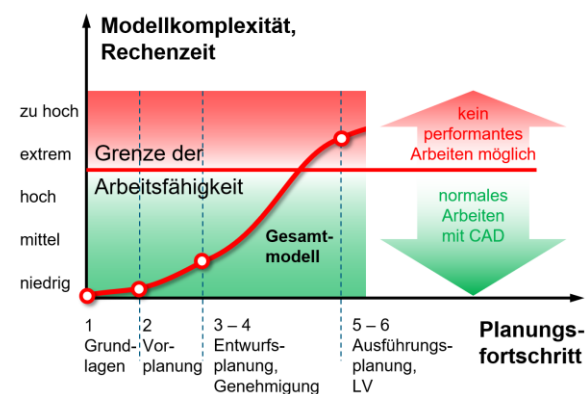


Abbildung 11: Grenze der CAD Performance

Das Konzept-basierte Vorgehen erfordert die Verfügbarkeit von CAD Herstellerproduktdateien zu verschiedenen geometrischen Detaillierungsgraden. In der Regel sind solche Daten heute über BIM-Portale oder VDI 3805 Datensätze in einem sehr hohen Detaillierungsgrad verfügbar. Oftmals erfordern bereits einfachste TGA Kom-

ponenten durch die hohe Detailgenauigkeit Datenvolumina von bis zu einem Megabyte pro Instanz. Wie in Abbildung 11 dargestellt wird durch die Modellkomplexität die Grenze der Arbeitsfähigkeit schnell überschritten. Für die TGA bedeutet dies eine Aufteilung des Modells in Teilmodelle, das gegenseitige Referenzieren dieser Modelle und damit erhöhten Aufwand zur Koordination der Teilmodelle untereinander.

Im BIM-basierten Workflow wird oftmals von der Verfügbarkeit eines detaillierten 3D-Modells als Basis für die Durchführung von Berechnungen ausgegangen. In frühen Planungsphasen, wenn die Dimensionierung von Trassen oder Versorgungsbereichen ansteht, ist ein Modell mit detaillierter Bauphysik nicht verfügbar. Bauherrnseitige Vorgaben hingegen sind über das Lastenheft, und damit auf der Ebene von Segmenten und Räumen, bekannt. Diese Form des Workflows im Sinne der Aufgaben der TGA-Fachplanung ist CAD-seitig nicht vorgesehen.

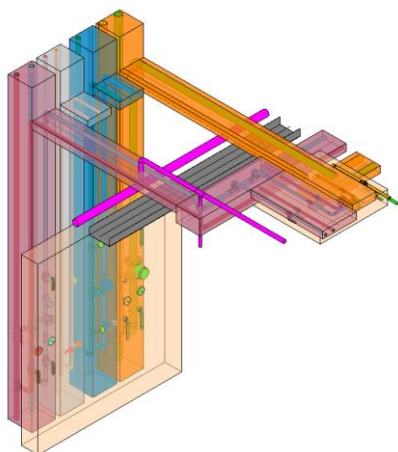


Abbildung 12: Trassenmodellierung in CAD

Als dritte Konsequenz ist festzuhalten, dass die Trassenmodellierung ein hohes Maß an Sorgfalt und hohe Planungskompetenz erfordert. CAD-seitig existiert kein Konzept für eine zunächst grobe Modellierung von Trassen und den modellseitigen Übergang zwischen einem groben und feinen Trassenmodell als "Konstruktionsraum" für die eigentliche TGA. Verfügbare Softwaretools für die Schlitz- und Durchbruchplanung können diesen Workflow nicht abbilden.

DANKSAGUNG

Dieser Beitrag entstand in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen Viega (Viega Holding GmbH & Co. KG) als Bauherrn, der Heidemann und

Schmidt GmbH als Projektsteuerung (IPQM) und Integrationsplanung TGA, der E3D Ingenieurgesellschaft mbH als QM BIM, der Rechtsanwaltskanzlei Kapellmann und Partner mbB, dem BIM-Planer (Boll und Partner GmbH) und mehreren Fachplanern, im Einzelnen Heinle Wischer und Partner, FACT GmbH, Boll und Partner GmbH, HGI Trox GmbH, Kurz und Fischer GmbH, Scape GmbH, M Plus GmbH, Atelier Markgraph, Fraunhofer ISE, Meckmann und Kollegen (DGNB), Ingenieurbüro Schmidt, Ingenieurbüro Reintsema und weiteren Gutachtern. Die Autoren danken allen Beteiligten für die gute Zusammenarbeit im Projekt.

LITERATUR

- BMVi, 2015. Stufenplan Digitales Planen und Bauen, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVi), Berlin.
- Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 276: 2017-07 Kosten im Bauwesen (Entwurf), Beuth Verlag, Berlin.
- Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 18205: 2015-11 Bedarfsplanung im Bauwesen (Entwurf), Beuth Verlag, Berlin.
- Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN ISO 19650-1 Organisation von Daten zu Bauwerken, Beuth Verlag, Berlin, 2018.
- Eschenbruch K. und Grüner J., 2014: BIM – Building Information Modeling: Neue Anforderungen an das Bauvertragsrecht durch eine neue Planungstechnologie, NZBau, Bd. Heft 7.
- Hausknecht K. und Liebich T., 2016: BIM-Kompodium, Stuttgart: Fraunhofer IRB.
- Heidemann A., Kistemann Th., Stolbrink M., Kasperkowiak F., Heikrodt K., 2014: Integrale Planung der Gebäudetechnik, ISBN: 978-3-662-44747-5, Springer Verl.
- Heidemann A., Schmidt P. 2012. Raumfunktionen: Ganzheitliche Konzeption und Integrationsplanung zeitgemäßer Gebäude, ISBN: 978-3954320004, 1. Auflage, TGA-Verlag.
- van Treeck C., Elixmann R., Rudat K., Hiller S., Herkel S., Berger M., 2016: Gebäude. Technik. Digital.: Building Information Modeling, ISBN 978-3-662-52824-2, Springer V.
- Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2011. VDI 3813/3814: Richtlinienreihe zur Gebäudeautomation (GA).

ALGORITHMUS ZUR AUFBEREITUNG GENERISCHER QUARTIERE FÜR DIE THERMISCHE MEHRZONEN-SIMULATION MIT DEM SOLVER NANDRAD

D. Weiß¹, R. Hoch¹, A. Paepcke¹, J. Grunewald¹ und S. Hirth¹

¹TU Dresden Institut für Bauklimatik, Dresden, Karlsruhe, Germany

KURZFASSUNG

Bereits in frühen Planungsphasen eines Gebäudeentwurfs oder Quartiers, sind eine Menge an Kennwerten und Parametern zur Analyse der Energiebedarfssimulationen erforderlich, um die energieeffizienteste und betriebswirtschaftlichste Variante zu bestimmen. Vorgestellt wird dafür ein eigens entwickelter Algorithmus zur Erstellung generischer Gebäude. Lediglich durch die Angabe der Außenabmessungen, sind derzeit komplette Gebäudekubaturen oder Gebäudeensembles mit Detailabbildungen möglich. Unter Verwendung statistischer Daten werden die einzelnen Zonen einer Struktureinheit, beispielsweise eine Wohneinheit, modelliert und berechnet. In der dreidimensionalen Darstellung des Bauwerkes erscheinen anschließend alle realisierbaren thermischen Zonen. Somit sind Wärmespeicherung und -transport innerhalb der in Beziehung stehenden Räume berücksichtigt. Besonders die dynamischen Effekte von Energiebezug und -bedarf benötigen eine präzise Abbildung der thermischen Speichermasse.

EINLEITUNG

Bereits in frühen Planungsphasen eines Gebäudeentwurfs oder Quartiers, kann mit Hilfe der thermischen Gebäudesimulation eine Variantenstudie zur Analyse des Energiebedarfs durchgeführt werden. Das Ziel ist es dabei einen Gebäudeentwurf bezüglich Energieeffizienz und Betriebswirtschaftlichkeit zu optimieren. Hierfür sind jedoch Parameter und Kennwerte notwendig, die in diesen frühen Phasen mitunter noch nicht vorliegen.

Im weiteren Verlauf wird ein Algorithmus zur Erstellung generischer Gebäude vorgestellt. Hiermit ist über die Eingabe der Gebäudeaußenmaße die Generierung von Einzelgebäuden oder Gebäudeensembles möglich. Neben der Kubatur werden so auch Detailinformationen über Konstruktion und Nutzung erzeugt. Zentraler Bestandteil ist hierbei eine Struktureinheit, die Anhand statistischer Daten generiert wird. Eine Struktureinheit setzt sich aus mannigfaltigen Zonen zusammen. Verdeutlicht am Beispiel einer Wohneinheit, kann mit Hilfe des Algorithmus und der statistischen Daten eine optimale Verteilung von beispielsweise Schlaf- und Wohnräumen erstellt werden.

Die 3D-Darstellung des Bauwerkes setzt sich aus der maximalen Anzahl der realisierbaren Struktureinheiten zusammen.

Die Nutzung realitätsnaher Randbedingungen für Kubatur und Nutzung eines Bauwerkes, ermöglicht verschiedene Vorkalkulationen und Nachweise.

Realisierbar sind damit zum Beispiel die Berechnung des sommerlichen Wärmeschutzes, somit auch die Bewertung von natürlicher Lüftung und den Einfluss von Verschattungssystemen, Berechnung der Heiz- und Kühllast, die Lastverschiebung durch Be- und Entladen der thermischen Speichermasse, Tageslichtbedingungen im Raum und die Bewertung von Schadstoffen in den einzelnen Baukonstruktionen.

GRUNDRISSEKSTELLUNG

Gebäude werden in Struktureinheiten klassifiziert. Es erfolgt eine Einstufung als Wohn- oder Nicht-Wohngebäude. Die im

weiteren Verlauf dargestellten Grundrisse beziehen sich ausschließlich auf Wohngebäude. Somit lassen sich Struktureinheiten mit Wohneinheiten gleichsetzen.

Für die Erstellung der Kubatur erfolgt die Angabe der Gebäudeaußenmaße (Länge x Breite x Höhe). Anhand dieser Daten werden die Raumkubaturen durch vorgegebene Grundrisse angefertigt. Diese Raumkubaturen werden mittels Innenabmessungen abgebildet. Für die Grundrisserstellung werden statistische Daten [1] verwendet.

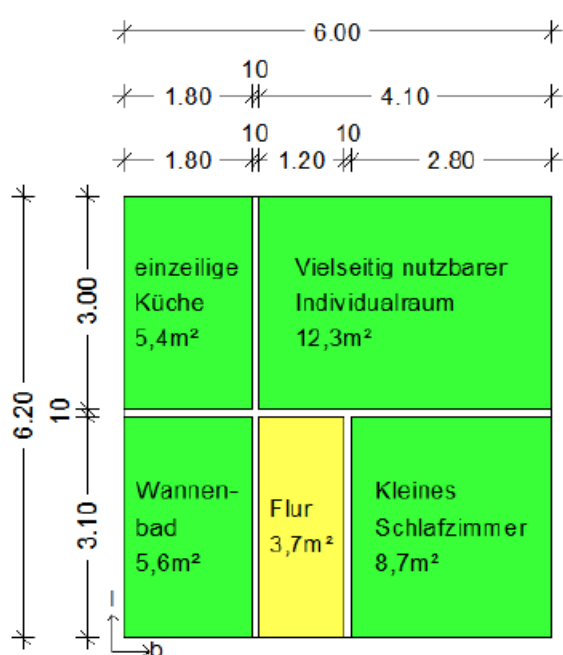


Abbildung 1: Grundriss 1 (6 m bis 8 m)

Für Wohneinheiten werden konkrete Grundrisse anhand von fünf Vorlagen abgeleitet. Diese werden anhand der Gebäudetiefe unterteilt. Die Einteilung erfolgt dabei von 6 m bis 8 m (siehe **Abbildung 1**), > 8 m, ≥ 10 m, ≥ 12 m, ≥ 15 m. Die Grundfläche der kleinsten Wohneinheit beträgt 35,7 m².

Bei der Erstellung wird vorab mittels Gebäudebreite die adäquate Vorlage ausgewählt. Anschließend erfolgt die Berechnung der maximalen Anzahl der Wohneinheiten pro Geschoss. Dabei wird die Gebäudelänge durch die minimale Grundrisslänge dividiert. Einbezogen werden in die Berechnung die Wanddicken von Außen- und Wohnungstrennwand, die zuvor im Bauteilaufbau festgelegt worden. Die Geschossanzahl wird anhand der definierten Höhe kalkuliert. Berechnet wird die tatsächliche

Geschosshöhe mit der Nutzerangabe für die Gebäudehöhe, dividiert durch die Mindestgeschosshöhe (2,4 m + Geschossdeckendicke). Die Geschosshöhen werden bei einem nicht ganzzahligen Ergebnis gleichmäßig angepasst, sodass jedes Geschoss die gleiche Höhe besitzt. Hierbei werden ebenfalls die Bauteildicken beachtet.

Nach der Berechnung der maximalen Anzahl der Geschosse und Wohneinheiten pro Geschoss, ist das Optimum für das generische Gebäude berechnet. Einschränkungen in den Grundrissen existieren bei der Anordnung und Erreichbarkeit den unterschiedlichen Räumen. Optimiert ist lediglich die Ausnutzung der Fläche, jedoch nicht der Zugang zu einzelnen Räumen. Die externen Verkehrsflächen zu den Wohneinheiten selbst sind ebenfalls vernachlässigt und nicht im Algorithmus integriert.

Es ist jederzeit möglich die Grundrisse und Wohnungstypen zu erweitern oder neu zu gestalten und die oben genannten Nachteile zu entfernen.

Für die Grundrisserstellung und Datenhaltung wurde ein XML-Schema definiert. Neue generische Grundrisse lassen sich ebenfalls in die XML-Datei hinzufügen und können so umgehend verwendet werden. Dabei wird zwingend ein Startraum definiert. Jeder Raum erhält ein unabhängiges Koordinatensystem und wird mit deutschen und englischen Bezeichnungen versehen.

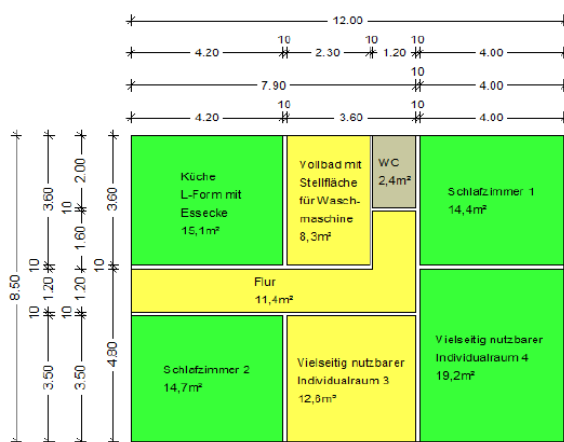


Abbildung 2: Grundriss 4 (12 m bis 15 m)

Der Polygonzug wird durch eine Abfolge von Punkten definiert. Anschließend wird definiert ob der Punkt bei einer Skalierung des Raumes ebenfalls skaliert werden darf und welche

Richtungen hierfür zulässig sind. Zur Verfügung stehen dabei die Optionen „None“ – nicht skalierbar, „widthSizeable“, „lengthSizeable“ und die Kombination aus den beiden letzten Optionen.

In **Abbildung 2** sind die unterschiedlichen Skalierungsoptionen farblich dargestellt. Grau markierte Räume sind nicht skalierbar. Räume mit einer gelben Markierung sind nur in einer Richtung skalierbar. Grün markierte Räume sind in Breite und Länge skalierbar.

In den meisten Verfahren zur thermischen Gebäudesimulation werden lediglich die wärmeübertragenden Bauteilflächen berücksichtigt. In **Abbildung 3** sind diese Flächen rot dargestellt. Bei den blau hervorgehobenen Bereichen handelt es sich um Wärmebrücken in den Verbindungen der wärmeübertragenden Bauteilflächen oder den Eckbereichen, die in den meisten Gebäudesimulationsprogrammen vernachlässigt werden. Der dadurch entstehende Fehler ist bei einem Neubau im beheizten Bereich vernachlässigbar. Für andere Analysen sind die korrekten Flächenabmessungen jedoch von Bedeutung, zum Beispiel die Kostenberechnung der Bauteilmassen und Schadstoffbelastungen die in Bauteilen gespeichert werden.

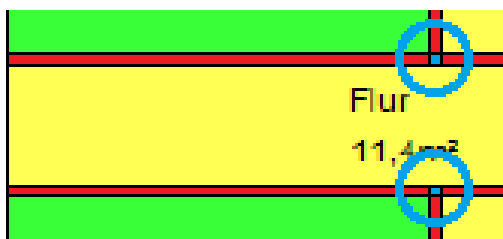


Abbildung 3: Wärmeübertragungsflächen (rot); Wärmebrücken (blau)

Für die thermische Repräsentation werden die Wärmebrücken im Gebäudesimulationsprogramm nicht zwei-dimensional, sondern nur als adiabates Bauteil modelliert, das lediglich als Wärmespeicher wirkt.

Die geometrische Beschreibung baut auf einem Ausgangsraum auf. Jeder Raum hat bei der Beschreibung eine eindeutige Kennung, eine sogenannte ID. Diese Kennung und ein Offset der Punkte werden benutzt, um die Räume im Grundriss zu platzieren.

Da bei der Verschiebung die Innenwanddicke berücksichtigt wird, ergibt sich die Rastergröße

zur Neuausrichtung der Räume, aus der Wanddicken der Wohnungstrennwände.

Nach Bearbeitung der geometrischen Informationen, erfolgt die Zuweisung weiterer Randbedingungen. Hierbei ergeben sich anhand der Position der Wohneinheiten verschiedene Varianten.

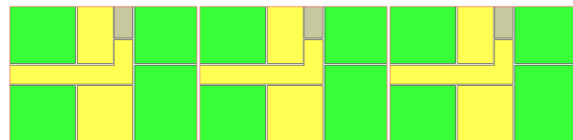


Abbildung 4: Anordnung der Wohneinheiten

Eine Wohneinheit kann keine umliegenden benachbarten Wohneinheiten besitzen oder an jeder der zwei äußeren Rändern (siehe **Abbildung 4**). Damit ergeben sich je nach Wärmeübertragungsfläche andere Konstellationen. Entweder ist eine Trennwand der Wohneinheit eine Außenwand oder ein innen liegendes Bauteil. In einer separat vorliegenden Datenbank sind Randbedingungen definiert, die für jede der möglichen Konstellationen adäquate Zuweisungen sicherstellt. Mögliche Randbedingungen sind hierbei „outerWall“, „adiabatic“ oder „innerWall“.

Nach fertigstellen des Gebäudes werden die Wohnungseinheiten (WE) eindeutig benannt. Hierbei wird dem Raumnamen eine Wohnungsnummer zugeordnet. So wird aus dem Raumnamen „Küche“ der WE 7 z.B. der Name „WE07_Küche“. Darüber ist im weiteren Verlauf die Adressierung der Zonenprofile möglich.

ZONENNUTZUNGSPROFILE MIT INTERNEN LASTEN

Die Zonenprofile beschreiben die internen Wärmelasten von Personen, Licht und elektrischen Geräten. Da diese örtlich und zeitlich differenziert auftreten, sollte im Simulationsmodell umgesetzt werden. Für das Erarbeiten der Zonenprofile dienen Quellen wie der Zensus [2], Erhebung „Wo bleibt der Strom?“ [3], als auch Industrienormen, zum Beispiel DIN V 18599 2011 [4] sowie DIN 4108 [5].

Mit der Verteilung der Personenanzahl je Haushaltsgröße (siehe **Abbildung 5**) lassen sich die Lasteinträge pro Person ermitteln. Hierbei

wird angenommen, dass eine Person durchschnittlich 13 h/Tag im Haushalt ist.

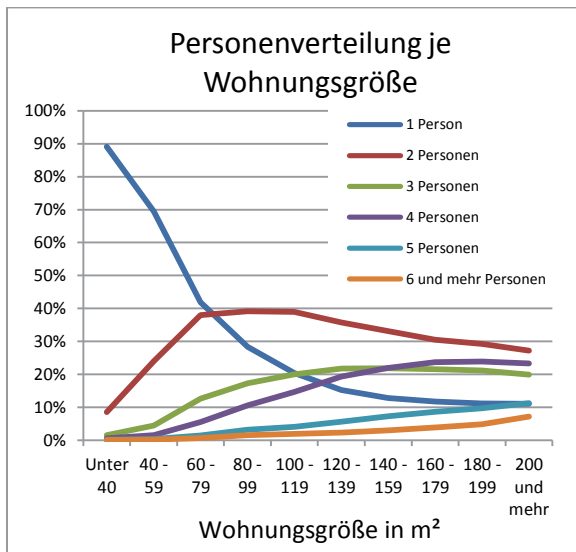


Abbildung 5 Personenverteilung je Wohnungsgröße nach Zensus [2]

Die elektrischen Lasten werden nach der Erhebung „Wo bleibt der Strom?“ ermittelt. In dieser Studie sind Verbrauchsdaten für verschiedene Haushaltsgrößen gemessen worden. Dabei ergibt sich der Verbrauch von 1800 kWh/Jahr für einen Ein-Personen-Haushalt und für einen Vier-Personen-Haushalt ermittelt sich ein Bedarf von 4480 kWh/Jahr (siehe **Abbildung 6**).

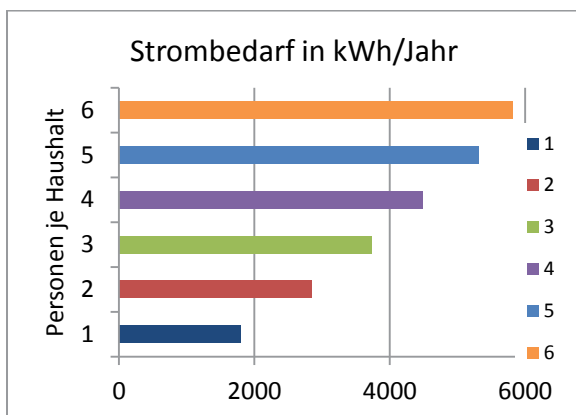


Abbildung 6 Strombedarf je Haushalt und Personenanzahl

In Abhängigkeit der Haushaltsgröße, ergibt sich ein flächenbezogener Bedarf. Hierbei unterscheidet sich der Wert deutlich von den Normvorgaben der DIN V 18599-10 und der DIN 4108-6. Da in den beiden erwähnten Normen lediglich eine flächenbezogene Summe aus allen internen Lasten aufgeführt ist, sind die

Personenlasten (siehe **Abbildung 5**) im weiteren Prozess hinzu zu fügen.

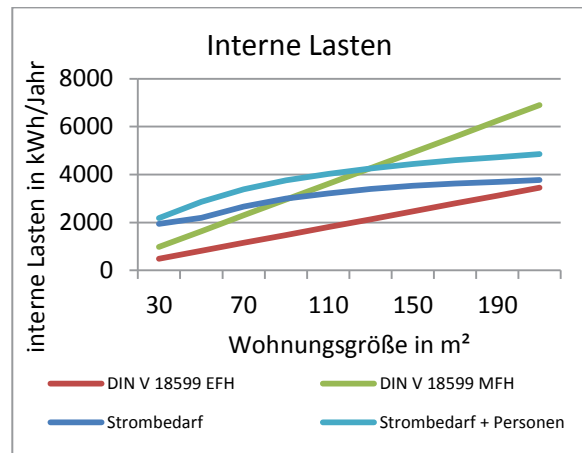


Abbildung 7 Strombedarf je Haushaltsgröße

In **Abbildung 7** wird der elektrische Bedarf und der Bedarf mit zusätzlichen Personengewinnen dargestellt. Für die heutige Bilanzierung von Bedarfen ist es nicht mehr zielführend den Bedarf von elektrischen Lasten und Personen zusammen zu addieren. Bei der Auslegung von Gebäuden spielt der Strombedarf eine entscheidende Rolle.

Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von z.B. PV-Anlagen wird der Strombedarf getrennt von den Personenwärmegewinnen, um eine Bilanzierung zu ermöglichen. Somit lässt sich die PV-Anlage nach energetischen und wirtschaftlichen Aspekten dimensionieren.

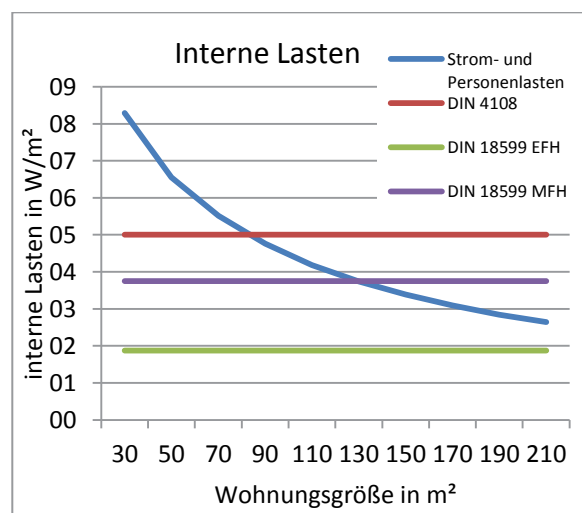


Abbildung 8 Strombedarf je Haushaltsgröße in W/m²

Der Vergleich flächenbezogener Werte in **Abbildung 8** verdeutlicht sehr gut die Abweichungen von den Vorgaben der DIN V 18599-10 und DIN 4108-6. Bei kleinen

Wohneinheiten weisen die internen Lasten einen deutlich stärkeren Einfluss vor, der mit steigender Wohnfläche abnimmt. Anhand von Messdaten [3] konnten bei Wohneinheiten mit geringer Wohnfläche, interne Lasteinträge nachgewiesen werden, die im Vergleich zu den Normwerten der DIN 18599-10 und DIN 4108-6 mehr als doppelt so hoch sind. Somit entstehen enorme Abweichungen zwischen Bedarfskalkulationen und Verbrauch. Weiterhin verteilen sich die internen Lasten nicht gleichmäßig über den gesamten Wohnraum, sondern treten verteilt auf Wohnraum und Tageszeit auf. Um dieses Verhalten realitätsnah nachzubilden, existieren für die unterschiedlichen Raumnutzungsarten Zeitpläne, in denen das unregelmäßige Auftreten der Lasten gesteuert wird.

Im Verlauf von aktuellen und abgeschlossenen Forschungsprojekten entstanden am Institut für Bauklimatik Vorlagen für diese Zeitpläne zur Anwesenheit oder Nutzung von elektrischen Geräten. Des Weiteren kann für elektrische Lasten auch das Stromprofil-H0 der BDEW [6] verwendet werden. In Abhängigkeit der Jahreszeiten, Wochentagen und Uhrzeit, existieren verschiedene Angaben von elektrischen Bedarfen.

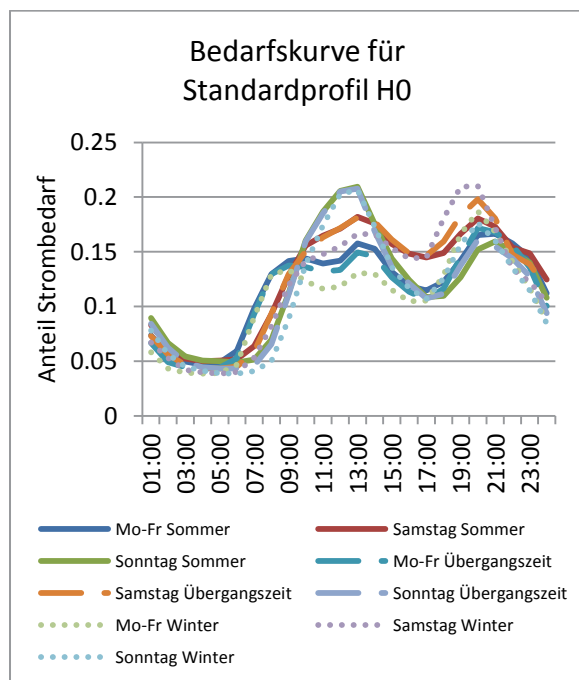


Abbildung 9 Lastprofil H0 (Wohnnutzung)

Zur Abbildung der Anwesenheitsraten von Personen in den unterschiedlichen Raumnutzungsarten, entstanden aufeinander

abgestimmte Nutzungsprofile. Hierbei beträgt die Gesamtaufenthaltsdauer einer Person 13 h/d. In Abhängigkeit der Wohnfläche variiert die Anzahl der Personen in der Struktureinheit. Hierbei ist eine zu hohe Anwesenheitsrate über alle Zonen in der Struktureinheit jedoch ausgeschlossen. Es ist nicht möglich, dass sich eine Person in mehreren Zonen gleichzeitig aufhält. Studien über fundierte und validierte Daten bezüglich der Personenanwesenheit und -tätigkeit sind derzeit Bestandteil aktueller Forschungsvorhaben und basieren gegenwärtig auf vagen Annahmen. In **Abbildung 7** ist zu erkennen, dass elektrische Lasten einen deutlich größeren Einfluss gegenüber den Personenlasten vorweisen.

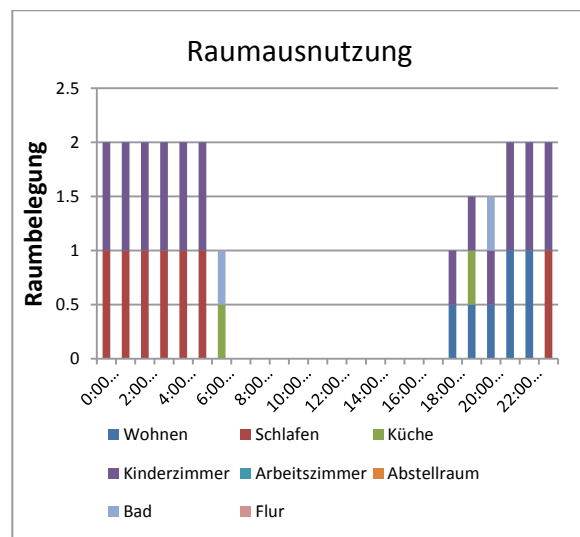


Abbildung 10 Raumausnutzung, werktags

Die Anwesenheitsrate in den einzelnen Räumen variiert in Abhängigkeit der Tageszeit. In **Abbildung 10** ist die Belegung der Räume dargestellt. Hierbei sind die Anwesenheitsraten mit der maximalen individuellen Personenbelegung pro Raum zu multiplizieren, um die absolute Personenanzahl zu erhalten.

Für vollständige Zonenprofile sind weitere Templates notwendig. Hierfür werden Thermostate mit Solltemperaturen für Heiz- und/oder Kühlbedarfen definiert, Lüftungsregelungen für Infiltration und Ventilation vorgegeben oder Verschattungsregelungen implementiert.

Durch die Zusammenfassung der einzelnen Templates zu Zonenprofilen, ist eine Modifizierung der Daten unkompliziert und schnell möglich.

ZUWEISUNG DER ZONENPROFILE

Nach der Zuweisung der vorher definierten Zonenprofile, lassen sich die möglichen internen Lasten in den Gebäudemodellen, aus dem Kapitel Grundrisserstellung, simulieren. Hierbei sind zeitliche, als auch örtliche Vorkommen möglich. Damit werden Temperaturpotentiale innerhalb einer Wohneinheit bzw. Gebäudekubatur aufgebaut.

Das zeitliche Auftreten von Lasten wird über einen Raummatrix gesteuert. Dafür erfolgt eine priorisierte Abfrage von Raumverfügbarkeit. Für die Verfügbarkeit wird nach folgenden Raumbezeichnungen gesucht:

- Küche
- Schlafzimmer
- Wohnen/Wohnschlafen/Wohnküche/Wohnschlafküche
- Bad
- Kinderzimmer
- Flur

Im Suchalgorithmus besitzen die Raumnutzungen - Küche und Schlafzimmer – die höchste Priorität, weshalb Räume mit diesen Bezeichnungen primär gesucht werden. Danach erfolgt abstuft die Suche nach Raumnutzungen mit den Bezeichnungen – Bad, Kinderzimmer, Wohnzimmer.

Ist mindestens eine der Raumbezeichnungen mit der höchsten Priorität nicht vorhanden, erfolgt eine Übertragung der internen Lasten der fehlenden Raumnutzung auf die Raumnutzung – Wohnzimmer. Hierbei erfolgt eine Umnutzung zu einer Wohnküche, Wohnschlafzimmer oder Wohnschlafküche. Ist ebenfalls das Bad nicht vorhanden, werden auch diese Lastprofile auf das Wohnzimmer übertragen. Sollte das Wohnzimmer nicht vorhanden sein, wird der Raum mit der größten Grundfläche innerhalb der Wohneinheit zum Wohnzimmer definiert.

Weiterhin muss als Nutzereingabe eine Personenanzahl für die Wohneinheit vorgegeben werden. Als Standardwert dient die Personenanzahl nach der Haushaltsgröße aus *Abbildung 5*. Anhand der Personenanzahl wird im Algorithmus berücksichtigt, ob beispielsweise das Kinderzimmer mit internen Lasten belegt wird. Erst ab einer minimalen Personenanzahl von drei, erfolgt die Zuweisung von internen Lasten im Kinderzimmer. Dabei werden diese gleichmäßig auf die Kinderzimmer verteilt.

Wichtig dabei ist das die Personen immer nur ganzzahlig auftreten können. Ein Belegung mit den Werten 50 % pro Stunde indiziert immer eine Belegung des Raumes für eine halbe Stunde.

DEMONSTRATOR

Die beschriebenen Algorithmen sind erfolgreich in das Planungswerkzeug BIM HVACTool1 (siehe *Abbildung 11*) integriert. Hierbei handelt es sich um eine Eingabemaske für verschiedene Simulationssolver². Mit Hilfe von BIM HVACTool können Projektdateien für den Strömungssolver OpenFOAM³, die thermischen Gebäudesimulationssolver EnergyPlus⁴ und NANDRAD⁵, sowie der Tageslichtsolver Radiance⁶ erstellt werden.

BIM HVACTool bietet große Vorteile zur Erstellung des thermischen Modells. Neben der schnellen und einfachen Eingabe, lassen sich verschiedene Formate aus CAD-Programmen wie SketchUp, Revit, Nemetschek oder IFC 2x3 importieren.

Des Weiteren ist BIM HVACTool derzeit die einzige grafische Benutzungsschnittstelle zur Eingabe und Simulation von NANDRAD-Projektdateien.



Abbildung 11 BIM HVACTool Logo

Verwendbar sind die vorgestellten Algorithmen für alle unterstützten Solver in der Applikation. Für OpenFOAM und Radiance sind in erster Linie nur die geometrischen Informationen und die Randbedingungen bzw. Konstruktionszuweisungen von Bedeutung. Die

¹ www.bimhvactool.com

² Solver ist ein Gleichungslöser, der für bestimmte physikalische Problemstellungen effiziente mathematische Lösungsmethoden anwendet um eine Lösung zu erzielen.

³ www.openfoam.com

⁴ <https://energyplus.net>

⁵ <http://bauklimatik-dresden.de/nandrad>

⁶ www.radiance-online.org

thermischen Gebäudesimulationssolver benötigen zusätzlich die vorher beschriebenen Zonenprofile.

In aktuellen Forschungsvorhaben des Instituts für Bauklimatik, sind thermische Mehrzonen-Simulationen auf Quartierslevel/-ebene (siehe **Abbildung 12**) im Fokus. Daher sind die schnelle Erstellung der Gebäude-Kubatur und Zuweisung von allen notwendigen Randbedingungen erforderlich.

Zudem ist im BIM HVACTool eine schnelle Ausrichtung der Gebäude an eingeladenen Objekten, wie Lageplan oder Karten, zum Beispiel aus Openstreetmap⁷ möglich. Die korrekte Ausrichtung der Dachflächen ermöglicht zudem eine exaktere Bilanzierung der PV- oder PVT-Paneele. Weiterhin sind Strömungssimulationen für die Nutzung von Windkraftanlagen durchführbar.

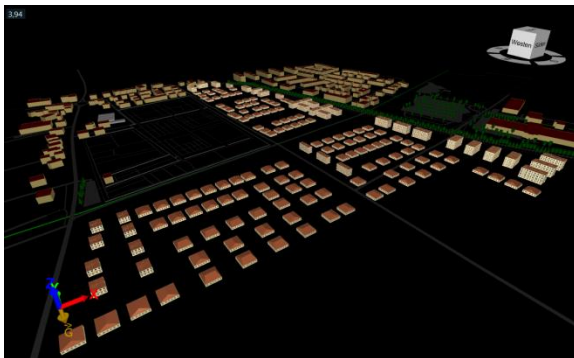


Abbildung 12 Neubau Stadtquartier (Vordergrund) und Bestandsgebäuden aus Openstreetmap (Hintergrund)

Diese Aufbereitung von Gebäuden erlaubt ebenso das Abbilden von Nah- und Fernwärme-/kälte-Trassen. Mit der schnellen Erstellung von Gebäuden und Kubaturen lässt sich der Wärme-

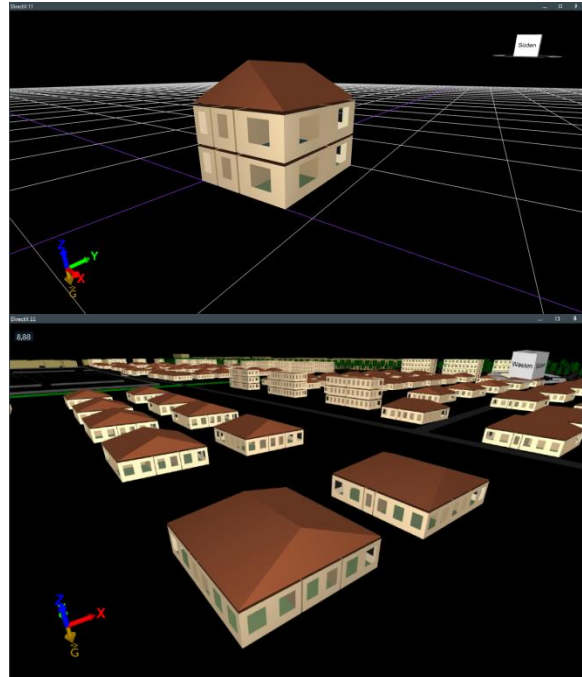


Abbildung 14 EFH 2-geschossig oben; Bungalowstil unten

oder Kältebedarf simulieren. Durch Hinzufügen der Zonenprofile stehen weitere Berechnungsergebnisse, wie Strombedarf und -produktion zur Verfügung.

Weiterhin kann auf Gebäudelevel ein Kubaturvergleich (siehe **Abbildung 14**) stattfinden, der die Einsparung im Energiebedarf aufzeigt. Gebäudeformen wie Einfamilienhaus in Bungalow-Baustil oder Mehrgeschossbauweise können schnell bewertet werden.

Mit Unterstützung durch die thermische Gebäudesimulation, konnte aus dem Kubaturvergleich für eine gleichgroße Wohnfläche und konstruktivem Standard (EnEV 2016) ein Einsparpotenzial von ca. 7 % ermittelt werden (siehe **Tabelle 1**).

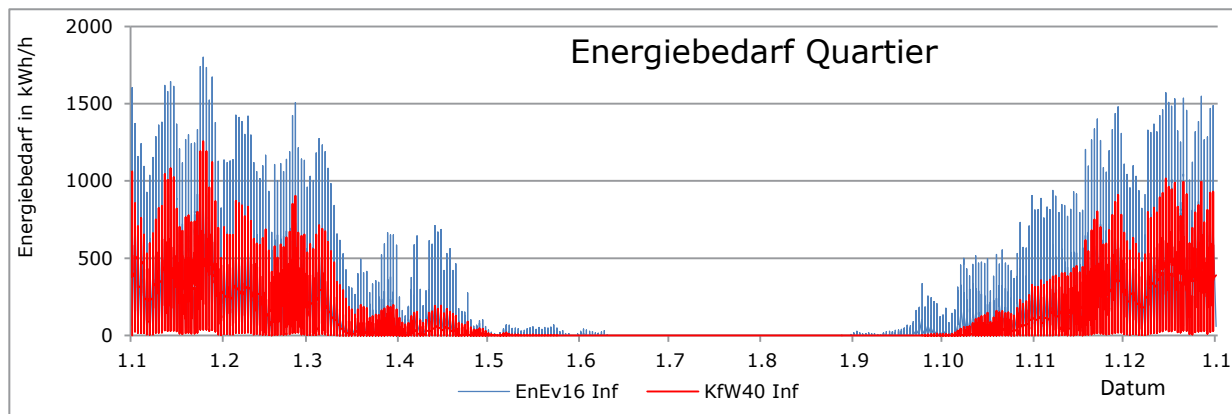


Abbildung 13 Energiebedarf Quartier

⁷ www.openstreetmap.de

Tabelle 1 Vergleich EFH in Bungalow- und Mehrgeschossbauweise

Geschosse	L x B x H in m	Energiebedarf in kWh/Jahr
1	13.1 x 13.05 x 2.8	16 500
2	8.2 x 10 x 5.6	15 400

In **Abbildung 14** ist der Energiebedarf für das gesamte Quartier (**Abbildung 12**) abgebildet. Zu erkennen sind die verschiedenen Spitzenbedarfe, die sich aus dem Heizbedarf der Wohneinheiten ergeben. Hierbei wird der Heizenergiebedarf ermittelt, der notwendig ist, um die thermischen Zonen von der Absenkttemperatur auf die Solltemperatur zu konditionieren. Zur Reduzierung dieser Spitzenbedarfe, können verschiedene Methoden und Technologien angewendet werden. Einerseits können Warmwasser- oder elektrische Speicher im Gebäude selbst benutzt werden oder ein Zentralspeicher versorgt das Quartier. Ebenso ist eine Kombination aus beiden Varianten möglich. Mit den Ergebnissen solcher Studien kann schnell mit Investitionen und die Übertragung der Energiebedarfe in Energiekosten ein wirtschaftlicher Lösungsansatz gefunden werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde gezeigt, dass eine schnelle, leistungsfähige und erweiterbare Gebäudeerstellung mit hohem Detaillierungsgrad möglich ist. Mit der zusätzlichen Algorithmik für die Erstellung der Zonenprofile ist ebenso der Bereich interne Lasten und Steuerung sehr gut abgebildet. Die Baukonstruktionen sind bei der Gebäudeerstellung auszuwählen und werden anschließend automatisch zugewiesen. Hierfür können Standardvorlagen zum Beispiel vom Softwareprogramm Teaser [7] oder die Konstruktionsdatenbank altbaukonstruktionen.de [8] genutzt werden. Weiterhin ist es jederzeit möglich eigene Konstruktionsdaten zu verwenden.

Mit dem Planungswerkzeug BIM HVACTool wird zudem eine gute Prüfbarkeit (**Abbildung 15**) geboten. Somit wird die Fehleranfälligkeit deutlich reduziert.

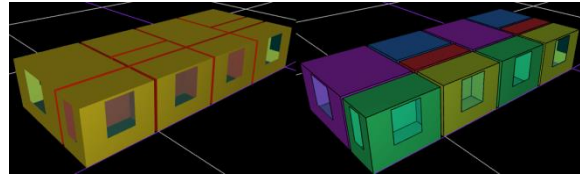


Abbildung 15 Falschfarbendarstellung für Randbedingungen (links); verschiedene Zonendarstellung (rechts)

Die Anlagentechnik wird derzeit nur gering betrachtet. Dies sollte in nächster Zeit unbedingt ausgebaut werden, denn auch in Anlagensystemen stecken Einsparpotenziale.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] B. Hartmann, Energetisches und wirtschaftliches Optimierungsverfahren zur Auswahl von textil - oder carbonbewehrten Fassaden -elementen mit Hilfe der Gebäudesimulation, Dresden, Deutschland, 2015.
- [2] „Zensus - Private Haushalte nach Größe des privaten Haushalts und nach Fläche der Wohnung (20m²-Intervalle),“ 09 April 2018. [Online]. Available: https://ergebnisse.zensus2011.de/#StaticContent:00,GWZ_4_3_2,m,table. [Zugriff am 09 April 2018].
- [3] EnergieAgentur.NRW, Erhebung "Wo bleibt der Strom?", EnergieAgentur.NRW, Mai 2011.
- [4] DIN V 18599, Beuth, 2011.
- [5] DIN 4108, Beuth, 2013.
- [6] „Stadtwerke Unna,“ 10 04 2018. [Online]. Available: http://www.gipsprojekt.de/featureGips/Gips;jsessionid=C122ED95F9D68D832F1E473FEEC2F587?SessionMandant=sw_unna&Anwendung=EnWGKnotenAnzeigen&PrimaryId=133029&Mandantkuerzel=sw_unna&Navigation=J. [Zugriff am 10 04 2018].
- [7] RWTH, „TEASER – “Tool for Energy Analysis and Simulation for Efficient Retrofit” veröffentlicht,“ 11 Mai 2018. [Online]. Available: <http://www.ebc.eonerc.rwth-aachen.de/cms/EON-ERC-EBC/Das-Institut/Aktuelle-Meldungen-Center/~gips/Modelica-Bibliothek-AixLib-veroeffentlic/>. [Zugriff am 11 Mai 2018].
- [8] „Altbaukonstruktion,“ 11 Mai 2018. [Online]. Available: <http://www.altbaukonstruktionen.de/>. [Zugriff am 11 Mai 2018].

II. GEBÄUDEDIMENSIONIERUNG UND BETRIEBSOPTIMIERUNG

GANZHEITLICHE ENERGIEEFFIZIENZ DURCH VERNETZUNG VON PRODUKTION, THERMISCH AKTIVIERTER GEBÄUDEHÜLLE UND SPEICHER

Ch. Blatt¹

¹ Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Abteilung Werkstoffe und Konstruktion, Universität Stuttgart, Stuttgart, Germany

KURZFASSUNG

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Nutzung von Umweltenergie, vorwiegend zur Kühlung von Gebäuden und Maschinen am Beispiel einer Maschinenfabrik. Der Vorteil liegt insbesondere in der kostenfreien Verfügbarkeit sowie dem geringen Primärenergiebedarf durch die Bereitstellung der Hilfsenergie. Besondere Aufmerksamkeit wird hierbei der ganzheitlichen Betrachtung des Gesamtsystems, bestehend aus einer bauteilaktivierten Gebäudehülle, Betonwasserspeichern und der Anlagentechnik mit innovativer Regelung, gewidmet. Die Untersuchungen stützen sich dabei auf die thermische Gebäudesimulation in Kombination mit Monitoringdaten der Maschinenfabrik sowie Messungen an einem Versuchsstand. Erste Ergebnisse zeigen, dass das Ziel, den Kühlbedarf ganzjährig durch Umweltenergie zu decken, durch die Kombination künstlich beregneter thermisch aktivierter Betonbauteile, Betonwasserspeicher und passiver Kühlung bei ausreichender Behaglichkeit erreicht werden kann.

Abstract

The present paper deals with the usage of environmental energy, mainly for the cooling system in buildings and for machinery, using the example of a machine factory. The advantage of using environmental energy is especially the free availability and the low primary energy consumption exclusively for the supply of auxiliary energy. Particular attention is given to a holistic approach of the entire system, consisting of thermal activation of building structure, heat storage tanks of concrete and an innovative control system. The study is based on thermal building simulations in combination with monitoring data of the machine factory as well as measurements at a pilot plant. First results have shown that the goal of meeting the cooling demand year-round with environmental energy could be achieved by the combination of passive cooling with free

ventilation and active cooling with sprinkled capillary tube mats in conjunction with tanks of concrete with sufficient standard of comfort.

EINLEITUNG

Der Nutzung von Umweltenergien zum Heizen und Kühlen im Gebäude wird eine immer größere Bedeutung zugemessen. Umweltenergien sind Energien, die kostenfrei und unmittelbar zur Verfügung stehen. Die wesentlichsten Quellen der Umweltenergien sind die Solarstrahlung, das Erdreich, das Wasser, der Wind und die Umgebungsluft.

Im Rahmen eines Verbundforschungsvorhabens wurde die Gebäudehülle einer Maschinenfabrik vollmineralisch aus hybriden Betonfertigteilen erstellt (Abbildung 1). Die inneren und äußeren Oberflächen der Gebäudehülle wurden in hohem Maße thermisch aktiviert. Mit Blick auf das Gesamtsystem werden zur energetischen Optimierung einer Fabrik üblicherweise die Teilsysteme Gebäudehülle, haustechnische Anlagen und Werkzeugmaschinen individuell betrachtet. Im Gegensatz dazu werden im folgenden Ansatz die Produktionsprozesse mit den Energieflüssen des Gebäudebetriebs synergetisch verknüpft.



Abbildung 1: Maschinenfabrik aus hybriden Betonfertigteilen

In dieser Arbeit wird das Verhalten zur Kühlung des Gebäudes und der Maschinenabwärme insbesondere mit Umweltenergien sowie Speichertechnologien mit Regelkonzepten mittels

thermischer Gebäudesimulation und Messungen in situ untersucht.

Zielstellung

Ziel ist es, durch die energetische Interaktion aller Systeme und mit innovativen Regelkonzepten den Primärenergiebedarf für die Produktion wie auch den Betrieb der technischen Infrastruktur zur Raumkonditionierung im Vergleich zum Neubau mit konventioneller Bauweise und Kühlung deutlich zu senken. Im Energiekonzept kommen dabei thermisch aktivierten Bauteilen, wie auch Kälte- und Wärmespeichern eine zentrale Bedeutung zu, um in Abhängigkeit von Bedarf und Angebot den Energiefluss zu optimieren. Mit einem umfangreichen Monitoring aus einem im Vorfeld erstellten Demonstrator und der eigentlichen Maschinenfabrik werden Gebäudesimulationsmodelle mittels IDA ICE validiert und daraus eine optimierte energieeffiziente Regelstrategie entwickelt.

BAUTEILAKTIVIERTE GEBÄUDEHÜLLE

Im Fabrikgebäude kommen in den opaken Wand- und Dachflächen bauteilaktivierte Betonfertigteile zum Einsatz. Hier wurden raumseitig hybride massive Elemente aus hochfestem Beton gefertigt, auf die nass in nass eine 30 cm dicke Mineralschaumlage als Dämmschicht im Wand- bzw. 40 cm im Dachbereich aufgebracht wurden. Nach der Montage wurden den Wand- und Dachflächen dünnwandige UHPC-Platten (Ultra High Performance Concrete) mit ca. 10 cm Hinterlüftung vorgehängt, bzw. aufgelegt (Abbildung 2).

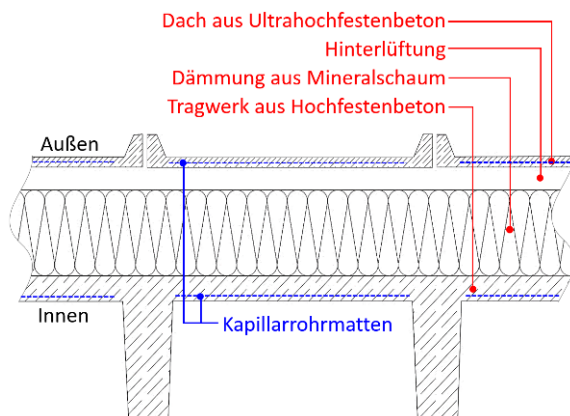


Abbildung 2: Thermisch aktivierter Dachaufbau

Um die innere Raumschale und die äußere UHPC-Schale der Modellfabrik thermisch aktivieren zu können, wurden sowohl die Stahlbe-

ton-Fertigteile an den raumseitigen Elementoberflächen wie auch die UHPC-Schalen mit Kapillarrohrmatten versehen. Die Kapillarrohrmatten zur kombinierten Flächenheizung und Flächenkühlung bestehen aus Polypropylen mit einem Innendurchmesser von 4,5 mm. Die Rohrwandstärke misst 0,8 mm und der Abstand der Rohrleitungen untereinander beträgt 20 mm bis 30 mm. In der Halle sind Maschinen aufgestellt die bei der Produktion Abwärme erzeugen und auf Raumtemperatur gekühlt werden müssen. Die Maschinenabwärme wird im Winter über die thermisch aktivierten Betonelemente dem Innenraum der Maschinenhalle als Wärme zugeführt. In Abbildung 3 sind die thermisch aktivierten Dach- und Wandbetonfertigteile beim Beheizen der Maschinenhalle zu sehen.



Abbildung 3: Winterfall innenliegende Kapillarrohrmatten in den Dach- und Wandbauteilen

Die Kapillarrohrmatten liegen oberflächennah in dem Betontragwerk welches PI-förmig ausgebildet ist. Im Wandbereich wurden die Kapillarrohrmatten ca. 6 m hoch eingebaut, im Deckenbereich je Seite 7 m. Aufgrund der großen Flächenverteilung der Kapillarrohrmatten ist in der Maschinenhalle überall ein gleichmäßiges, angenehm temperiertes Raumklima gegeben. Überschüssige Wärme hingegen, die nicht mehr zum Beheizen der Halle benötigt wird, kann in den Betonwasserspeichern kurzzeitig gespeichert werden oder über die äußeren, thermisch aktivierten Fassaden- und Dachplatten an die kältere Umgebung in Form von Konvektion und Wärmestrahlung passiv an die Umgebung abgegeben werden. Die an heißen Sommertagen bei laufender Produktion erzeugte Abwärme, die keiner weiteren Nutzung zugeführt werden kann, muss üblicherweise durch Kältemaschinen, die meist mit elektrischer Energie zu betreiben sind, abgeführt werden. Hier wird die überschüssige

Produktionswärme den dünnwandigen, außenliegenden Fassaden- und Dachplatten aus UHPC, die durch ca. 300 m² Kapillarrohrmatten thermisch aktiviert werden können, zugeführt (Abbildung 4).

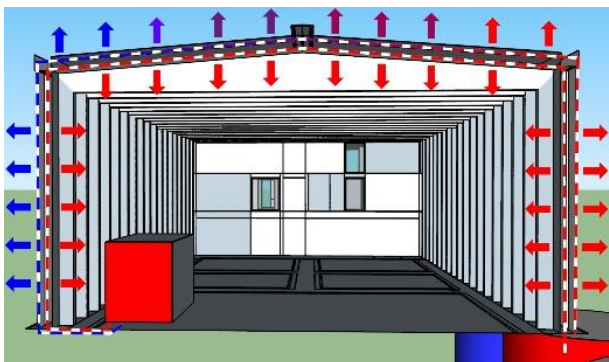


Abbildung 4: Winterfall thermisch aktivierte Gebäudehülle

Gekühlt wird im Sommer in der Nacht über langwellige Wärmestrahlung gegen den klaren Himmel (Strahlungsnacht) oder am Tag durch Verdunstungskühlung, indem das gespeicherte Regenwasser der Dachoberfläche durch ein Berieselungssystem zugeführt wird. Das abgekühlte Medium wird gespeichert oder direkt den Maschinen oder den innenliegenden Kapillarrohrmatten zur Kühlung wieder zugeführt (Abbildung 5).

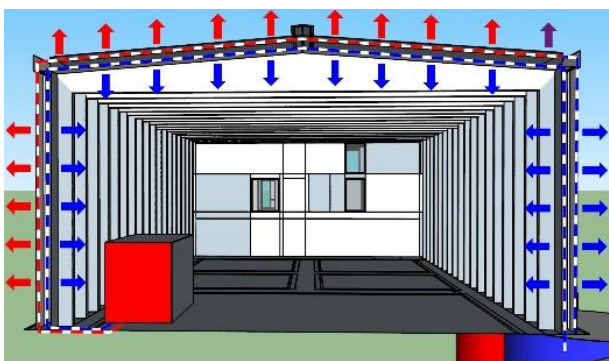


Abbildung 5: Sommerfall thermisch aktivierte Gebäudehülle

Die äußeren, thermisch aktivierten Fassaden- und Dachplatten bieten zudem die Chance, Umweltwärme im Sinne eines Massivabsorbers in die großvolumigen Speicher zu führen und in den Übergangstagen im Frühjahr und Herbst den Flächenheizungen u.a. in den Büroräumen zuzuführen.

Kühlungskonzepte

Um auf eine übliche Kühlung mit elektrischer oder fossiler Energie weitgehend verzichten zu

können, werden die thermisch aktivierten UHPC-Schalen der äußeren Hüllfläche genutzt, indem diesen die überschüssige Abwärme der Maschinen und aus den Speichern gesammelten Wärme zugeführt wird. Die so erwärmten UHPC-Schalen geben die Wärme über Konvektion bzw. Wärmestrahlung in den Nachtstunden ab. Durch Berieselung der Dachflächen mit, in einer Zisterne gesammeltem Regenwasser, wird den Bauteilen die Wärme infolge der für die Verdunstung an der Oberfläche erforderlichen Enthalpie, auf kohlenstoffdioxidneutrale Weise entzogen (Trogisch A., Franzke U. 2016). Dieses System soll den Kühlbedarf der Prozesse und des Gebäudes weitgehend ganzjährig decken. Zur Berieselung der UHPC-Dachplatten werden Sprühdüsen eingesetzt, mit denen die Dachplatten gleichmäßig flächendeckend berieselt werden können, um auch an sonnigen Tagen trotz des Eintrags von Solarstrahlung durch Verdunstung eine Abkühlung zu erzielen. In den Dachplatten sind auf der Außenseite 43 Felder mit Kapillarrohrmatten von je 7 m² Fläche, also insgesamt 301 m², integriert (Abbildung 6).



Abbildung 6: Berieselungssystem auf dem Dach

Das durch Verdunstungs- und Strahlungskühlung abgekühlte Medium kann direkt oder über die Betonwasserspeicher den Maschinen und der innenliegenden Decken bzw. den Wänden zur Kühlung zugeführt werden. Des Weiteren wurde eine gezielte Nachtlüftung im Sommer untersucht, die die Maschinenhalle auf einem behaglichen Raumklima halten soll. Insgesamt kann dabei zwischen passiver und aktiver Kühlung unterschieden werden. Während die Maschinenhalle in den Nachtstunden insbesondere passiv durch Öffnung der Dachfenster und des Hallentores gekühlt werden kann, findet eine aktive Kühlung zwischen den inneren und äußeren bauteilaktivierten Elementen mit Wärmestrahlung, Verdunstungskühlung und Abkühlung mit gespeichertem kaltem Regenwasser sowie

durch die gespeicherte Kälte aus den Betonwasserspeichern statt.

Betonwasserspeicher

Im Energiekonzept der Modellfabrik sind drei Betonwasserspeicher im Erdreich eingebaut worden (Abbildung 7). Die Betonwasserspeicher sind mit Wasser als Speichermedium gefüllt, wobei jeder Speicher mit einem Wärmetauscher im Kellergeschoss der Fabrik verbunden ist.



Abbildung 7: Einbau der drei Betonwasserspeicher

Die Abwärme der Maschinen gelangt über das Warmwassernetz im Temperaturbereich zwischen 32 °C und 42 °C in den Warmwasserspeicher „Grün“ mit 25 m³ (Abbildung 8). Das warme Wasser wird in den mittleren Speicher „Rosa“ mit 13 m³ überführt, der mit dem Kapillarrohrmatten auf dem Dach verbunden ist.

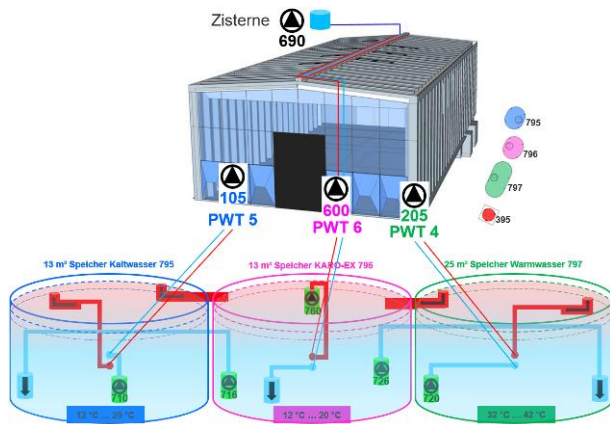


Abbildung 8: Speicherschema in Verbindung mit dem Dach

Nach der Abkühlung je nach Außenklima und Temperaturniveau wird das gekühlte Medium den Maschinen wieder zur Kühlung über das Kaltwassernetz zugeführt oder in dem dritten Speicher „Blau“ mit einem Temperaturbereich zwischen 12 °C und 20 °C gespeichert.

Demonstrator

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden zahlreiche Untersuchungen an einem Freibewit-

terungsversuchsstand durchgeführt. An dem Versuchsstand wurde insbesondere die Kühlleistung der bauteilaktivierten Dachplatten untersucht. Die Messdaten wurden ausgewertet und zur Validierung der Gebäudesimulation verwendet. Die Vielzahl der unter realen Umweltrandbedingungen in den Versuchen gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass sich aktivierte Außenschalen, sowohl als Massivabsorber zur Umweltwärmegewinnung, wie auch zur umweltfreundlichen Abführung von Wärme mittels Strahlung, Konvektion und Verdunstung bei produktionsbedingten Wärmeüberschüssen in hervorragender Weise eignen.



Abbildung 9: Freibewitterungsversuchsstand

Monitoring

Zur Evaluierung der thermisch aktivierten Gebäudehülle und des Raumklimas wurde ein Forschungsmonitoring entwickelt und installiert. Dieses dient der Erfassung und Bewertung der Raumklimaverhältnisse im Forschungsbetrieb und der Evaluation der innovativen Bauteile mit integrierten Kapillarrohrmatten sowie der Speicher. Drei Dachelemente und vier Wandelemente wurden mit rund 350 Sensoren für das Forschungsmonitoring ausgestattet. Ziel des Bauteilmonitorings ist es, die Temperaturen im Bauteil sowie die Temperaturen und die relative Luftfeuchte im unmittelbaren Umfeld des Bauteils zu messen. Dazu wurde die Sensorik in verschiedenen Höhen und Tiefen in die Dach- und Wandelemente montiert. Die Montage der Sensoren erfolgte in den jeweiligen Fertigungswerken für das Tragwerk und der Außenhülle. In Abbildung 10 ist einer von mehreren Sensorbäumen dargestellt. Der Sensorbaum wurde mit bis zu 10 Sensoren vorgefertigt und dann an der

Bewehrung des Tragwerks montiert. Die Temperaturen werden im Bereich der blauen Kapillarrohrmatten schichtenweise im Tragwerk und in der Dämmung erfasst (Blatt 2017).



Abbildung 10: Sensorbaum im Tragwerk

Mit dem Monitoring können Temperaturverläufe in den mehrschichtigen Decken- und Wandbauteilen, der Wärmedurchgangswiderstand sowie Oberflächentemperaturen und Feuchte erfasst werden. Die Lage der Sensoren im Dachelement ist der Abbildung 11 dargestellt und nachfolgend beschrieben.

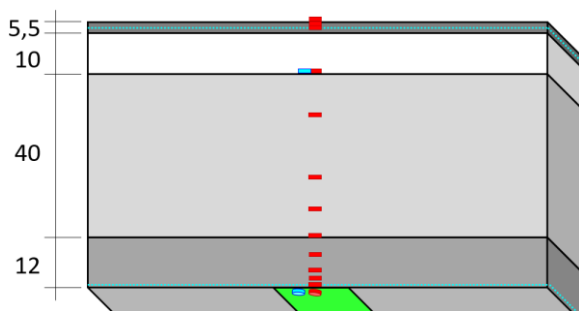


Abbildung 11: Positionen der Sensoren im Dachaufbau

In dem 12 cm dicken Tragwerk ist an der Rauminnenseite eine Wärmeflussplatte mit Temperatur- und Luftfeuchtesensor montiert. Im Tragwerk sind weitere Temperatursensoren in 5 mm, 25 mm, 40 mm und 80 mm und im Mineralschaum in 5 mm, 75 mm, 150 mm, 300 mm montiert. Auf der Oberfläche des Mineralschaums, in der Lüftungsebene ist wiederum ein Temperatur- und Luftfeuchtesensor montiert. In der Dachplatte sind mittig in einer Tiefe von 27 mm und 53 mm (oberflächennah) zur Außenseite Temperatursensoren eingebaut sowie auf der Außenseite.

Zur Kontrolle der Berieselungsaktivität wurde auf dem Dach, jeweils auf der Ost- und Westseite, unter den Düsen der künstlichen Beregnungsanlage ein Regensensor montiert. Mit den hiermit gemessenen Ereignissen (trocken oder nass) können die Zyklen der witterungsbedingten Regenereignisse, wie auch die zur Verdunstungs-

kühlung gezielt vorgenommenen künstlichen Berieselungen der Dachflächen beobachtet werden. Dies ist für die spätere Dokumentation und Auswertung unerlässlich. Außerdem wurde eine Wetterstation auf dem Dach aufgestellt, die mit dem Gesamtmonitoring gekoppelt ist. Das Klimamonitoring umfasst die Außen- und Raumtemperaturen, die relativen Luftfeuchten im Innen- und Außenbereich, die Windrichtungen, die Windgeschwindigkeiten, Globalstrahlung sowie die Niederschlagsmessungen. Die Aufzeichnungen des Klimamonitorings werden zur Validierung der Ergebnisse der thermischen Gebäudesimulation herangezogen. Das Monitoring ist demzufolge unverzichtbar für die Bewertung der den numerischen Berechnungen zugrunde gelegten Berechnungsansätze. Insgesamt werden in der Maschinenfabrik derzeit ca. 3000 Datenpunkte erfasst.

Ergebnisse zur Kühlleistung

Die Produktionsanlagen und Werkzeugmaschinen erfordern eine jahreszeitbedingte übliche Raumtemperatur zwischen 18 °C und 26 °C. Im Sommer 2017 wurden Versuche zur Kühlleistung durchgeführt. Hierzu wurden die inneren Kapillarrohrmatten mit den äußeren Kapillarrohrmatten gekühlt. Zur Ermittlung der Leistungszahl (Energy Efficiency Ratio) wird die Kühlleistung ins Verhältnis zur Pumpenleistung gesetzt. Die elektrische maximale Nennleistung der Pumpen für die außenliegenden Kapillarrohrmatten liegt bei 345 W, für die inneren Kapillarrohrmatten bei 626 W und für die Berieselung bei 800 W.

$$\text{EER} = \text{Kühlleistung} / \text{elektrische Leistung} \quad (1)$$

In Abbildung 12 ist die Untersuchung ohne Dachberieselung im August in den Nachtstunden dargestellt.

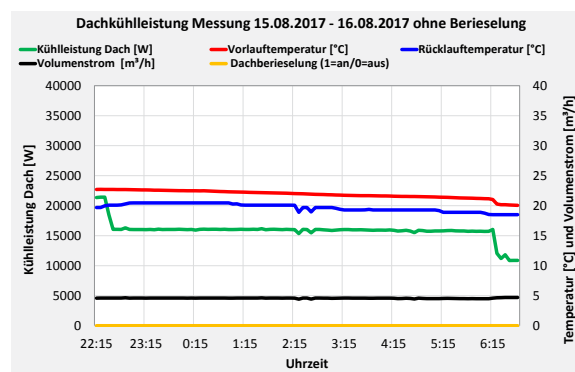


Abbildung 12: Dachkühlleistung im Sommer ohne Berieselung

Dabei lag die Außentemperatur bei 17 °C, die Vorlauftemperatur bei 22 °C und die gekühlte Rücklauftemperatur bei 20 °C. Es wurde eine Kühlleistung von 16 kW über die Dachfläche erzielt und eine Leistungszahl von 16,5 erreicht.

$$EER = 16 \text{ kW} / 0,971 \text{ kW} = 16,5 \quad (2)$$

Ein weiterer Versuch erfolgte am nachfolgenden Tag mit Berieselung der Dachfläche, wobei die Außentemperatur bei 15 °C, die Vorlauftemperatur bei 26 °C und die gekühlte Rücklauftemperatur bei annähernd 20 °C lag. Hierbei konnte eine Leistungszahl von 19,2 erreicht werden.

$$EER = 34 \text{ kW} / 1,77 \text{ kW} = 19,2 \quad (3)$$

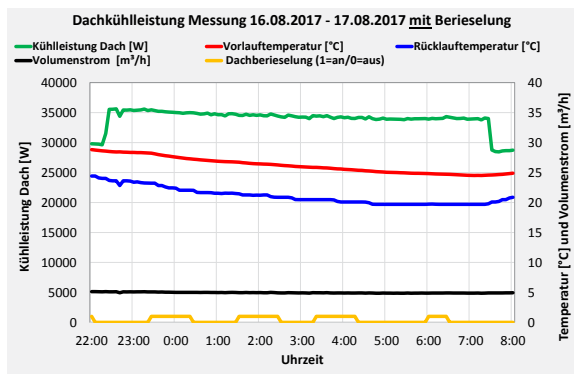


Abbildung 13: Dachkühlleistung im Sommer mit Berieselung

Aus den beiden zuvor dargestellten Grafiken wird ersichtlich, dass auch im Sommer die Zieltemperatur erreicht werden kann.

Im Folgenden soll durch das Verhältnis der benötigten Kühlmenge zur Kühlleistung die benötigte Zeit zur Kühlung der Produktionsanlagen und Werkzeugmaschinen abgeschätzt werden, wobei von einem durchschnittlichen täglichen Kühlbedarf von etwa 100 kWh je Arbeitsschicht ausgegangen wird.

$$\text{Zeit} = \text{Kühlmenge} / \text{Kühlleistung} \quad (4)$$

Ohne Berieselung wäre folglich die Kühlung in ca. 6 Stunden und mit Berieselung in ca. 3 Stunden erreicht.

$$100 \text{ kWh} / 16 \text{ kW} = 6,25 \text{ h} \quad (5)$$

$$100 \text{ kWh} / 34 \text{ kW} = 2,94 \text{ h} \quad (6)$$

Weitere Untersuchungen zur Kühlung erfolgten im Juli und August 2018. In nachfolgender Abbildung 14 sind Ergebnisse mit und ohne Berieselung von Teildachflächen an zwei Tagen dargestellt.

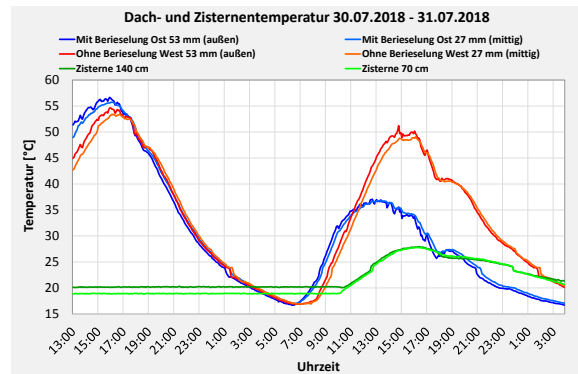


Abbildung 14: Dachtemperaturen 30.7.2018-31.7.2018

Die rote und orangenen Kurven sind Teilflächen die nicht berieselt wurden. Die blauen Kurven zeigen Flächen mit Temperaturen die am zweiten Tag berieselt wurden. Kurz vor 11:00 Uhr wurde die künstliche Beregnung aktiviert. Die berieselten Dachplatten haben ein niedrigeres Temperaturniveau als die unberieselten Dachplatten, gleichzeitig steigt die Zisternentemperatur tagsüber an. Zyklen mit optimierter Taktung für die eigentliche Verdunstung, unter Berücksichtigung der Solarstrahlung und Konvektion, sollen noch in die Gebäudeautomation eingearbeitet werden.

Thermische Gebäudesimulation

In Abbildung 15 ist das dreidimensionale Gebäude in IDA ICE dargestellt, im Vordergrund die Maschinenhalle Südseite und auf der Nordseite der Bürotrakt.

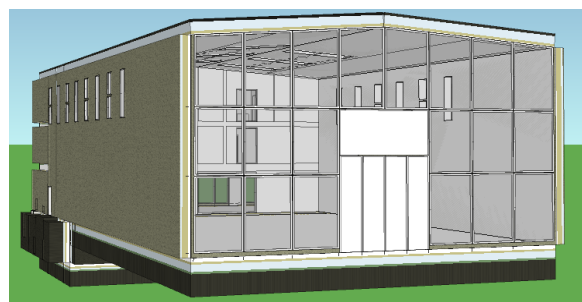


Abbildung 15: 3D-Gebäude IDA ICE

Ziel ist es, mit der Gebäudesimulation ein Modell zu entwickeln, bei dem ein Regelkonzept zur Kühlung der Maschinenabwärme und der Maschinehalle für ein behagliches Raumklima erstellt wird, welches sich auf andere Gebäude übertragen lässt. Für die Gebäudesimulationen in IDA ICE mussten eine Vielzahl von Komponenten zur thermischen Konditionierung von Bauteilen in Modellansätzen abgebildet werden. So wurde auch die Kühlung respektive Behei-

zung des Hallenbereichs mittels der aktivierten raumseitigen Wand- und Deckenelemente modelliert. Des Weiteren wurde für die Dachberegung eine neue Komponente entwickelt, die mit Ergebnissen vom Freibewitterungsversuchsstand validiert wurde.

In Abbildung 16 ist das Schema der Anlagentechnik und die Regelungslogik der thermischen Gebäudesimulation in IDA ICE zu sehen. Links die Eingangsgrößen für die Regelung der Hallen- und Rücklauftemperaturen der außenliegenden Kapillarrohrmatten, links unten die hinterlüftete berieselte Dachkonstruktion mit den außenliegenden Kapillarrohrmatten, rechts unten die innenliegenden Kapillarrohrmatten im Tragwerk und rechts die Erzeuger zum Heizen. In der Mitte ist ein Speicher mit 38 m³ zu sehen.

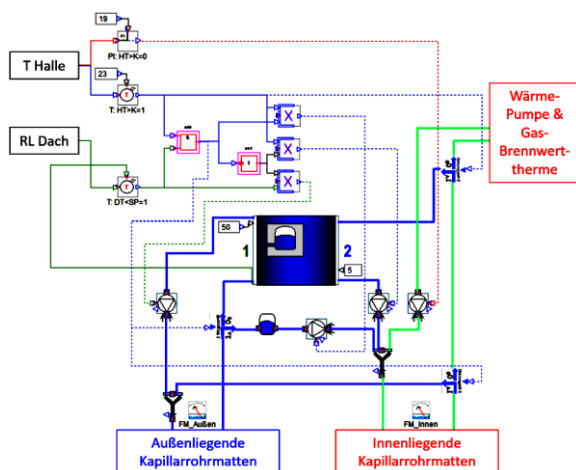


Abbildung 16: Anlagentechnik in IDA ICE

Nachfolgend sind in Tabelle 1 ein Referenzmodell und sechs Varianten zur Kühlung der Halle mit Umweltenergien dargestellt. Das Referenzmodell zeigt die Halle ohne jegliche Kühlung und die Auswirkungen der Hallentemperaturen bei geschlossenen Fenster und Hallentor. In der zweiten Variante wird die Halle direkt durch die außenliegenden Kapillarrohrmatten gekühlt. Bei der dritten Variante wird nur passiv, insbesondere durch Nachtlüftung, die durch Öffnen des Tores und der Dachfenster realisiert wird, gekühlt. Bei der vierten Variante wird zusätzlich zur direkten Kühlung durch die außenliegenden Kapillarrohrmatten, das Dach künstlich beregnet. Bei der fünften Variante werden zur direkten Kühlung die Speicher eingesetzt, damit das in den Nachtstunden gesammelte kalte Speicherwasser bei Bedarf auch tagsüber an die Halle abgegeben werden kann. Bei der sechsten Variante wird zusätzlich das Dach künstlich bereg-

net. Die siebte Variante vereint zum Schluss alle Szenarien zur passiven und aktiven Kühlung.

Tabelle 1: Berechnete Varianten zur Raumkühlung

Szenarien		Varianten						
		1	2	3	4	5	6	7
Referenz ohne Kühlung, Fenster zu	R	X						
Passive Lüftung mit Regelung	L			X				X
KAROMA außen nach innen	K		X		X	X	X	X
Speicher	S					X	X	X
Berieselung	B				X		X	X

In der Abbildung 17 sind Simulationsergebnisse der Varianten zur Kühlung dargestellt, wobei das Referenzmodell (1_R) bei geschlossenen Fenster und Hallentor in Rot und die Außentemperatur (AT) in Schwarz dargestellt ist.

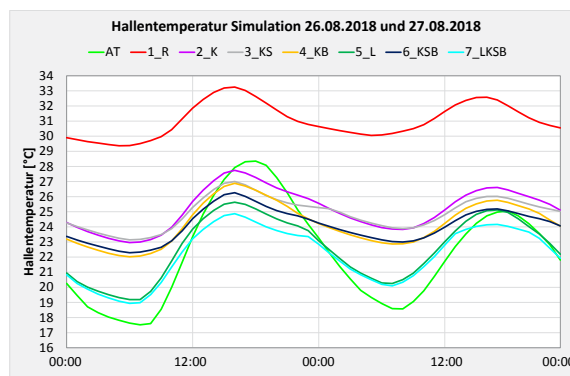


Abbildung 17: Darstellung der Hallentemperatur für die verschiedenen Varianten

Mit den außenliegenden Elementen kann die Halle mit den innenliegenden Kapillarrohrmatten und entsprechender Regelung gekühlt werden (2_K). Die Berieselung (2_K zu 4_KB) und die Speicher (5_KS zu 6_KSB) senken die Hallentemperatur jeweils max. um 1 Kelvin. Die besten Ergebnisse lassen sich durch die Kombination der passiven Lüftung, durch das Öffnen der Fenster und des Hallentores, mit den berechneten Kapillarrohrmatten in Verbindung mit dem Speicher (7_LKSB) erreichen. In Abbildung 18 sind die simulierten Hallentemperaturen der aktivierten Bauteile mit Berieselung (4_KB) und mit Speicher (6_KSB) zum Vergleich mit einer Kühlmaschine und Außentemperatur sowie die nach DIN 4108-2 im Zusammenhang mit dem sommerlichen Wärmeschutz für die Region zulässige Innentemperatur (27 °C) dargestellt. Die Übertemperaturgradstunden (Kh/a) unterschreiten den Anforderungswert.

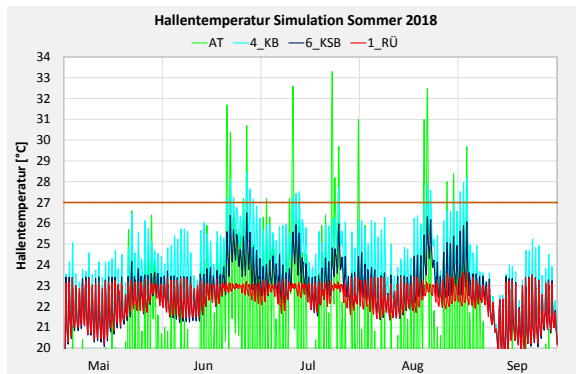


Abbildung 18: Simulation Kühlung über die Sommerperiode

In Abbildung 19 ist der Energy Efficiency Ratio der Szenarien 4_KB und 6_KSB über die Sommerperiode Mai bis September der Simulationen aufgetragen. Bei dem Verhältnis zwischen der abgegebenen Kälteleistung der Innenbauteile in der Maschinenfabrik und der Leistungsaufnahme der Pumpen errechnete sich ein max. EER von 16.

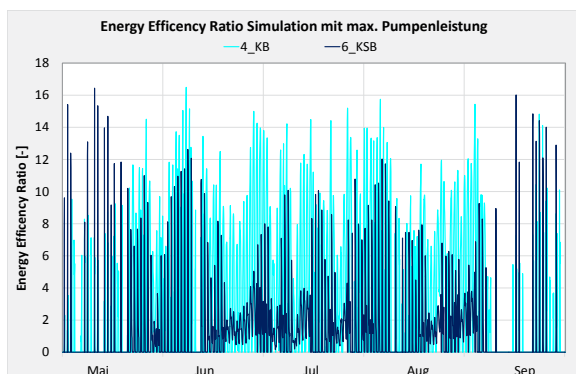


Abbildung 19 Simulation EER über die Sommerperiode

Der niedrige EER lässt sich durch die hohe Anzahl der verbauten Pumpen (Abbildung 20) in der Fabrik zurückführen. Szenario 4_KB grüne Pumpen und Szenario 6_KSB zusätzlich die gelben Pumpen.

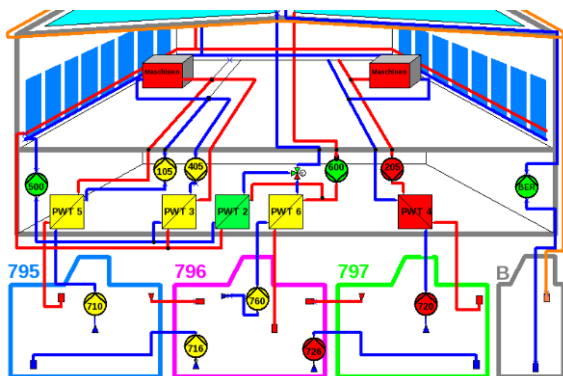


Abbildung 20: Vereinfachte Darstellung der Interaktion

Des Weiteren wurde die Nennleistung der Pumpen angesetzt, gemäß Abbildung 20 für Szenario 2_KB die Berieselungspumpe, Pumpe 500 und 600 mit insgesamt 1,75 kW. Für Szenario 6 zusätzlich die Pumpen 105, 405, 710, 716 und 760 mit insgesamt 4,98 kW.

Mit der Kombination der innen- und außenliegenden Kapillarrohrmatten, der Speicher und der Berieselung liegt die Jahresgesamtkühlleistung mit der thermischen Gebäudesimulation bei etwa 25.000 kWh/a und einer max. Raumtemperatur von 26,5 °C sowie bei einem 3-Schichtbetrieb und Maschinenkühlung an Arbeitstagen bei etwa 56.000 kWh/a und einer max. Raumtemperatur von 28,7 °C.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde die Interaktion zwischen thermisch aktivierter Gebäudehülle, Speicher und Produktion dargestellt. Ein geeignetes Monitoring des Gebäudes ist für eine valide thermische Gebäudesimulation unerlässlich. Erste Aussagen konnten zur Kühlleistung mit hohen Leistungszahlen (Energy Efficiency Ratio) gemacht werden. Des Weiteren wurden erste Ergebnisse der thermischen Gebäudesimulation zur passiven und aktiven Kühlung mit Umweltenergien gezeigt.

Ausblick

Weitere Untersuchungen zur Kühlung in der Maschinenfabrik erfolgen. Mit den ausgewerteten Messdaten werden Simulationsmodelle validiert und Regelungsmodelle erweitert und optimiert.

Danksagung

Gefördert wurde das Forschungsprojekt durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

LITERATUR

Blatt, C. 2017. Energieeffiziente Kühlung mit Umweltenergien in der ETA-Fabrik. In: Hofmann, J. (Hrsg.): Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht. Stuttgart: IWB, 2017, S. 21-32.

Trogisch A., Franzke U. 2016. Feuchte Luft - h,x-Diagramm. Praktische Anwendungs- und Arbeitshilfen. VDE Verlag GmbH, Berlin, Offenbach.

MONITORING EINES INNOVATIV SANIERTEN ZEILENHOCHHAUSES – ERFAHRUNGEN AUS DEM ERSTEN BETRIEBSJAHR

S. Dietz¹, F. Werder¹ und F. Sick¹

¹ Studiengang Regenerative Energien, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Berlin, Germany
Wilhelminenhofstr. 75 A, 12459 Berlin
Internet: www.htw-berlin.de
E-Mail: Sebastian.Dietz@htw-berlin.de

KURZFASSUNG

Das „Zukunftshaus“ in Berlin stellt ein Modellprojekt für zukünftige Sanierungen des Gebäudebestands der degewo AG dar. Um das innovative Energiekonzept quantitativ zu untersuchen, führt die Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin für zwei Jahre ein technisches Monitoring durch.

Nach Vorstellung des Energiekonzepts sowie der Ziel- und Bedarfswerte werden die Erfahrungen aus dem ersten Betriebsjahr mit Fokus auf die thermische Anlagentechnik, die elektrische Energiebilanz und den Batteriespeicher präsentiert.

Durch die kontinuierliche Auswertung der Messdaten konnten frühzeitig Fehler im Gebäudebetrieb behoben und Optimierungsmaßnahmen erarbeitet werden. Insbesondere die Effizienz des thermischen Gesamtsystems, bestehend aus einer PVT-Anlage, einem Niedertemperatur-Erdreichspeicher und Wärmepumpen, konnte signifikant verbessert werden, wodurch die Wichtigkeit eines technischen Monitorings unterstrichen wird.

The "Zukunftshaus" in Berlin is a pilot project for future refurbishments of degewo AG's building stock. In order to quantitatively examine the innovative energy concept, the Berlin University of Applied Sciences is conducting a technical monitoring for two years.

After presenting the energy concept and the target and demand values, the first monitoring results of the thermal system as well as the electrical energy balance and the battery storage will be discussed.

Continuous analysis of measured data made it possible to correct errors in building operation at an early stage and to develop optimisation measures. In particular, the efficiency of the thermal system, consisting of a PVT system, a low-temperature underground storage tank and heat pumps, was significantly improved. This emphasizes the importance of building monitoring.

EINLEITUNG

Zum Erreichen der Energiewende muss der Gebäudebestand mit einem höchstmöglichen Grad an energetischer Nachhaltigkeit saniert werden. Insbesondere die Wohnungswirtschaft steht in der Verantwortung technische Optionen aufzuzeigen, zu erproben und Erfahrungen für zukünftige Sanierungen ihres großen Gebäudebestandes zu sammeln.

Mit dem „Zukunftshaus“ (ZKH) hat Berlins größte landeseigene Wohnungsbaugesellschaft, die degewo AG, ein Modellprojekt realisiert, in dem verschiedene innovative Technologien in einem bestehenden Mehrfamilienhaus (64 WE) kombiniert werden, die eine Übertragbarkeit auf andere Objekte zulassen. Die Technikkomponenten haben zum Ziel, Strom und Wärme lokal zu erzeugen und die Energieeffizienz zu maximieren.

Für die Zielerreichung und insbesondere deren quantitativen Nachweis und ihre Dokumentation führt die Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, ein zweijähriges technisches Intensivmonitoring durch.

ENERGIEKONZEPT

Bei dem Objekt handelt es sich um ein im Jahr 1954 erbautes Mehrfamilienhaus im Berliner Stadtteil Lankwitz, mit 64 Wohnungen auf acht Stockwerken und einer Wohnfläche von insgesamt 3.727 m² (WoFIV, nach Sanierung). Die Leitidee des (Kern-)Sanierungskonzeptes zeichnet sich durch eine maximale Energieeffizienz der Gebäudehülle und Anlagentechnik, u.a. durch ein konsequentes Niedertemperaturkonzept, sowie eine lokale Erzeugung, Nutzung und Speicherung von Strom und Wärme aus. Die Grundlage des Konzeptes ist ein sehr guter Wärmeschutz der Gebäudehülle, u.a. durch das Aufbringen eines neuen WDVS (12 cm) auf die vorhandene Bestandsdämmung (8 cm) (Nach Sanierung: U-Wert Außenwände 0,17 W/(m²K), Dach 0,11 W/(m²K)) und ein dezentrales mechanisches Lüftungssystem mit einem Wärmerückgewinnungsgrad (WRG) von 80%.



Abbildung 1: Südöstliche Fassadenansicht des degewo ZKH.

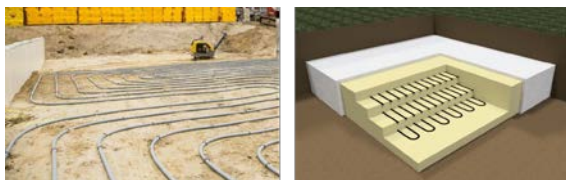


Abbildung 2: Niedertemperatur Erdreichspeicher des degewo ZKH während der Bauphase (links) und als Schnittdarstellung (rechts).

Die Wärmeversorgung basiert auf einem saisonalen Niedertemperatur(NT)-Erdreichspeicher und einem intelligenten Wärmemanagement für die zielgerichtete Be- und Entladung des Speichers bzw. Direktnutzung anfallender Wärme nach dem Prinzip „Verbrauch vor Speicherung“. Der NT-Erdreichspeicher mit einem Nettovolumen von ca. 850 m³ ist flach neben dem Ge-

bäude angeordnet (1,2 m tief) sowie seitlich und nach oben hin gedämmt. Er bildet die Wärmequelle für die Wärmepumpen zur Bereitstellung von Heizwärme und Trinkwarmwasser (Abbildung 2).

Die hochgedämmte Gebäudehülle sowie die Wohnraumlüftung machen den Einsatz einer Deckenflächenheizung möglich. Nützlicher Nebeneffekt ist die Option einer sommerlichen Komfortsteigerung durch eine quasi kostenlose Kühlung über das System bei gleichzeitiger Beladung des NT-Speichers (Sick, 2016).

Auf dem Dach sind photovoltaisch-thermische Hybridmodule (PVT) installiert (121 St., 31,5 kW_{pe}, 87 kW_{pth}), die Sonnenenergie in Strom und Wärme umwandeln. Das Hybrid-System hat den Vorteil, dass es auf der verfügbaren Fläche zwei Technologien miteinander kombiniert, die aktuell vorwiegend getrennt voneinander zum Einsatz kommen. Zusätzlich sind Photovoltaik-Module (PV) an der nach Südosten weisenden Giebelfassade (19,8 kWp) und auf einem Teil des Daches installiert (48,6 kWp). Überschüssiger Strom wird in einem Redox-Flow-Batteriespeicher mit einer Energiekapazität von 70 kWh gespeichert und über ein Mieterstrommodell an die Bewohner vermarktet. Die Sanierungsmaßnahmen wurden im Juni 2017 abgeschlossen.

ZIEL- UND BEDARFSWERTE

In der Konzeptionsphase wurde der Entscheidungsprozess durch eine stündlich aufgelöste Bilanzierung der elektrischen und thermischen Energieströme unterstützt (Excel). Neben den Wetterdaten des Testreferenzjahres werden für hierfür mit TRNSYS und PV SOL simulierte Last- und Erzeuger Profile verwendet. Die Komponenten der Anlagentechnik (PVT, Erdreichspeicher, Batteriespeicher, etc.) werden mit einfachen Modellansätzen berücksichtigt sowie für den Nutzereinfluss ein täglicher Warmwasserbedarf von 50 l/Tag und einen elektrischen Energiebedarf von 3300 kWh/Jahr je Wohneinheit angesetzt.

Die Ergebnisse des final festgelegten Energiekonzeptes stellen die energetischen Zielwerte für die gemessenen Energieströme aus dem Gebäudebetrieb dar. Tabelle 1 zeigt die Energiebedarfskennwerte für die Kategorien Heizung, Warmwasser, Haustechnik und Mieter-

strom. Als Bezugsgröße dient die, im Vergleich zur tatsächlichen Wohnfläche größere, Netto-raumfläche nach DIN 277 ($NRF = 4392 \text{ m}^2$). Aufgrund der hohen Gesamteffizienz wird der summierte Endenergiebedarf des Gebäudes von $60,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ maßgeblich durch den elektrischen Energieverbrauch der Mieter beeinflusst ($48,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$).

Tabelle 1: Bedarfs- und Zielwerte des degewo ZKH.

	Q_H kWh/m ² ·a	Q_{WW} kWh/m ² ·a	$Q_{Technik}$ kWh/m ² ·a	Q_{Mieter} kWh/m ² ·a
Q_{Nutz}	13,6	13,2	7,2	48,1
Q_{End}	1,9	3,7	7,2	48,1
	60,9 (41,2)*			
Q_{Prim}	109,7 (72,4)*			

Energiebezugsfläche $NRF = 4392 \text{ m}^2$, Q_H : Heizenergiebedarf, Q_{WW} : Energiebedarf für Warmwasser, $Q_{Technik}$: Elektrischer Energiebedarf Haustechnik, Q_{Mieter} : Elektrischer Energiebedarf der Mieter, Q_{Nutz} : Nutzenergie, Q_{End} : Nutzenergie, Q_{Prim} : Primärenergiebedarf (Faktoren nach EnEV 2016), *: abzüglich PV-Eigenverbrauch und Gut-schrift Netzeinspeisung

Der gesamte elektrische Ertrag des PV/PVT-Systems wird auf $19,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ prognostiziert und hat das Ziel in der Jahresbilanz 32% des gesamten Endenergiebedarfs, jedoch 100% des Endenergiebedarfs für die technische Gebäude-ausrüstung (Heizung, Warmwasser, Lüftung, Allgemeinstrom) zu decken. In Kombination mit dem Batteriespeicher soll dabei ein Autarkiegrad von 29% und ein Eigenverbrauchsanteil für den PV-Strom von 90% erreicht werden.

Im Prozess der Entwurfs- und Ausführungsplanung konnten nicht alle Anforderungen aus dem konzeptionellen Entwurf vollständig umgesetzt werden, sodass bereits für den baulich realisierten Zustand eine veränderte Energiebilanz vorliegt. Hierzu zählen:

- Die Größe der gesamten installierten elektrischen PV/PVT Leistung wurde aufgrund der rechtlichen Rahmenbedingungen des EEG auf maximal 100 kWp begrenzt. Dadurch reduziert sich der prognostizierte Ertrag um ca. 2% auf $19,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$.
- Zum Zeitpunkt der Ausführungsplanung lag für die ursprünglich geplante Aufdopplung der Dämmung um 20 cm (WLG 35) keine bautechnische Zulassung vor. Die ausgeführ-

rte aufgedoppelte Dämmstärke von 12 cm (WLG 32) führt zu einem ca. 10% höheren Heizenergiebedarf von $14,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$.

- Gegenüber den Annahmen in der Energiebilanzierung während der Konzeptionsphase ist das Nettovolumen des gebauten Erdspeichers (Volumen innerhalb der Dämmung) ca. 20% geringer.
- Die Nennkapazität des gelieferten Batteriespeichers ist mit 70 kWh gegenüber der in der Bilanzierung angesetzten Speichergröße um 30 kWh kleiner. Dadurch reduziert sich der prognostizierte Autarkiegrad auf ca. 25% und der Eigenverbrauchsanteil für die PV/PVT Anlage auf 79%.

ERSTE MONITORINGERGEBNISSE

PVT-Anlage

Die Erträge des solarthermischen Systems liegen im ersten Betriebsjahr deutlich unterhalb der prognostizierten Werte aus der im Rahmen der Konzeptionsphase durchgeführten Energiebilanzierung (vgl. Abbildung 3). Mit einer im Zeitraum von April bis Dezember 2017 gemessenen Wärmemenge von 28.901 kWh_{th} liegt der Ertrag ca. 40% unter der Prognose (42.309 kWh_{th}).

Die erzielten thermischen Leistungen vom 18.07.2017 bis 27.04.2018 zeigt Abbildung 4. Im Sommer 2017 wurden maximale Leistungen von bis zu 30 kW_{th} erreicht. Aufgrund der hohen Abweichungen im Vergleich zur Nennleistung im Auslegungsfall wurde die Anlage vor Ort untersucht und eine falsche Verrohrung der Kollektorverbände festgestellt. Die Folge war ein hydraulischer Kurzschluss und damit verbunden eine nur teilweise durchströmte Kollektorfläche. Der Fehler wurde Mitte Dezember 2017 korrigiert (Abbildung 4 (A)), infolgedessen die maximal erreichte thermische Leistung mit ca. 55 kW_{th} im Frühjahr 2017 deutlich gesteigert werden konnte.

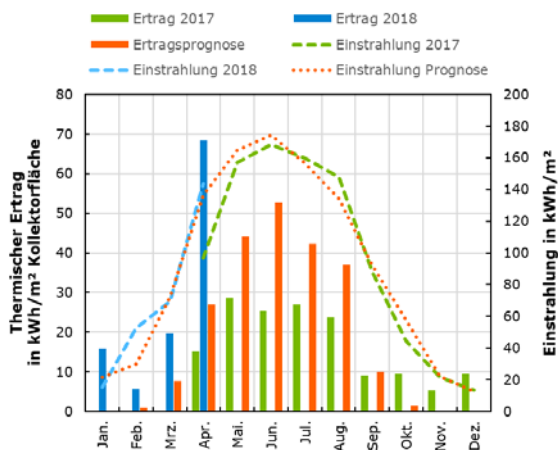


Abbildung 3: Prognostizierte und gemessene thermische Erträge der PVT-Anlage (Säulen) sowie die solare Einstrahlung (Linien) auf Basis von Monatswerten.

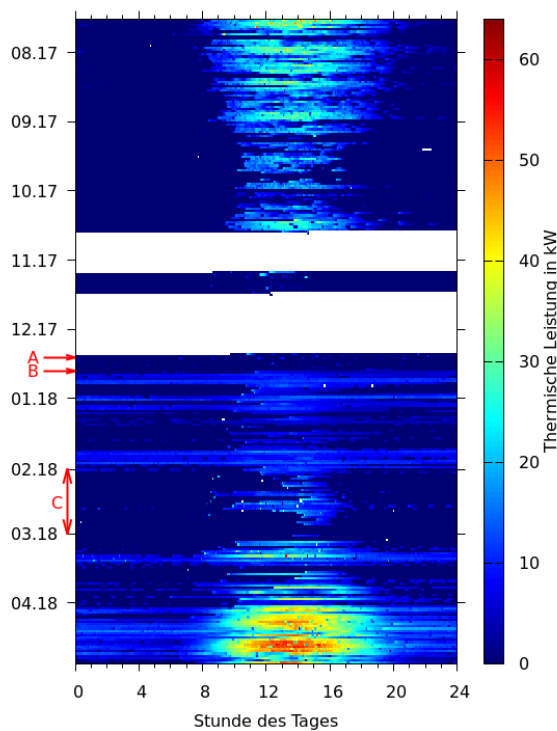


Abbildung 4: Carpetplot für die thermische Leistung der PVT-Anlage vom 18.07.2017 bis 27.04.2018. Weiße Bereiche markieren Datenausfälle. Ereignisse: A) Kollektorverrohrung korrigiert. B) Einschaltbedingung der Pumpe geändert. C) Aktiver Frostschutz vormittags.

Einen wesentlichen Einfluss auf den Ertrag der PVT-Anlage haben die Betriebszeiten der Solar-kreispumpe und damit verbunden die implementierte Regelstrategie. Die Standard-Regelung der zentralen Wärmeversorgung schaltet die Solar-kreispumpe in Abhängigkeit eines fest einstellbaren Schwellwertes für die Kollektortemperatur ein. Dabei wird jedoch nicht berücksichtigt, dass die Temperatur im Erdreichspeicher großen saisonalen Schwankungen unterliegt. Ohne eine

kontinuierliche Schwellwertanpassung wird daher eine Regeneration oder eine direkte primärseitige Versorgung der Wärmepumpen in Zeiten geringer solarer Einstrahlung oder in den Nachtstunden verhindert. Insbesondere während der Heizperiode und bei niedrigen Temperaturen im Erdreichspeicher können die PVT-Module verstärkt die Außenluft als Wärmequelle nutzen. Eine manuelle Schwellwertanpassung erfolgte am 19.12.2017 (Abbildung 4 (B)). Im darauffolgenden Zeitraum können signifikant längere Betriebszeiten (z.T. 24 Stunden/Tag) und damit deutlich höhere Erträge beobachtet werden (vgl. Abbildung 3). Zudem verhindert die implementierte Frostschutzfunktion zeitweise den Betrieb der Anlage, obwohl die solaren Einstrahlungsverhältnisse einen Betrieb zulassen würden. Im Februar 2018 (Abbildung 4 (C)) ist diese Betriebssituation häufig zu beobachten: Trotz hoher solarer Einstrahlungen und Kollektortemperaturen deutlich über 0°C schaltet die Kollektorkreis-pumpe erst am Nachmittag ein, wenn das Tagesmaximum für die solare Einstrahlung bereits überschritten ist. Anhand der Monitoringdaten konnte eine verbesserte Regelstrategie erarbeitet werden, welche u. a. die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle (Kollektortemperatur) und /-senke (Wärmepumpen und Erdreichspeicher) berücksichtigt. Derzeit (Mai 2018) wird der Vorschlag durch den Hersteller der zentralen Wärmeversorgung programmieretechnisch umgesetzt.

Durch die bisherigen Maßnahmen konnte der Betrieb der PVT-Anlage signifikant verbessert werden. Im Kalenderjahr 2018 liegt der gemessenen Ertrag deutlich über der Prognose (vgl. Abbildung 3, April 2018). Bei der Interpretation ist jedoch zu beachten, dass im Betrachtungszeitraum bessere Randbedingungen für den Betrieb der PVT-Anlage vorliegen als im Vergleich zur Prognose. Insbesondere niedrige Temperaturen im Erdreichspeicher wirken sich positiv auf die thermischen Erträge aus.

Unabgedeckte PVT-Kollektoren, so wie sie im degewo ZKH zum Einsatz kommen, sind auf Stromerzeugung optimiert, wodurch die thermische Anwendung auf niedrige Fluidtemperaturen beschränkt ist. Dies zeigt sich auch im Betrieb der Anlage. Aufgrund der niedrigen Vorlauf-temperaturen wird nahezu der gesamte thermische Ertrag zur Beladung des Erdreichspeichers oder primärseitigen Versorgung der Wärmepumpen verwendet. Eine direkte Nutzung zur Warmwas-

serbereitung (<1%) oder Heizungsunterstützung (0%) findet bisher nicht statt.

Erdreichspeicher

Die im Vergleich zur Prognose niedrigeren solarthermischen Erträge wirken sich auch auf die Temperaturentwicklung im Erdreichspeicher aus. In Abbildung 5 sind die Temperaturverläufe im und neben dem Erdreichspeicher, die Rücklaufemperatur vom Speicher sowie der kumulierte Energieein- und -austrag über den bisherigen Messzeitraum dargestellt. Es wird deutlich, dass im Sommer 2017 keine nennenswerten Energiemengen in den Speicher eingebracht wurden und aufgrund der kontinuierlichen Last des Warmwassersystems bereits im September eine bilanzielle Entladung erfolgte. Das angestrebte Temperaturmaximum von 23-24°C wird mit einer maximalen mittleren Temperatur innerhalb des Erdreichspeichers von 18,4°C deutlich unterschritten. Mit Beginn der Heizperiode und insbesondere mit steigender Heizlast Ende Oktober fallen die Speichertemperaturen rapide und erreichen bereits Mitte November ein Temperaturniveau unterhalb von 2°C. Anschließend sinken die Temperaturen trotz stetigem Energiebezug nur noch langsam, da die im Phasenübergang enthaltene, latente Wärme genutzt wird. Bilanziell wird dem Speicher im Zeitraum Juli 2017 bis März 2018 eine Energiemenge von ca. 60 MWh entnommen. Dies entspricht der prognostizierten Speicherbilanz über den gleichen Zeitraum, allerdings zeigt der gemessene Temperaturverlauf eine wesentlich dynamischere Charakteristik, sodass das erwartete Temperaturminimum von 5-8°C deutlich unterschritten wird. Seit Anfang April 2018 wird der Speicher in der Tagesbilanz beladen und die mittlere Speichertemperatur steigt deutlich an. Diese Entwicklung zeigt, dass durch die Veränderungen im PVT-System zukünftig eine intensivere Beladung des Erdreichspeichers über die Sommermonate zu erwarten ist.

Wärmeversorgung und Verbrauch

Aufgrund der niedrigen Temperaturen im Erdreichspeicher wurde am 28.11.2017 die konzeptionell nicht vorgesehene, aber aus dem Bestand vorhandene Nahwärme zugeschaltet. Die monatlichen Anteile der Wärmeerzeuger am gesamten Wärmeverbrauch für Warmwasser und Heizung sind in Abbildung 6 dargestellt. Mit zugeschalteter Nahwärme reduzieren sich zu-

nächst die Betriebszeiten der Heizungswärmepumpe. Im Januar 2018 wurden die Reglereinstellungen dahingehend geändert, dass vorrangig die Warmwasser-Wärmepumpe abgeschaltet wird. Aufgrund des niedrigeren Temperaturniveaus des Heizungssystems und der dadurch höheren Arbeitszahl der Heizungswärmepumpe wird durch diese Maßnahme die Gesamteffizienz der Wärmeversorgung verbessert. Die niedrigen Quelltemperaturen im Erdreichspeicher haben zur Folge, dass die Wärmepumpen im Betrieb (Juni 2017 bis April 2018) nur mäßigen Arbeitszahlen von 2,8 im Warmwassersystem und 3,8 im Heizungssystem erreichen.

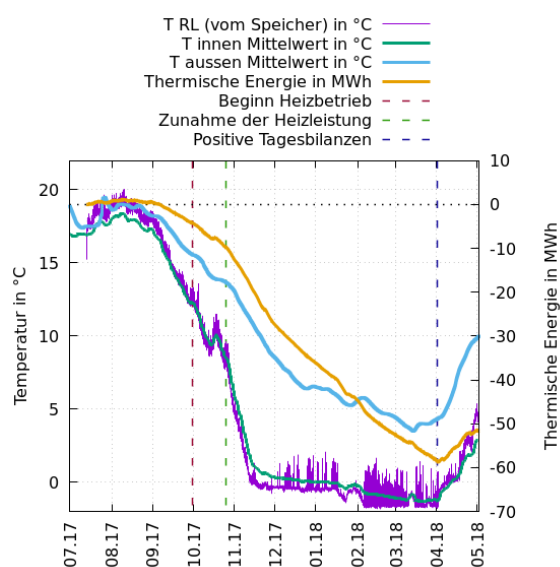


Abbildung 5: Mittlere Temperaturverläufe im Erdreichspeicher (grün) und neben dem Speicher (blau) (1 m Abstand) sowie die Rücklaufemperatur im Querkreislauf (violett) von Juli 2017 bis April 2018. Gelb: Verlauf der Bilanz von Be- und Entladung (kumulierte Energiemengen, 0 MWh = Ausgangszustand)

Mit zunehmender Nutzung des Gebäudes stellt sich ab Oktober 2017 ein monatlicher Energieverbrauch von ca. 10.000 kWh ... 12.000 kWh für die Bereitstellung von Warmwasser ein. Obwohl in der Prognose ähnliche Zapfmengen (3200 l/Tag \approx 32 l/Tag/Person) in die Bilanzierung eingehen, liegen die Bedarfswerte mit ca. 5000 kWh/Monat deutlich darunter. Der Grund sind eine unzureichende Berücksichtigung der Zirkulations- und Systemverluste. Im degewo ZKH erfolgt die Verteilung im Gebäude über insgesamt 16 Stränge für 8 Wohnungen je Etage. Die Badezimmer und die Küchen werden durch separate Stränge versorgt, wodurch sich in der Summe lange Zirkulationswege ergeben.

Der gemessene Anteil der Zirkulationsverluste liegt bei ca. 40% der ins Warmwassersystem zugeführten Wärmemenge.

Auch für das Heizsystem des Gebäudes ist im Vergleich zur Prognose ein erhöhter Verbrauch zu erkennen. Kurz vor Ende der Heizperiode liegt der spezifische Heizenergieverbrauch ohne Klimabereinigung bei ca. 22 kWh/(m²*a) und damit 7 kWh/(m²*a) über dem anvisierten Planungsziel.

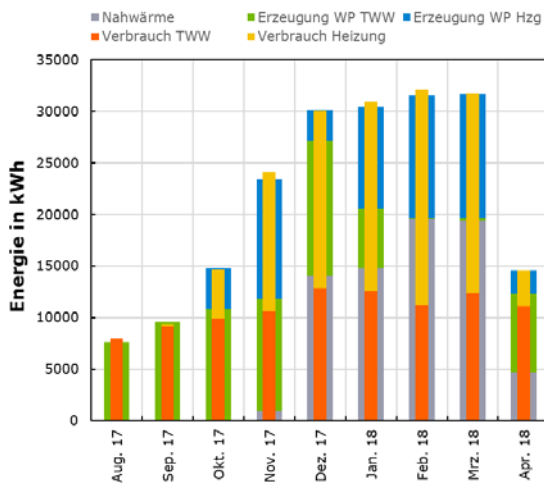


Abbildung 6: Anteil der Wärmeerzeuger am Wärmeverbrauch für Warmwasser und Heizung auf Basis von Monatswerten.

Elektrische Energiebilanz

Aus der Bedarfsberechnung wird deutlich, dass der elektrische Energiebedarf der Bewohner den Gesamtbedarf des Gebäudes dominiert. Dies wird durch die in Abbildung 7 dargestellte gemessene elektrische Energiebilanz der Hauptverteilung bestätigt. Mit einem Anteil von ca. 55% im Darstellungszeitraum ist der Nutzerstrom die größte Verbrauchergruppe. Es zeigt sich jedoch auch, dass der Anteil gegenüber der Prognose (ca. 80%) geringer ausfällt und anhand der aktuellen Verbrauchsdaten ein deutlich kleinerer Jahresstromverbrauch von ca. 1500-1700 kWh je Wohneinheit zu erwarten ist. Der Allgemeinstrom (Hauslicht, Aufzüge, etc.) beträgt gleichbleibend ca. 720 kWh/Monat (5%), wohingegen der Energieverbrauch für die Technikkomponenten (Wärmepumpen, Steuerung, Pumpen, etc.) systembedingt jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt und im Messzeitraum ca. 40% des elektrischen Energiebedarfs verantworten. In den einstrahlungsstarken Sommermonaten wird der Verbrauch zu einem gro-

ßen Teil (60% im Juli 2017) durch das PV-Batteriesystem gedeckt, der Anteil sinkt in den Wintermonaten im Dezember 2017 auf ein Minimum von 6%. Über den gesamten Zeitraum wird ein Autarkiegrad von 25% erreicht. Da der Messzeitraum kein gesamtes Jahr abdeckt und in den Sommermonaten eine höhere Lastdeckung möglich ist, ist das Ziel ca. 30% des gesamten elektrischen Energiebedarfs zu decken als realistisch einzuordnen. Der Eigenverbrauchsanteil des PV-Stroms liegt derzeit bei 64% und damit deutlich unter den anvisierten 90%.

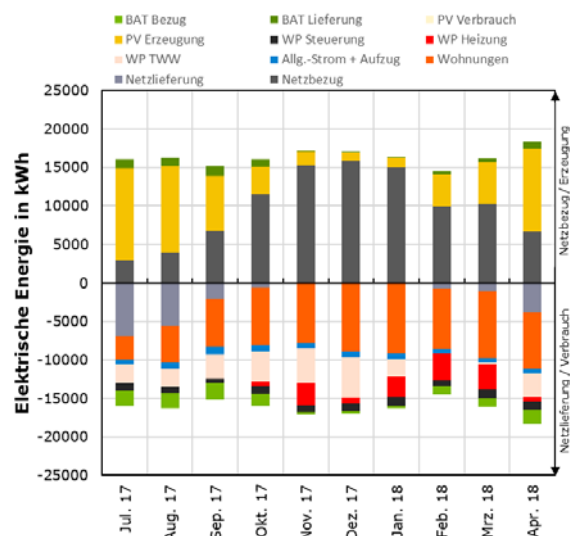


Abbildung 7: Monatliche elektrische Energiebilanz der Hauptverteilung des degewo ZKH von Juli 2017 bis März 2018.

Batteriespeicher

Der Redox-Flow-Batteriespeicher ist zur Erhöhung des Eigenverbrauchs für die durch die Photovoltaikanlage erzeugten Energiemengen installiert. Primär soll der Energieverbrauch der Anlagentechnik gedeckt werden. Im Tagesverlauf überschüssig produzierte Energie wird zwischengespeichert und nach Sonnenuntergang entnommen. Abbildung 8 verdeutlicht den grundlegenden Aufbau und eine besondere Eigenschaft von Redox-Flow-Batterien: Die Trennung von Leistungs- und Kapazitätsskalierung.

Der Speicher hat eine elektrische Leistung von bis zu 15 kW bei einer Energiekapazität von 70 kWh. Bezüglich der Energieeffizienz sind im Herstellerdatenblatt ambivalente Angaben zu finden. Zum einen wird eine AC-seitige Energieeffizienz „von bis zu 70%“ aufgeführt, zum anderen werden konkrete AC-seitige ein- und auszu-

ladende Energiemengen angegeben: 56 kWh nutzbare elektrische Energie bei einer Beladung mit 88 kWh, wodurch sich ein energetischer Wirkungsgrad von 63,6% ergibt. Die Selbstentladung im Systembereitschaftsmodus beläuft sich auf 0,13 kW.

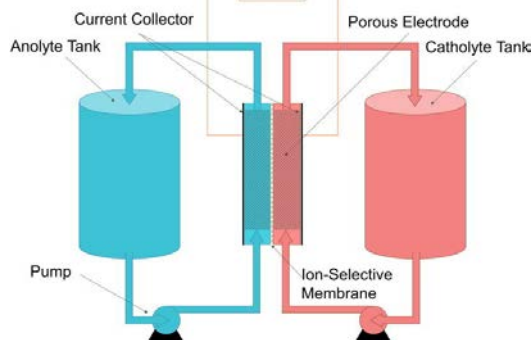


Abbildung 8: Aufbau und Funktion der Redox-Flow-Batterie.
Quelle: https://en.wikipedia.org/wiki/Flow_battery

Zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme wurde ein festes Zeitprofil für die Be- und Entladeleistung im Batteriespeicher hinterlegt. Mitte Oktober wurde dieses Zeitprofil durch eine eigenverbrauchsoptimierte Betriebsweise abgelöst.

In Abbildung 9 sind die ein- und ausgeladenen Energiemengen dargestellt. Über den gesamten Messzeitraum hat der Batteriespeicher einen energetischen AC-Wirkungsgrad von unter 50% und zeigt damit im alltäglichen Betrieb eine Abweichung zur unteren Datenblattangabe von fast 15%. Zudem zeigt sich im Betrieb ein deutlich höherer Bereitschaftsverbrauch von mindestens 0,25 kW im Tagesmittel, wodurch insbesondere in den Wintermonaten die notwendige Halteladung aus dem Netz bezogen wird.

Der Tagesverlauf der Batterie-, Hausanschluss- und Photovoltaikleistung ist in Abbildung 10 visualisiert. Dieser exemplarische Tag verdeutlicht die Regelung der Batterie: überschüssige Energie der Photovoltaikanlage wird zwischengespeichert und die Leistung am Hausanschluss möglichst klein gehalten. Dabei unterscheidet die Regelung nicht, ob der Batteriestrom vorrangig für die TGA Komponenten oder innerhalb der Wohnungen verwendet wird. Aufgrund der hohen gesamten Gebäudelast entlädt sich der Speicher trotz vollständiger Beladung in nur zwei bis vier Stunden nach Sonnenuntergang. In den folgenden Nachtstunden bezieht der Speicher die notwendige Halteladung taktend aus dem Netz.

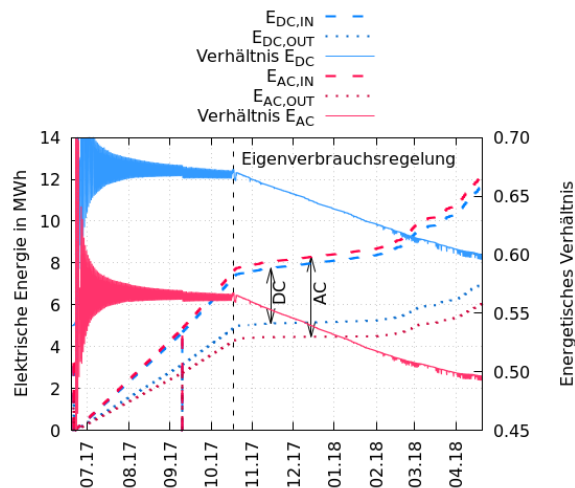


Abbildung 9: Energetische Betrachtung des Batteriespeichers über den gesamten Messzeitraum.

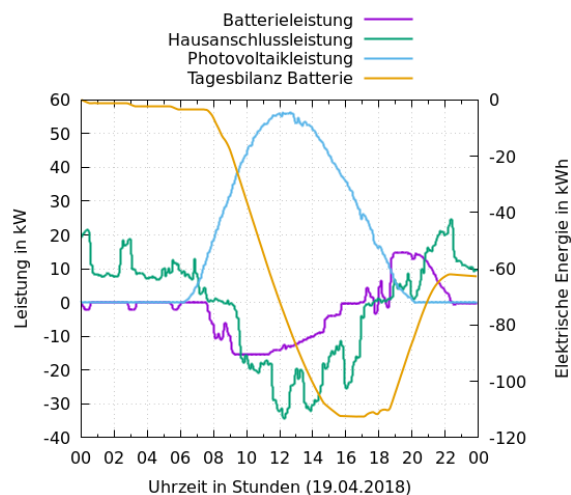


Abbildung 10: Tagesverlauf der Batterie-, Photovoltaik- und Hausanschlussleistung am 19. April 2018.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mit dem Zukunftshaus hat die degewo AG ein Modellprojekt mit ambitionierten energetischen Zielen für die Sanierung des Gebäudebestandes im Geschosswohnungsbau realisiert. Durch ein konsequentes Niedertemperatur-Konzept und einer möglichst lokalen Erzeugung und Nutzung von Strom und Wärme, soll in der Netto-Jahresbilanz ein Endenergiebedarf von $41 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$ erzielt werden. Innovative Komponenten des Energiekonzeptes, mit bisher wenig Betriebserfahrungen in der Praxis, sind eine PVT-Anlage, ein Niedertemperatur-Erdreichspeicher und ein Redox-Flow-Batteriespeicher.

Bereits für den baulich umgesetzten Istzustand liegt im Vergleich mit der Bedarfsberechnung aus der Konzeptionsphase eine veränderte

Energiebilanz vor. U. a. fehlt für die ursprünglich geplante Aufdopplung des bestehenden WDVS um 20 cm eine bauliche Zulassung. Mit den realisierten 12 cm steigt der Heizenergiebedarf um etwa 10%. Um aussagekräftige Ziel- und Vergleichswerte für den Betrieb zu erhalten sowie den Entscheidungsprozess zu unterstützen ist eine kontinuierliche Nachführung im Prozess der Entwurfs- und Ausführungsplanung notwendig.

Nach Inbetriebnahme des Gebäudes im Juni 2017 konnte durch das begleitende technische Monitoring ein im Vergleich zur Prognose um 40% geringerer solarthermischer Ertrag festgestellt werden. Eine fehlerhafte Verrohrung der Kollektorverbände führte zu einer nur teilweisen Durchströmung der gesamten Kollektorfläche. Zudem konnten anhand der Monitoringdaten Parameter in der bestehenden Regelung angepasst und eine verbesserte Regelstrategie, welche die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und /-senke berücksichtigt, entwickelt werden. Die durchgeführten Maßnahmen führen zu einer deutlichen Ertrags- und Leistungssteigerung der PVT-Anlage, jedoch haben die bisher niedrigen Erträge signifikante Auswirkungen auf die Temperaturentwicklung im Erdreichspeicher. Das angestrebte Temperaturmaximum von 23-24°C wird nicht erreicht und mit Beginn der Heizperiode sinkt die Temperatur rasant auf unter 0°C. In der Folge wurde die konzeptionell nicht vorgesehene, aber aus dem Bestand vorhandene Nahwärme zugeschaltet. Zudem erreichen die Wärmepumpen nur niedrige Arbeitszahlen.

Die Erfahrungen aus der ersten Heizperiode lassen erkennen, dass eine vollständige Beladung und ausreichende Dimensionierung des NT-Erdreichspeichers für den effizienten Betrieb des realisierten Wärmeversorgungssystems essentiell ist. Im weiteren Projektverlauf müssen weitere sukzessive Verbesserungen im Betrieb des PVT-Systems umgesetzt, die Erträge gesteigert und das Systemverhalten weiter beobachtet werden.

In der elektrischen Energiebilanz wird durch das PV-Batteriesystem im Zeitraum Juli 2017 bis April 2018 ein Autarkiegrad von 25% erzielt. Der eingesetzte Redox-Flow-Batteriespeicher erreicht jedoch nicht die vom Hersteller angegebene Gesamteffizienz und nutzbare Speicherkapazität. Zudem ist die installierte PV-Leistung im

Vergleich zur Gebäudelast sehr gering, sodass in den Wintermonaten keine Überschüsse für die Speicherbeladung erzielt werden. Die notwendige Halteladung für den Bereitschaftsbetrieb wird häufig aus dem Netz bezogen.

Die Analyse der Daten und das Aufdecken (und Beheben) von Fehlern in den ersten Betriebsmonaten demonstriert deutlich die Notwendigkeit von Monitoring-Maßnahmen, insbesondere bei komplexeren Anlagen und innovativen Versorgungskonzepten, die noch nicht in großer Breite erprobt und in der Praxis umgesetzt worden sind.

LITERATUR

- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.) 2015. Bekanntmachung für Energieverbrauchswerte im Wohngebäudebestand, Deutschland.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.) 2014. Leitfaden für das Monitoring der Demonstrationsbauten im Förderkonzept EnBau und EnSan, Deutschland
- degewo AG (Hrsg.). Saniert mit Grüner Technik, <https://www.degewo.de/verantwortung-innovation/fuer-die-umwelt/zukunftshaus/technologie/>, 06.05.2018.
- Sick F. 2016. "degewo Zukunftshaus": Concepts for sustainable energetic rehabilitation of buildings, SBE16 Hamburg International Conference on Sustainable Built Environment Strategies – Stakeholders – Success factors, S. 296-301, Hamburg, Deutschland, ISBN 978-3-00-052213-0.
- Sick F., Dietz S., Werder F. 2018. Monitoring degewo Zukunftshaus in Berlin - Jahresbericht 2017, Berlin, Deutschland.

FELDTTEST INNOVATIVER LOWEX-TRINKWASSERERWÄRMUNG ZUR STEIGERUNG DER EFFIZIENZ VON GAS-BRENNWERTTECHNIK

J. Elfner¹, J. Zeisberger¹ und F.J. Ziegler¹

¹ Fakultät für Versorgungs- und Gebäudetechnik, Hochschule für angewandte Wissenschaften München, Munich, Germany

KURZFASSUNG

Der Heizenergiebedarf von Neubauten hat in den letzten Jahren eine deutliche Reduktion erfahren. Der Wärmebedarf der Trinkwassererwärmung (TWE) ist jedoch zum Großteil an die Abnahme gebunden, deren Anteil am Gesamtwärmebedarf nimmt daher zu. In modernen Wohngebäuden beträgt dieser in der Regel über 50 %. Die Effizienz der TWE ist bisher weder geregelt, noch Bestandteil gängiger Energieeinsparmaßnahmen. Lastspitzen und hohe Rücklauftemperaturen von im Durchschnitt über 50 °C bei verfügbaren Kaltwassertemperaturen von unter 15 °C sind üblich und erschweren zunehmend den Betrieb von Wärmeerzeugern und Wärmenetzen. Um die Klimaziele einhalten zu können, müssen daher zukünftig auch TWE-Anlagen in die energetische Optimierung von Wohngebäuden miteinbezogen werden. In diesem Beitrag wird der Feldtest einer innovativen LowEx-TWE-Anlage vorgestellt, welche niedrige Rücklauftemperaturen, hohe Lastglättungen und damit einen hocheffizienten Betrieb eines Gas-Brennwertgeräts (GBW) ermöglicht.

ABSTRACT

The heating demand for space heating in newly built houses has been reduced considerably in the past few years. The heating demand for potable hot water remained constant, since it is mostly depending on tap water demand. Thus its share of the total heating demand increased to currently more than 50 %. The efficiency of potable hot water appliances is neither controlled, nor part of energy-saving measures. High peak loads and return flow temperatures of

more than 50 °C, while having a cold water reservoir of less than 15 °C, are common. This impedes the efficient use of heating devices and heat networks. Thus in the future potable hot water appliances have to be incorporated in energy-saving measures in residential buildings to be able to achieve the climate targets. This publication will present the measurement results of an innovative potable hot water appliance used in a field test which offers the benefits of low return temperatures, high load leveling and thus a highly efficient condensing boiler operation.

EINLEITUNG

Zum Erreichen der Klimaziele der Bundesregierung wird bis zum Jahr 2050 ein klimaneutraler Gebäudebestand angestrebt. Seit Einführung der Energieeinsparverordnung hat der Heizenergiebedarf von Neubauten bereits eine deutliche Reduktion erfahren. Der Wärmebedarf der TWE ist jedoch zu einem großen Teil vom tatsächlichen Warmwasserbedarf der Nutzer eines Gebäudes abhängig. Mit zunehmender Reduktion des Heizwärmebedarfs steigt daher der Anteil der TWE am Gesamtwärmebedarf. In modernen Mehrfamilienhäusern (MFH) beträgt dieser in der Regel über 50 %. Dennoch ist die Effizienz der TWE bisher weder geregelt, noch Bestandteil üblicher Energieeinsparmaßnahmen. Durchschnittliche Rücklauftemperaturen über $T_{RL} > 50$ °C und hohe Lastspitzen sind die Regel und erschweren den effizienten Betrieb von Wärmeerzeugern, Wärmenetzen und die Einkoppelung erneuerbarer Energien wie Geothermie und Solarthermie.

Mangelhaft eingestellte und falsch dimensionierte Anlagen sind häufig die Ursache für hohe Rücklauftemperaturen und Lastspitzen (Jagnow, Wolff, 2005). Bei TWE-Anlagen spielen weiterhin die Wärmeverluste der Zirkulationsleitungen eine tragende Rolle. Diese sinken zwar mit neuen Dämmstandards, jedoch erreichen auch gut eingestellte und korrekt dimensionierte Anlagen in neuen MFH in der Regel keinen effizienten Betrieb, da bei der Zwischenspeicherung von Wasser in Puffer- oder Warmwasserspeichern keine Unterscheidung nach verschiedenen Temperaturniveaus vorgenommen wird. Vermischungen mit Verlust der Temperaturschichtung sind die Folge. Dem Wärmeerzeuger steht kein kaltes Wasser zur Verfügung, die Temperaturspreizung und Speicherkapazität sinken, Massenströme steigen. Ein effizienter Betrieb wird verhindert. Das in diesem Beitrag vorgestellte System zur Optimierung von TWE-Anlagen verfolgt daher den Ansatz, das Wasser verschiedener Temperaturniveaus in einem Pufferspeicher (PS) gezielt einzuschichten und zu entnehmen.

ENTWICKLUNG UND ERPROBUNG

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wurde eine innovative LowEx-TWE-Anlage für aus Geothermie gespeiste Fernwärmenetze auf dem Laborprüfstand entwickelt und erprobt. Dazu wurde aus messtechnischen Untersuchungen an einer Vielzahl an MFH ein Referenzlastprofil des Warmwasserverbrauchs für ein Gebäude mit 23 Wohneinheiten entwickelt. Mithilfe dieses Referenzlastprofils wurden sieben verschiedene Fernwärmeübergabestationen (FÜS) mit dazugehörigen TWE-Anlagen nach dem Stand der Technik vermessen und bezüglich der Rücklauftemperaturen, des Lastverschiebungspotenzials und der Einhaltung aktueller Richtlinien untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 1 dargestellt. Die entwickelte LowEx-TWE-Anlage ist mit FÜS3 bezeichnet.

Hierbei konnte bei der LowEx-TWE-Anlage nicht nur die weitgehende Auskühlung des Rücklaufs gezeigt werden, sondern auch die nahezu vollständige Lastglättung der TWE-Leistung und die Erhöhung der Speicherkapazität durch eine hohe Temperaturspreizung. Darüber hinaus bietet die TWE-Anlage die Möglichkeit eines indirekten Anschlusses an den Wärmeerzeuger

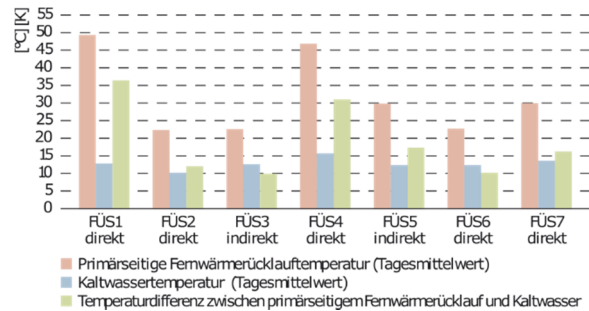


Abbildung 1: Rücklauftemperaturen der FÜS (Spannig, Ziegler, 2015).

sowie der Speicherung von Wärme in einem mit Heizungswasser beladenen PS (Henke et al., 2014). In (Zeisberger, 2015) wurde die TWE-Anlage weiter optimiert und auf die Nutzung von Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplung, Solarthermie und Gas-Brennwerttechnik adaptiert. Feldtests in MFH wurden umgesetzt. Es wurde aufgezeigt, dass die TWE-Anlage auch bei diesen Wärmeerzeugern einen hocheffizienten Betrieb ermöglicht. Die Adaption auf Gas-Brennwerttechnik soll im Folgenden genauer aufgeführt und anhand der experimentellen Untersuchung in einem Feldtest bezüglich der erreichbaren Effizienz des Wärmeerzeugers analysiert werden.

UMSETZUNG IN FELDTTEST

Die in diesem Beitrag vorgestellte Auswertung von Messdaten erfolgt anhand eines Feldtests in einem MFH mit 102 Wohneinheiten aus dem Baujahr 2002 nach Wärmeschutzverordnung 1995 im Stadtgebiet München. Im Zuge der Sanierung der Heizzentrale im Jahr 2017 konnte die innovative LowEx-TWE-Anlage eingesetzt werden. Der Aufbau der Anlage ist in Abbildung 2 dargestellt. Dämmstandard, Rohrsystem und Raumheizungen wurden nicht erneuert. Aufgrund der hohen Auslegungstemperatur der Raumheizkörper von 75/60 °C ist mit hohen Temperaturen vom Rücklauf des Heizkreises zu rechnen.

Zentrales Element ist hier der PS mit insgesamt 8 m³ Volumen. Auf der rechten Seite ist das Frischwassermodul (FWM) zur TWE dargestellt. Eine Besonderheit gegenüber marktüblichen Modulen ist die getrennte Nachheizung (NHZ) der Verluste der Zirkulationsleitungen im Zirkulationswärmetauscher und die gezielte Einspeicherung des mit $T_{NHZ} \approx 56$ °C warmen Rücklaufs. Dieser wird dem gemeinsamen Vorlauf zu den Wärmetauschern beigemischt,

um eine konstante Vorlauftemperatur von 65 °C zu erreichen. Dies reduziert einerseits die Gefahr von Verkalkung im Wärmetauscher, andererseits werden Lastspitzen abgefangen. Treten größere Entnahmen von warmem Trinkwasser (TWW) auf, so wird das eingespeicherte Wasser der NHZ wieder aus dem PS entnommen und der PS entleert. Der dabei anfallende kalte Rücklauf wird im unteren Bereich des PSs eingelagert.

Auf der linken Seite des PSs befindet sich das GBW mit, wie heute bei modernen GBW üblich, einem getrennten Anschluss für Hochtemperatur- (HT) und Niedertemperatur-Rücklauf (NT). Die Einbindung der Raumheizung erfolgt direkt zwischen Vorlauf und HT-Rücklauf des GBWs. Eine Einbindung in den PS ist aufgrund der trägen Lastanforderung der Raumheizung nicht vorgesehen. Da deren Optimierung nicht Teil des Forschungsvorhabens ist, wird deren Analyse im Folgenden weitgehend ausgeklammert.

Weiterhin ist noch eine Solarthermie-Anlage mit 69 m² in die Aufheizung des Pufferspeichers eingebunden. Da diese erst zu Beginn des Winters in Betrieb gehen konnte, wird deren Auswertung in zukünftigen Veröffentlichungen thematisiert.

Alle in der folgenden Messwertanalyse verwendeten Sensoren sind im Funktionsschema der TWE-Anlage in Abbildung 2 gekennzeichnet.

IDENTIFIKATION DER EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE EFFIZIENZ VON GBW

Zur Bewertung der Effizienz von GBW müssen die Einflussfaktoren identifiziert werden. Dies wird im vorliegenden Bericht mit einer umfangreichen Verbrennungsrechnung unter Einbezug der folgenden Parameter durchgeführt: Der Temperatur des Abgases (AG) T_{AG} , welche primär von der Temperatur des Rücklaufes T_{RL} abhängig ist, der Luftzahl λ , der Temperatur der angesaugten Luft T_{Luft} , der relativen Luftfeuchtigkeit φ , der Zusammensetzung des Erdgases und des Taktverhaltens.

Zur qualitativen Bewertung der Einflussfaktoren wird die Kondensationsgüte η_{KG} in Abhängigkeit des dem Abgas entnommenen Wärmestroms $\dot{Q}_{Abn.}$, des Brenn- und Heizwertes und des Norm-Gasvolumenstroms \dot{V}_n definiert, siehe Gleichung (1). Bei Vernachlässigung der sensiblen Wärme unterhalb des Taupunktes entspricht dies dem Quotienten aus anfallendem Kondensatmassenstrom $\dot{m}_{Kond.}$ und dem bei der Verbrennung wasserstoffhaltiger Verbindungen entstehenden Wassermassenstrom. Die Kondensationsgüte stellt die Effizienz der Nutzung der Kondensationswärme dar und ist daher nur für $\dot{Q}_{Abn.} \geq H_{I,n} \dot{V}_n$ definiert.

$$\eta_{KG} = \frac{\dot{Q}_{Abn.} - H_{I,n} \dot{V}_n}{(H_{S,n} - H_{I,n}) \dot{V}_n} \approx \frac{\dot{m}_{Kond.}}{\dot{m}_{H_2O,Verb.}} \quad (1)$$

Weiterhin wird der Nutzungsgrad in einem Bilanzierungszeitraum bezüglich des Heizwertes

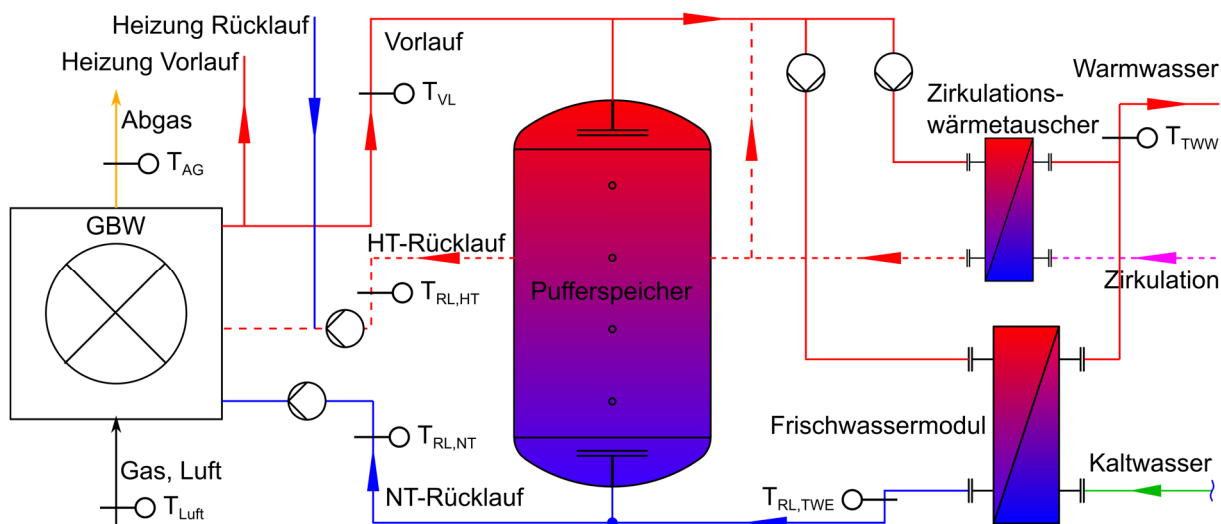


Abbildung 2: Schema der im Feldtest umgesetzten TWE-Anlage mit Heizungseinbindung

η_{NG,H_I} nach Gleichung (2) sowie bezüglich des Brennwertes η_{NG,H_S} nach Gleichung (3) berechnet.

$$\eta_{NG,H_I} = \frac{Q_{Abn.}}{H_{I,n}V_n} \quad (2)$$

$$\eta_{NG,H_S} = \frac{Q_{Abn.}}{H_{S,n}V_n} \quad (3)$$

Alle mit Index n versehenen Formelzeichen nehmen Bezug auf den physikalischen Normzustand nach DIN 1343 bei einem Druck von 1013,25 hPa und einer Temperatur von 273,15 K.

Das in diesem Feldtest verbrannte Erdgas H hat einen durchschnittlichen Heizwert von $H_{I,n} = 10,17 \text{ kWh/m}^3$ und Brennwert von $H_{S,n} = 11,27 \text{ kWh/m}^3$. Bei der Verbrennung entstehen ca. $m_{H_2O,Verb.} = 1,62 \text{ kg}_{H_2O}/\text{m}^3_{\text{Erdgas}}$ bzw. $160 \text{ g}_{H_2O}/\text{kWh}_{H_{I,n}}$ Kondensat, eine vollständige Nutzung des Brennwertes entspricht einem Nutzungsgrad bezüglich des Heizwertes von $\eta_{NG,H_I} = 110,8 \%$.

In Abbildung 3 ist der Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit und der Lufttemperatur, jeweils bei einer Luftzahl von $\lambda = 1,1$, auf die Kondensationsgüte von Erdgas H für verschiedene AG-Temperaturen und der AG-Temperatur bei verschiedenen Luftzahlen dargestellt. Dabei zeigt sich, dass der Taupunkt bei $\lambda = 1,1$ bei ca. $57 \text{ }^\circ\text{C}$ liegt. Bei Abgastemperaturen oberhalb des Taupunktes ist keine Brennwertnutzung möglich. Die relative Luftfeuchtigkeit und die Lufttemperatur zeigen damit unabhängig von der Abgastemperatur einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Kondensationsgüte. Eine Erhöhung der Luftzahl hat mit steigender Abgastemperatur eine

zunehmende Reduktion der Kondensationsgüte zur Folge. Die AG-Temperatur hat die größte Bedeutung für die Effizienz von GBW, insbesondere unter dem Blickpunkt, dass die Nutzung der sensiblen Wärme bei der Berechnung der Kurven in Abbildung 3 vernachlässigt wird. Tabelle 1 fasst die Einflussfaktoren und deren Auswirkung auf die Effizienz von GBW zusammen.

Um den Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit und der Lufttemperatur in der nachfolgenden Analyse der Messwerte zu berücksichtigen, wird für die Berechnung der Zeitreihen auf die vor Ort gemessene Lufttemperatur und die von der nächstgelegenen Messstation des Deutschen Wetterdienstes zur Verfügung gestellte Luftfeuchtigkeit zugegriffen.

Tabelle 1: Einflussfaktoren auf die Effizienz von GBW

Einflussfaktor	Veränderung	Effizienz
T_{AG}	↓	↑
Luftzahl λ	↑	↓
T_{Luft}	↑	↑
φ	↑	↑
Schaltheufigkeit	↑	↓

ANALYSE DER MESSERGEBNISSE

Die Aufzeichnung von Messdaten der TWE-Anlage im Feldtest ist seit Mitte August 2017 konstant in Betrieb. In Abbildung 4 auf der linken Seite ist das Zapfprofil von TWW eines typischen Wochentages dargestellt. Die Spitzenlasten liegen bei ca. $100 \text{ kW} \leq \dot{Q}_{TWW} \leq 120 \text{ kW}$. Die Rücklauftemperatur der TWE-Anlage liegt trotz der hohen erforderlichen

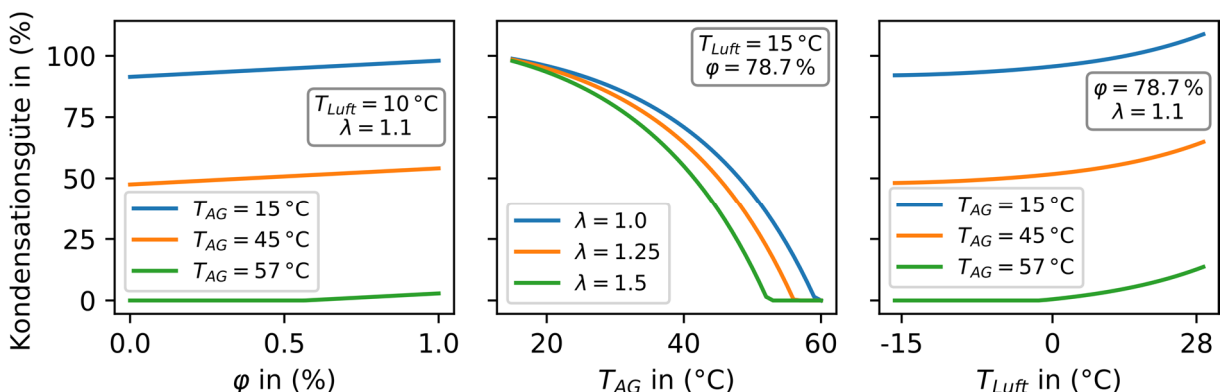


Abbildung 3: (links) Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit für verschiedene AG-Temperaturen, (Mitte) Einfluss der AG-Temperatur für verschiedene Luftzahlen, (rechts) Einfluss der Lufttemperatur für verschiedene AG-Temperaturen

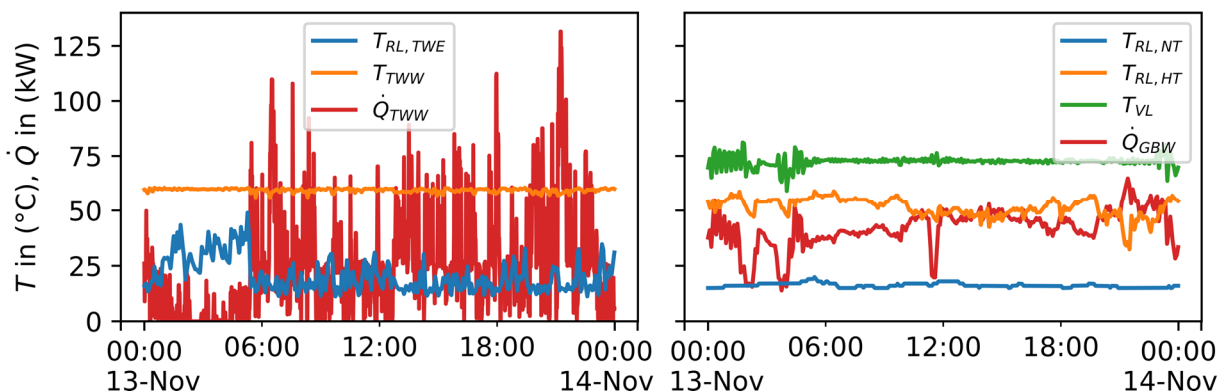


Abbildung 4: (links, Abnehmerseite) RL- und TWW-Temperatur sowie Wärmelast zur TWW-Bereitstellung, (rechts, Versorgerseite) RL-Temperaturen, Vorlauf-Temperatur und Wärmeleistung des GBWs, ausschließlich zur TWE.

Massenströme im bei $T_{RL,TWE} < 18\text{ °C}$, während die TWW-Temperatur auch bei Spitzenlast zu keinem Zeitpunkt unter $T_{TWW} = 56\text{ °C}$ fällt. Der Anstieg von $T_{RL,TWE}$ in der Nacht ist auf Wärmeleitung zurückzuführen, da nur wenig TWW benötigt wird. Wird $T_{RL,TWE}$ über den Massenstrom gemittelt, beträgt die mittlere Temperatur $T_{RL,TWE,\phi} \approx 16\text{ °C}$. Damit liegt die Rücklauf-Temperatur der TWE-Anlage im Durchschnitt nur 5 K über der Kaltwassertemperatur von 11 °C , der niedrigsten im System verfügbaren Temperatur.

Dies wird anhand der Temperatur des NT-Rücklaufs $T_{RL,NT}$ in Abbildung 4 auf der rechten Seite bestätigt. Die Temperatur des HT-Rücklaufs $T_{RL,HT}$ wird maßgeblich von der NHZ bestimmt, während die Vorlauf-Temperatur des GBWs konstant auf $T_{VL} \approx 75\text{ °C}$ eingeregelt ist. Die durch den GBW für die TWE bereitgestellte Wärmeleistung, hier ohne Wärmebedarf für die Raumheizung dargestellt, liegt ohne Auftreten von Lastspitzen bei $16\text{ kW} \leq \dot{Q}_{GBW} \leq 64\text{ kW}$, im Durchschnitt $\dot{Q}_{GBW,\phi} \approx 42\text{ kW}$. Die bei der Wärmelast für TWW auftretenden fluktuierenden Lasten sind nahezu vollständig geglättet. Da zu jedem Zeitpunkt kaltes Wasser aus dem PS zur Verfügung steht, ist zu keinem Zeitpunkt ein Takten des GBWs zu beobachten.

Zur transparenten Darstellung der durch Kondensation zusätzlich nutzbaren Wärme wird der in Gleichung (2) beschriebene Nutzungsgrad bezüglich des Heizwertes zur Messwertanalyse herangezogen. Dadurch kann der Einfluss der TWE-Anlage auf die Effizienz von GBW beurteilt werden. Dies ist in Abbildung 5 anhand von auf Stundenwerte gemittelten Datenreihen dargestellt. Die Unregelmäßigkeit Anfang November ist auf eine kurzzeitige

Änderung von Reglerparametern zurückzuführen.

Abbildung 5 stellt die Temperaturmesswerte im Gegensatz zur vorigen Abbildung nach Einbindung des Heizkreises dar. Das heißt, dass die Temperatur des HT-Rücklaufs $T_{RL,HT}$ bei Einsetzen der Heizperiode eine Mischtemperatur aus dem HT-Rücklauf der TWE und der Heizung darstellt. In Abbildung 5 (unten) zeigt sich, dass dauerhaft ein Nutzungsgrad von $\eta_{NG,H_1} > 107\%$ erreicht wird. Der Mittelwert liegt bei $\eta_{NG,H_1,\phi} \approx 109,4\%$, entsprechend einer Kondensationsgüte von $\eta_{KG,\phi} \approx 87,2\%$. Die zuvor beschriebene Abhängigkeit von der Abgastemperatur ist zu erkennen. Bei näherer Betrachtung des Gasverbrauchs \dot{Q}_{Gas} in Abbildung 5 (oben) wird der Einfluss des Heizwärmebedarfs offensichtlich. Da die Heizung in den HT-Rücklauf eingebunden ist, ergibt sich hier in der Heizperiode eine Temperatur von ca. $T_{RL,HT} \approx 46\text{ °C}$. Der NT-Rücklauf, nur aus dem PS der TWE gespeist, bleibt unbeeinflusst. Dennoch steigt die Abgastemperatur während der Heizperiode von ca. 22 °C auf durchschnittlich 30 °C . Dies ist, wie die konstante Temperatur des NT-Rücklaufs zeigt, auf den niedrigeren GBW-Wirkungsgrad bei höherem Belastungsgrad zurückzuführen.

Die entwickelte LowEx-TWE-Anlage führt somit aufgrund des zu jedem Zeitpunkt zur Verfügung stehenden Kaltwasser-Reservoirs und der Lastglättung in der Heizperiode und insbesondere im Sommerbetrieb zu einem hocheffizienten Einsatz des Wärmeerzeugers.

Diskussion der Messergebnisse

Da im vorliegenden Bericht keine Messdaten über ein gesamtes Jahr verwendet werden

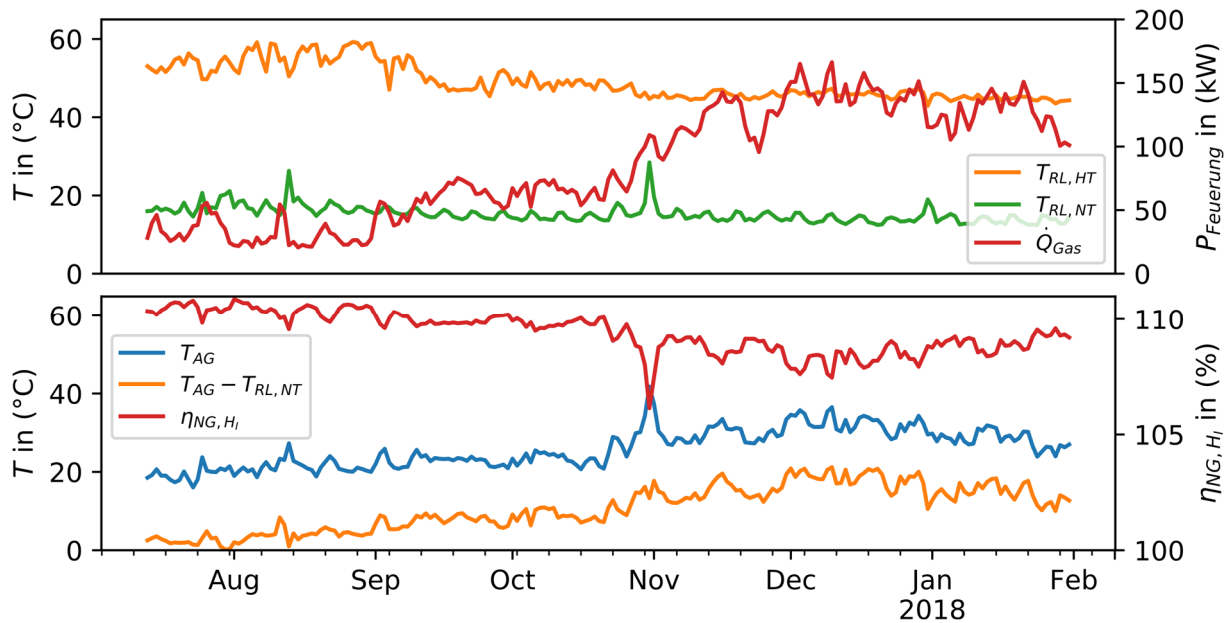


Abbildung 5: (unten) Nutzungsgrad und AG-Temperatur, (oben) HT- und NT-Temperatur des GBWs sowie Gasverbrauch

können, sollen im Folgenden zwei verschiedene Nutzungsgrade zum Vergleich mit Ergebnissen aus der Literatur herangezogen werden:

- Nutzungsgrad der Heizperiode als Worst-Case, Mittelwert von November bis Februar, $\eta_{NG,H_i,Wi} = 108,7 \%$
- Nutzungsgrad des Sommerbetriebs als Best-Case, Mittelwert von Juli bis Oktober, $\eta_{NG,H_i,So} = 110,2 \%$

Auf den Brennwert bezogen betragen die Nutzungsgrade $\eta_{NG,H_S,Wi} = 98,1 \%$ und $\eta_{NG,H_S,So} = 99,4 \%$.

In (Wolff et al., 2004) wurden 60 GBW-Anlagen bezüglich des auf den Brennwert bezogenen Jahresnutzungsgrades untersucht. Es wurde ein Mittelwert von 86,2 % ermittelt, der beste erreichte Wert lag bei ca. 97,5 %.

Wie in einer Studie von (Verbraucherzentrale Bundesverband e.V., 2011) gezeigt, nahm die anfallende Kondensatmasse in den letzten Jahren kontinuierlich zu. Der dort für das Jahr 2011 ermittelte Durchschnittswert lag bei 86 g/kWh. Dies entspräche bei dem im vorgestellten Feldtest verwendeten Erdgas H ungefähr einem auf den Brennwert bezogenen Jahresnutzungsgrad von ca. 95,5 %. In dieser Studie wird ein Spitzenwert von 175 g/kWh Kondensat angegeben. Da alle Messungen in der Heizperiode und nach Angabe der Autoren bei $-10 \text{ °C} \leq T_{Luft} \leq 10 \text{ °C}$ durchgeführt wurden, entspräche dies mehr Kondensat, als in Erdgas

und der angesaugten Luft insgesamt maximal vorhanden sein können.

Für den Vergleich mit aktuellen Anlagen wird daher (Wolff et al., 2017) herangezogen. Hier konnte aus Messwerten von 65 GBW-Anlagen ein durchschnittlicher auf den Brennwert bezogener Jahresnutzungsgrad von 87 % gefunden werden, mit einem Anstieg der Trendlinie auf 89 % für neue Anlagen aus dem Jahr 2015. Der Spitzenwert liegt bei ca. 99,5 %.

Im Vergleich mit den Daten aus der Literatur muss aufgeführt werden, dass das in diesem Feldtest als Testobjekt verwendete MFH nach altem Baustandard und mit Heizkreis hoher Temperatureauslegung entworfen wurde. Eine Optimierung der Heizungen und der Rohrleitungsverluste war nicht Teil des Forschungsvorhabens. Die infolgedessen auftretenden höheren Verluste und Rücklauftemperaturen müssen bei einem Vergleich des Jahresnutzungsgrades beachtet werden. Dennoch wird ein Nutzungsgrad erreicht, der nur von einem Wert aus der Literatur übertroffen wird. Die innovative LowEx-TWE-Anlage ermöglicht somit einen höchsteffizienten Betrieb des Wärmerezeugers.

Einen anderen Ansatz zur Steigerung der Effizienz von Wärmerezeugern in Wohngebäuden verfolgt (Rühling et al., 2017). In diesem Artikel wird untersucht, wie weit die Temperatur von Zirkulationsleitungen abgesenkt werden kann, ohne dass die Einhaltung hygienischer Bestimmungen gefährdet wird. Es wird gezeigt, dass eine Reduktion um mehrere

Kelvin möglich ist. Eine Verringerung der Verluste des Zirkulationsnetzes ist die Folge und damit auch des NHZ-Bedarfs. Dies würde nicht nur die Rücklauftemperatur der meisten TWE-Anlagen senken, sondern auch bei der in diesem Beitrag vorgestellten Anlage zu einer noch höheren Effizienz führen. Weiterhin würde der Bedarf an Speichervolumen zur Lastglättung oder Lastverschiebung sinken.

ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden Bericht konnte gezeigt werden, dass entgegen üblicher Annahmen auch die Trinkwassererwärmung einen Beitrag zur Energieeinsparung im Gebäudebestand leisten kann. Obwohl das dem Gebäude zugrundeliegende Heizungssystem mit hohen Auslegungstemperaturen betrieben wird und nicht Teil der Optimierungen des Forschungsprojektes war, wird ein Nutzungsgrad von 98 % bis 99,4 % erreicht. Übliche Nutzungsgrade liegen bei 86 % bis 89 %.

Im vorliegenden Fall wird alleine durch den Einbau der innovativen LowEx-Trinkwassererwärmungs-Anlage sogar die Effizienz moderner Niedertemperaturheizungen übertroffen. Wird nur die Effizienzsteigerung durch die nahezu vollständige Brennwertnutzung betrachtet, so bedeutet dies eine Einsparung von ca. 10 % der Kosten für Erdgas. Darüber hinaus wird der Verbrauch fossiler Energieträger reduziert.

Aufgrund der niedrigen Rücklauftemperaturen der Anlagentechnik ist diese auch hervorragend für den Einsatz mit anderen Wärmeerzeugern geeignet. Beispielsweise wird durch die Lastglättung bei einem Anschluss an Fernwärme- und Geothermienetze die Belastung für die Wärmeerzeuger reduziert, die große Spreizung zwischen Vor- und Rücklauf-temperatur erhöht die Transportkapazitäten. Weiterhin wird die verfügbare Wärmeleistung von geothermischen Bohrungen gesteigert. Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen können durch die mit der Spreizung steigenden Speicherkapazitäten flexibler und nach dem Strombedarf betrieben werden, auch eine Brennwertnutzung wird ermöglicht. Auch Solarthermie lässt sich effizienter nutzen.

Die Eignung für diese Wärmeerzeuger wird derzeit in weiteren Feldtests analysiert.

Bisherige Ergebnisse sind vielversprechend und werden bei Vorliegen ausreichender Messdaten in zukünftigen Veröffentlichungen thematisiert werden.

Weiterhin soll die nahezu von Gebäudegröße, Baustandard und Wärmeerzeuger unabhängige Einsetzbarkeit der Anlagentechnik durch einen Transfer der aus den Feldtests gewonnenen Erkenntnisse untermauert werden. Zu diesem Zweck wird derzeit ein speziell auf diesen Anwendungsfall abgestimmtes Simulationstool entwickelt und validiert.

LITERATUR

- Henke, S., Kröper, T., Spannig, J., Zeisberger, J., Ziegler, F.J. 2015. EnEff:Wärme - LowEx-Systeme: Breitenanwendung von Niedertemperatur-Systemen für eine nachhaltige Wärmeversorgung: Abschlussbericht, AGFW Forschung und Entwicklung, Frankfurt am Main.
- Jagnow, K., Wolff, D. 2005. Abschlussbericht OPTIMUS - Teil 2: Technische Optimierung und Energieeinsparung, Projekt Optimus, Forschungsgruppe Praxisnahe Berufsbildung, Universität Bremen.
- Rühling, K., Löser, J., Hoppe, S., Haupt, L., Rothmann, R., Lück, C. 2017. Energieeffizienz und Hygiene in der Trinkwasserinstallation - Erkenntnisse eines Verbundvorhabens, EuroHeat&Power 12/2017, Offenbach am Main.
- Spannig, J., Ziegler, F.J. 2015. Fernwärme effizient nutzen, BINE Projektinfo 14/2015, BINE Informationsdienst, Bonn.
- Verbraucherzentrale Bundesverband e.V. 2011. Aktion Brennwertcheck, Energieteam Verbraucherzentrale Bundesverband e.V. (vzbv), Berlin.
- Wolff, D., Teuber, P., Budde, J., Jagnow, K. 2004. Felduntersuchung: Betriebsverhalten von Heizungsanlagen mit Gas-Brennwertkesseln, Fachhochschule Braunschweig Wolfenbüttel, Wolfenbüttel.
- Wolff, D., Unverzagt, A., Schünemann, A., Rasche, S. 2017. Energiekonzepte mit Erfolgsnachweis, Ostfalie Hochschule für angewandte Wissenschaften, Wolfenbüttel.
- Zeisberger, J. 2017. Beitrag zur energieeffizienten Trinkwassererwärmung, Technische Universität München, München

INSTATIONÄRES, HYGROTHERMISCHES VERHALTEN VON SOCKELANSCHLÜSSEN

H. Hafellner¹, M. Dragic¹ und P. Kautsch¹

¹TU Graz, Institut für Hochbau, Lessingstraße 25 / III, 8010 Graz, Austria

KURZFASSUNG

Anhand eines Gründerzeithauses aus 1850 werden die Modellbildung und die Ergebnisse von hygrothermischen Simulationen für erdberührte bzw. erdnahe Bereiche beschrieben. In den 1D- und 2D-Simulationen werden die Bestandsaufbauten sowie die Sanierungsvarianten, welche mittels kapillaraktiven diffusionsoffenen Innendämmungen ausgeführt werden, simuliert und ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen kritische Punkte in Hinsicht auf Feuchteentwicklung und Schimmelpilzbildung in den Konstruktionen sowie an den Bauteilgrenzflächen auf. Lösungsmöglichkeiten zur unbedenklichen Ausführung von Innenwanddämmsystemen sowie Vorgehensweisen für hygrothermische Simulationen von Sockelbereichen werden geliefert. Die Grenzen der Modellierbarkeit werden ebenso aufgezeigt, wie die Komplexität der Randbedingungen von Sockelbereichen.

ABSTRACT

Based on a historical building from 1850, the modeling and the results of hygrothermal simulations for areas in contact or near the earth are described. In the 1D and 2D simulations, the existing structures as well as the refurbishment variants, which are carried out by means of capillary-active, vapor-permeable internal insulation, are simulated and evaluated. The results show critical points with regard to moisture development and mold formation in the constructions as well as on the component surfaces. Possible solutions for safe execution of interior wall insulation systems as well as procedures for hygrothermal simulations of base areas are provided. The limitations of modeling

are demonstrated, as well as the complexity of the boundary conditions of pedestal areas.

EINLEITUNG

Die Randbedingungen von erdberührten bzw. unterkellerten Aufenthaltsräumen verursachen starke Salz- und Feuchtigkeitsbelastungen durch die gleichzeitige Einwirkung von Schlagregen, aufsteigender Feuchtigkeit, Spritzwasser und Wasserdampfdiffusion in den angrenzenden Bauteilen. Zusätzlich führen geometrisch-, material- und oftmals auch umgebungsbedingte Wärmebrücken zu Kondensation und Schimmelbildung im Sockelbereich.

Anhand eines Fassadenschnittes und den zugehörigen Detailpunkten wird verdeutlicht wie stark der erdnahe und erdberührte Bereich im Gegensatz zu erdfernen Bauteilen beansprucht wird. Weiter wird eine Möglichkeit zur Modellierung für hygrothermische Simulationen gezeigt. Bei vorhandenen Messdaten können natürlich die beschriebenen Randbedingungen dementsprechend adaptiert werden. Die Komplexität besteht nicht zuletzt darin, die umfangreichen Randbedingungen von vier verschiedenen Klimata (Außenklima, Innenklima im Untergeschoß, Innenklima im Erdgeschoß, Erdreich) zu vereinen.

Dazu ist es notwendig die Simulationen in Teilbereiche zu gliedern, da eine Gesamtsimulation des betroffenen Bereiches zu umfangreich wäre. Die ÖNORM EN ISO 10211 sieht eine Modellierung von zweieinhalbfacher Gebäudebreite für das betrachtete Erdreich vor. Im ersten Schritt werden Variationen vom angrenzenden Erdreich samt Straßen- und Gehsteigaufbauten simuliert. Die Ergebnisse werden als Randbedingungen für die Simulation

der erdberührten Kelleraußenwand herangezogen. Hieraus lassen sich die Übergangsbedingungen für den maßgebenden Wohnbereich im Erdgeschoß ableiten und in weiterer Folge können die Baustoffe für die Sanierungsmaßnahmen variiert werden.

Beim betrachteten Gebäude handelt es sich um ein Gründerzeithaus das im Jahr 1850 erbaut wurde. Der Keller wurde zwischenzeitlich als Abstellraum und als Tischlerei verwendet. Auf Grund des schlechten Innenklimas und der starken Schädigungen der erdberührten Außenwände findet keine Nutzung im Keller statt. Die oberen Geschosse werden als Büros genutzt.

MATERIAL UND METHODEN

Die Simulationsberechnungen wurden mit der Software Delphin 5.8.3 für gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport durchgeführt.

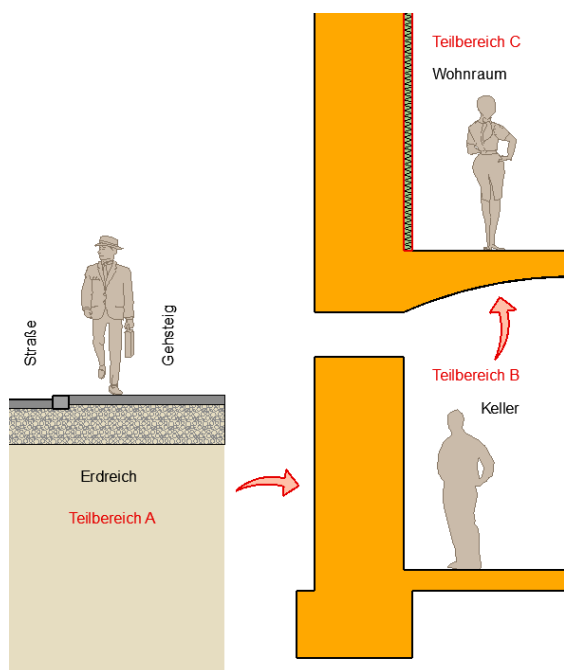


Abbildung 1 Aufteilung in drei Teilbereiche zur Lösung der Problemstellung (Modellbildung)

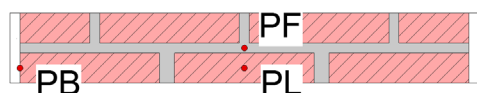
Instationäre, hygrothermische Simulationen sind für Bauteilaufbauten (1D) wenig



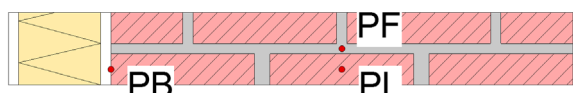
V1: Ziegel homogen, ohne Innendämmung



V3: Ziegel homogen, mit Innendämmung



V2: Ziegel + Fugen, ohne Innendämmung



V4: Ziegel + Fugen, mit Innendämmung

Abbildung 2 Modellbildung instationäre 1D Varianten

problembehaftet. Um die gegebenen Randbedingungen des erdnahen bzw. erdberührten Bereiches abbilden zu können sind 2D-Simulationen notwendig. Da jedoch die Gesamtsituation des Sockelbereiches zu umfangreich wäre um in einer Simulation abgebildet zu werden, wurde diese in die drei Teilbereiche Erdreich (Teilbereich A), Keller (Teilbereich B) und Wohnraum (Teilbereich C) zerlegt. (siehe Abbildung 1)

Bauteilaufbauten (1D Betrachtungen)

Zu Beginn wurden die Bauteilaufbauten der Außenwände, wie in den WTA-Merkblättern 6-1-01 und 6-2-14 empfohlen, eindimensional stationär betrachtet.

Für die Außenwandkonstruktionen des Erdgeschoßes wurde ein innerer Wärmeübergangswiderstand von $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ und ein äußerer mit $0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ verwendet. Im Untergeschoß wurde für das angrenzende Erdreich $0 \text{ m}^2\text{K/W}$ gewählt. Die Anforderungen der OIB 6 Energieeinsparung und Wärmeschutz ist für die Wand gegen Außenluft im Neubau mit $0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$ (bei Sanierungsmaßnahmen $0,31 \text{ W/m}^2\text{K}$) festgelegt. (vgl. ÖNORM EN ISO 6946) Für die Sanierungsvarianten wurden vier verschiedene Innendämmsysteme (Calsitherm CT, iQ-Therm IQ, Multipor MP, Cellulose ZL) angewendet.

In weiterer Folge wurden die 1D Berechnungen von den stationären auf die instationären, hygrothermischen Betrachtungen erweitert. Im Vergleich wurde einerseits der bestehende Bauteilaufbau sowie eine Sanierungsvariante mit dem Multiporsystem berechnet. Jede Variante wurde mit dem Material eines homogenen Ziegelmauerwerks und einer detaillierten Modellierung der Ziegel mit den Mörtelfugen erweitert. Somit ergaben sich folgende vier Modelle:

Die Höhe des Ausschnitts wurde wie in ÖNORM EN ISO 10211 beschrieben in den Symmetrieebenen der Ziegel begrenzt. Die vier Varianten wurden mit den Randbedingungen des Kellers und des Erdgeschoßes betrachtet, wobei für das Außenklima drei unterschiedliche Klimadatensätze verwendet wurden.

Einerseits wurden die bereitgestellten Datensätze der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) verwendet, die mit Hilfe der Software Meteororm um die notwendigen Parameter erweitert wurden.

Es zeigte sich jedoch, dass die Interpretation der Ergebnisse durch ein mehrjähriges Klima sehr stark erschwert wurden, da die Werte oft nicht exakt auf die Klimabedingung bzw. auf eine Sättigung im Bauteil zurückgeführt werden konnten. Daher wurde ein mittleres Jahresklima generiert. Im WTA-Merkblatt 6-2-14 wird für den eingeschwungenen Zustand bei einem sich jährlich wiederholenden Klimadatensatz eine Abweichung von maximal 1 % auf den Vorjahreswassergehalt empfohlen. Als Vergleichsklimadatensatz wurde im Erdgeschoß das bereits im Programm implementierte Klima für München herangezogen.

Für die Randbedingung des Erdreiches wurden die Klimabedingungen wie im Abschnitt Keller (Teilbereich B) beschrieben für eine Tiefe im Bereich von ca. 1,20 bis 1,70 m herangezogen. Für die Erstellung eines Innenraumklimas im Keller standen gemessene Werte für einen kürzeren Zeitraum als die drei Jahre des Außenklimas zur Verfügung. Somit konnte in Anlehnung an die ÖNORM EN ISO 13788 ein außenklimaabhängiges Kellerinnenklima für die Bestandsvarianten V1 und V2 mit abgeänderten Grenzbereichen für die relative Luftfeuchte und die Temperatur generiert werden. Für das Kellerinnenklima der Sanierungsvarianten V3 und V4 sowie für das Innenklima im Erdgeschoß wurden die Außenklimadaten mit den Grenzwerten der ÖNORM EN ISO 13788 herangezogen. Die Simulationen wurden für einen Betrachtungszeitraum von zehn Jahren durchgeführt und für sämtliche Varianten wurde

spätestens im sechsten Jahr der eingeschwungene Zustand erreicht.

Erdreich (Teilbereich A)

Für das Erdreich wurde an der Geländeoberkante das Außenklima, wie für die 1D Betrachtungen beschrieben, angesetzt. Für den Teilbereich A wurde einerseits Erdreich mit einer 20 cm Humusschicht Decklage und andererseits Erdkörper mit Straßen- und Gehsteigaufbauten mit jeweils darunterliegenden Erdreichschichten simuliert. Weiter konnte auf Grund einer nahegelegenen Grundwasser-Messstelle die Grundwasserhöhe und -temperatur als Randbedingung aufgebracht werden. Die Abmessungen des Erdkörpers wurden auf Grund der innerstädtischen Lage und der daraus bedingten Nachbarbebauung nicht wie in der ÖNORM EN ISO 10211 vorgeschlagen mit zweieinhalbfacher Breite und Tiefe der Gebäudebreite angenommen, sondern um die Hälfte reduziert. Die Simulationen zeigten, dass die Abmessungen jedoch groß genug waren um alle Einflussbereiche zu erfassen und somit die Ausgabe der Randbedingungen für den Keller (Teilbereich B) zu ermöglichen. Als Ausgaben wurden Mittelungen der Elemente für horizontale und vertikale Schichttiefen von 20 cm, 70 cm, 120 cm, 170 cm und 220 cm veranlasst. Die Ausgabe wurde deshalb bis 220 cm durchgeführt, weil die Einbindetiefe des Fundamentes bis zu dieser Tiefe reicht. Die Parameter umfassten die Temperatur, die relative Luftfeuchte und den Kapillardruck in Pascal. Um die Ergebnisse des Wassergehaltes aus dem Teilbereich A als Randbedingung auf den Teilbereich B aufbringen zu können, war es aus programmspezifischen Gründen notwendig, den Kapillardruck [Pa] in eine Druckhöhe [m] umzurechnen. Diese wurde in Kombination mit der zugehörigen Temperatur [°C] als Wasserkontakttrandbedingung aufgebracht.

Die Materialdaten wurden der integrierten Datenbank von DELPHIN entnommen und auf tatsächlichen Messungen von Baustoffen beruhen.

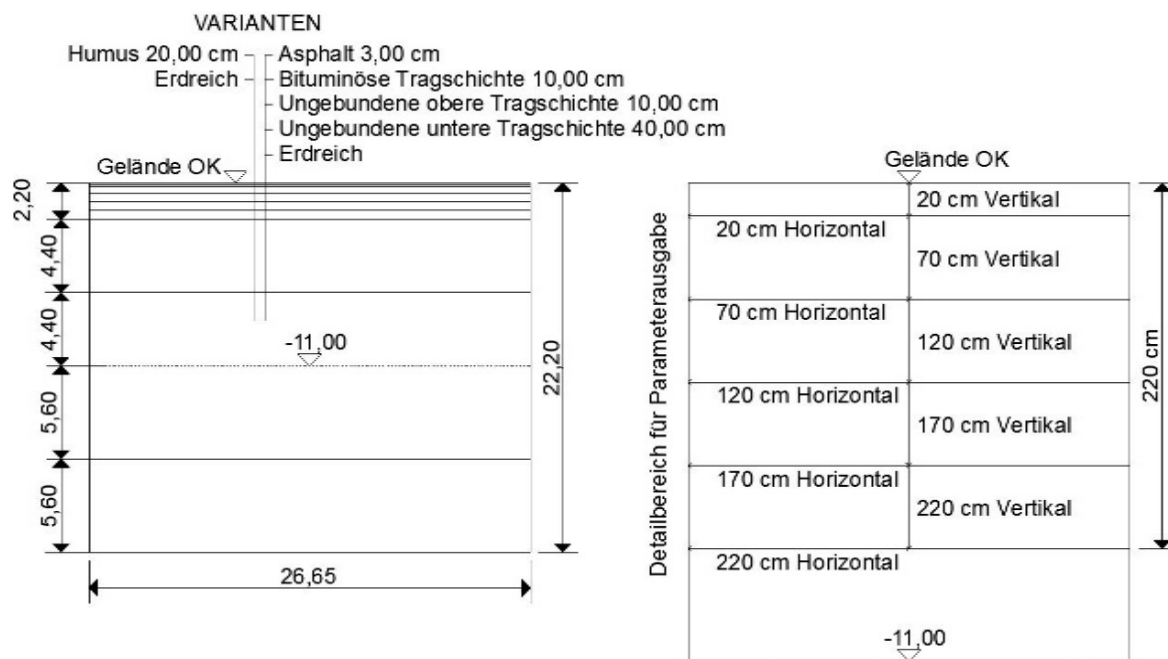


Abbildung 3 Erdreichschichtung (links) und Ausgabeparameter (rechts)

Keller (Teilbereich B)

Für die Kellersimulationen wurden die Wasserkontakttrandbedingungen in den zugehörigen Schichten aufgebracht, so kann die Simulation ohne die Eingabe des angrenzenden Erdreiches durchgeführt werden. Das erspart viele Zellen in der Modellierung und in weiterer Folge können die Rechenzeiten reduziert werden. Als Außenklima wurde das Klima wie in Erdreich (Teilbereich A) beschrieben verwendet, jedoch wurden die Parameter von der horizontalen Ausrichtung auf eine vertikale Nordwand angepasst. Eine Besonderheit stellt hier der Spritzwasserbereich mit 30 cm über Geländeoberkante dar. Der Schlagregenkoeffizient wurde von 0,7 (vgl. WTA-Merkblatt 6-5-14) auf 1,0 gesetzt um die verstärkte Belastung widerzuspiegeln. Das Innenklima wurde abhängig vom Außenklima nach ÖNORM EN ISO 13788 generiert, jedoch wurden als unterer Grenzwert für die Innenraumtemperatur 5°C und als oberer 10°C gewählt. Die relative Luftfeuchte wurde mit 30 % und 55 % begrenzt. Als Ausgabeparameter wurden abermals die Temperatur, die relative Luftfeuchte und der Kapillardruck in Pascal in der Schnittfläche der Kelleraußenwand zum Erdgeschoß gewählt.

Für den Wärmeübergangswiderstand im Innenraum wurden die Werte von $R_{si} = 0,25$ und $0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$, für den Außenbereich von $R_{se} = 0,04$ und $0,06 \text{ m}^2\text{K/W}$ miteinander verglichen.

Weiter wurden die Wasserdampfübergangswiderstände aus der ÖNORM EN 15026, ÖNORM EN ISO 6946, ÖNORM EN ISO 13788 und dem WTA 6-2 Merkblatt variiert, da hier unterschiedliche Angaben gemacht werden.

In Abbildung 4 und in Abbildung 5 sind die wichtigsten in den Simulationen zur Anwendung gekommenen Klima- und Übergangsbedingungen angeführt.

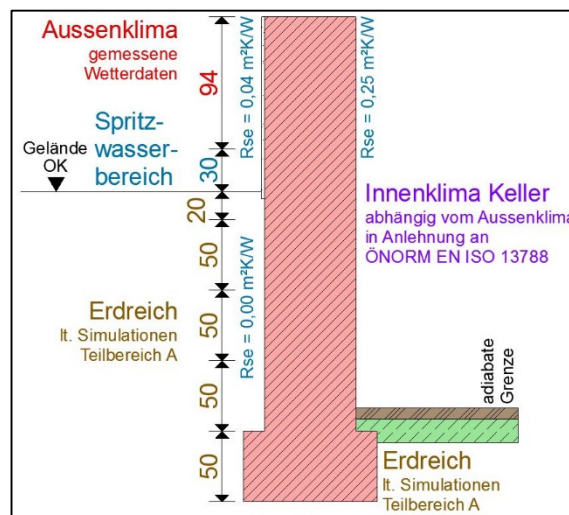


Abbildung 4 Randbedingungen Teilbereich B

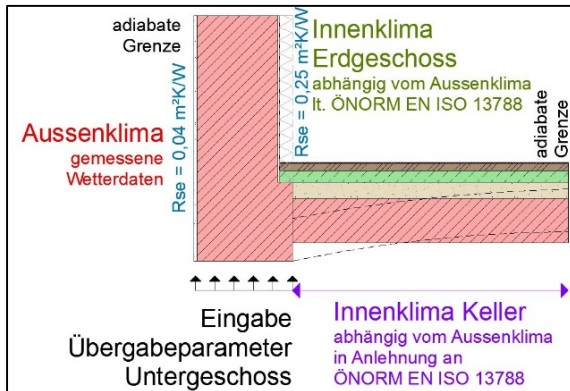


Abbildung 5 Randbedingungen Teilbereich C

Wohnraum (Teilbereich C)

Nach erfolgter Umrechnung des Kapillardrucks [Pa] in die Druckhöhe [m] konnte mit der Temperatureingabe [°C] die Wasserkontakttrandbedingung im Teilbereich C aufgebracht werden. Für das Außen- und Kellerklima wurden dieselben Datensätze, wie in Keller (Teilbereich B) erläutert, verwendet. Die Innenklimabedingungen im Erdgeschoß wurden nach ÖNORM EN ISO 13788 mit Hilfe des Außenklimas generiert. Bei der Modellierung der Kellerdecke wurde eine Vereinfachung dahingehend durchgeführt, dass diese als waagrechte Decke mit einer mittleren Höhe des tatsächlichen Gewölbes eingegeben wurde. Mit Hilfe dieser Modellierung konnte nun die Bestandssituation sowie Varianten für verschiedene Innendämmungsausführungen simuliert werden. Bei den Modellbildungen wurde immer davon ausgegangen, dass bei der Montage der Innendämmsysteme der Bestandsputz an der Innenseite der Außenmauer abgetragen wird (siehe WTA-Merkblatt 6-4-16).

Die Bestandsmaterialien wurden mit der Materialdatenbank von Delphin verglichen und die zutreffenden Datensätze wurden für die Simulationen herangezogen.

Es wird an dieser Stelle auf das WTA-Merkblatt 6-1-01 verwiesen in dem beschrieben wird, dass bei einem berechneten Ziegelsichtmauerwerk die Bestimmung der realistischen Randbedingungen (Klima) maßgeblicher sind als die Materialkennwerte. Das kann auch auf erdberührte bzw. erdnahe Mauerwerke aus der Gründerzeit übertragen werden, da hier meist keine Abdichtungen vorhanden sind, hängt der Wassergehalt des Mauerwerks hauptsächlich von den Randbedingungen des Erdreiches ab

und der Wassergehalt des Mauerwerks stellt sich dementsprechend ein. In den meisten Fällen ist bei solchen Kellermauerwerken auch kein homogenes Mauerwerk vorhanden und es muss von einem Materialkonglomerat ausgegangen werden, das meist aus Kostengründen nicht eindeutig bestimmbar ist. Einflüsse wie Salz und Alterung haben auf die hygrothermischen Simulationen großen Einfluss. Für diese Parameter gibt es für die Interpretation von instationären, hygrothermischen Simulationen jedoch noch keine allgemein anerkannte, genormten Grenzwerte. Das WTA-Merkblatt 6-5-14 schreibt hier Bewertungskriterien vor, dass der Sättigungsgrad $\leq 30\%$ bei nicht frostbeständige Materialien eingehalten werden muss. Es sind jedoch höhere Sättigungsgrade zulässig, sofern die relative Luftfeuchte innerhalb der Materialschicht $< 95\%$ ist. Gips haltige Untergründe müssen eine Gleichgewichtsfeuchte $\leq 95\%$ relative Feuchte aufweisen.

Für den Ausgangszustand in den Teilbereichen B und C wurden keine vorhandenen Bauteilfeuchten angenommen. Die Bauteile wurden auf eine Dauer von zehn Jahre betrachtet, wobei sich der eingeschwungene Zustand für den Teilbereich B nach ca. drei und für den Teilbereich C nach ca. fünf Jahren einstellte.

Das Simulationsprogramm DELPHIN verwendet zur Analyse der Schimmelpilzbildung das Viitanen-Modell (VTT-model), wobei mittels Eingabe von Stundenwerten der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit einer Oberfläche ein sechsstufiger Schimmelindex die Intensität des Bewuchses ausgibt. Der Index 0 sagt kein Wachstum voraus, der Index 3 ein Wachstum das mit freiem Auge sichtbar ist und auch neue Sporen bildet und beim Index 6 ist von einer vollständigen Bedeckung der Oberfläche auszugehen. (Viitanen H., 1991)

ERGEBNISSE

Bauteilaufbauten (1D Betrachtungen)

Auf Grund der Vielzahl der Varianten und Ergebnisse wird nur eine Auswahl, der Erkenntnisse wiedergegeben.

Für die Bestandsvarianten zeigte sich, dass keine relevanten Unterschiede für die Temperatur, relative Luftfeuchte oder den

Wassergehalt an der Mauerwerksinnenseite entstanden. In der Mauerwerksmitte ergab die Modellierung mit Fugen ca. 1°C höhere Minimaltemperaturen in der Fuge und im Ziegel und einen ca. 4,4 % höheren Wassergehalt in der Fuge gegenüber der homogenen Mauerwerksmodellierung. Für die Sanierungsvarianten waren die Unterschiede noch geringer, da die Innendämmungen die Verhältnisse im Mauerwerkinneren angleichen. Lediglich in der Fuge wurde ein ca. 4,7 % höherer Wassergehalt festgestellt. Die Bauteilaufbauten mit den Randbedingungen des Untergeschoßes ergaben, dass sich das Mauerwerk bis 92 % sättigt. Auf Grund dieser Tatsache sind keine Innendämmmaßnahmen ohne flankierende Maßnahmen, wie eine Drainagierung oder Bauteilabdichtungen (vgl. ÖNORM B 3355), anzudenken. Für die weiteren Ausführungen bezüglich der tatsächlichen Kellersituation und der zugehörigen Sanierungsmaßnahmen siehe Abschnitt Keller (Teilbereich B). Die Ergebnisse der Erdgeschoßsimulationen zeigten, dass der Sättigungsbereich des Außenputzes in keiner Variante über 15 % stieg, blieb also unter den 30 % lt. WTA-Merkblatt 6-5-14. Die Simulationen des Erdgeschoßes ergaben weder im Mauerwerk noch in der Innendämmungskonstruktion maßgebliche überhygroskopische Feuchten. Für die Innenoberfläche konnte durch die Simulationen keine Schimmelgefährdung im Erdgeschoß vorhergesagt werden, für das Untergeschoß wurde jedoch für die Bestandskonstruktionen der Index 6 erreicht, also bis zur 100 % bedeckte Oberfläche. Für die 2D Simulationen wurden die Fugen daher nicht modelliert.

Keller (Teilbereich B)

Zeigt die Veränderung des Wärmeübergangswiderstandes im Außenbereich bei einer Erhöhung von $R_{se} = 0,04$ auf $0,06 \text{ m}^2\text{K/W}$ keine relevanten Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse, bewirkt im Innenraum eine Verringerung von $R_{si} = 0,25$ auf $0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$ eine erhöhte Oberflächentemperatur von bis zu $1,44^{\circ}\text{C}$ und eine verringerte Feuchtigkeit an der Grenzfläche um bis zu 11,5 %. (Kautsch, 2016) In Anlehnung an die geltenden Normen und Richtlinien und auf Grund der Tatsache, dass auf der „sicheren Seite“ gerechnet werden sollte wurden die Werte, wie in Abbildung 4 und in Abbildung 5

dargestellt, verwendet. Die unterschiedlichen Wasserdampfübergangswiderstände aus den Normen zeigten in den Simulationen keine entscheidenden Auswirkungen auf die Ergebnisse. Zur Anwendung kam ein gemittelter Wasserdampfübergangskoeffizient von $3 \cdot 10^{-8} \text{ s/m}$. Das erdberührte Mauerwerk mit einer Gesamtdicke von 65 cm zeigt in den Simulationen einen sehr hohen Sättigungsgrad bis ca. 75 % für den äußeren und bis zu ca. 70 % für den inneren Grenzbereich der erdberührten Außenmauer. An der Innenoberfläche wird ein Schimmelpilzwachstum mit Index 3 bis 4 prognostiziert, also setzt neue Sporenbildung und Schimmelpilzwachstum ein, das auch mit freiem Auge sichtbar ist. Dies spiegelt die Realität wieder und starke Schädigungen am Gewölbe, am Mauerwerk sowie am Fußbodenaufbau sind eingetreten. Um dem entgegenzuwirken wurde der Keller nicht mehr genutzt und eine permanente Durchlüftung (halb offenstehende Fenster) des Raumes findet statt. Somit wird das Innenklima stark vom Außenklima beeinflusst und die Feuchtigkeit bzw. die Schimmelsporen werden abtransportiert. Dieses Sanierungskonzept ist natürlich grundsätzlich nicht zu empfehlen, da die Ursache des feuchten Mauerwerks nicht behoben wurde. Aber der Eigentümer hat kein Interesse an einer fachmännischen Sanierung bzw. an einer Kellernutzung.

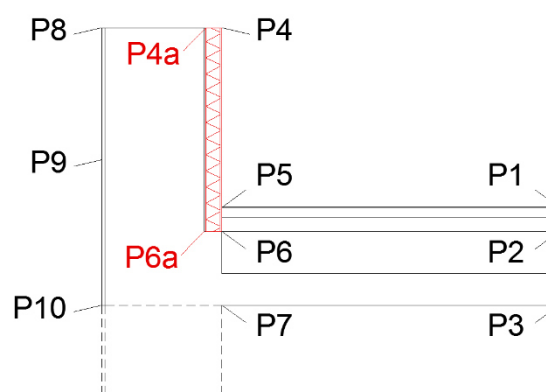


Abbildung 6 Punktanordnung für die Auswertungen

Wohnraum (Teilbereich C)

Die Punkte P4, P5 und P6 sind bei der Simulation für den Bestand am bestehenden Innenputz situiert. Es konnte in keinem der maßgeblichen Punkte eine Schimmelbildung prognostiziert werden.

Der Sättigungsgrad im Außenputz ist für die Bestandsvariante und die Sanierungsvarianten praktisch gleich hoch. Im Mittel beträgt er 6 %, aber das Maximum liegt bei 46 %, also über den 30 % lt. WTA-Merkblatt 6-5-14.

Betrachtet man dieses Maximum jedoch genau und legt die Oberflächentemperatur hinzu (siehe Abbildung 7), dann erkennt man, dass der hohe Sättigungsgrad innerhalb nur eines Tages auf ca. 15 % abgebaut wird.

Die Temperatur des Außenputzes beträgt zum Zeitpunkt des Sättigungsmaximums ca. 10°C, also besteht keine Zerstörungsgefahr durch Frost. Außerdem ist anzumerken, dass im WTA-Merkblatt 6-5-14 darauf hingewiesen wird, dass ein Sicherheitsfaktor von 2 bezogen auf die kritischen Sättigungsgrade zu Grunde liegt.

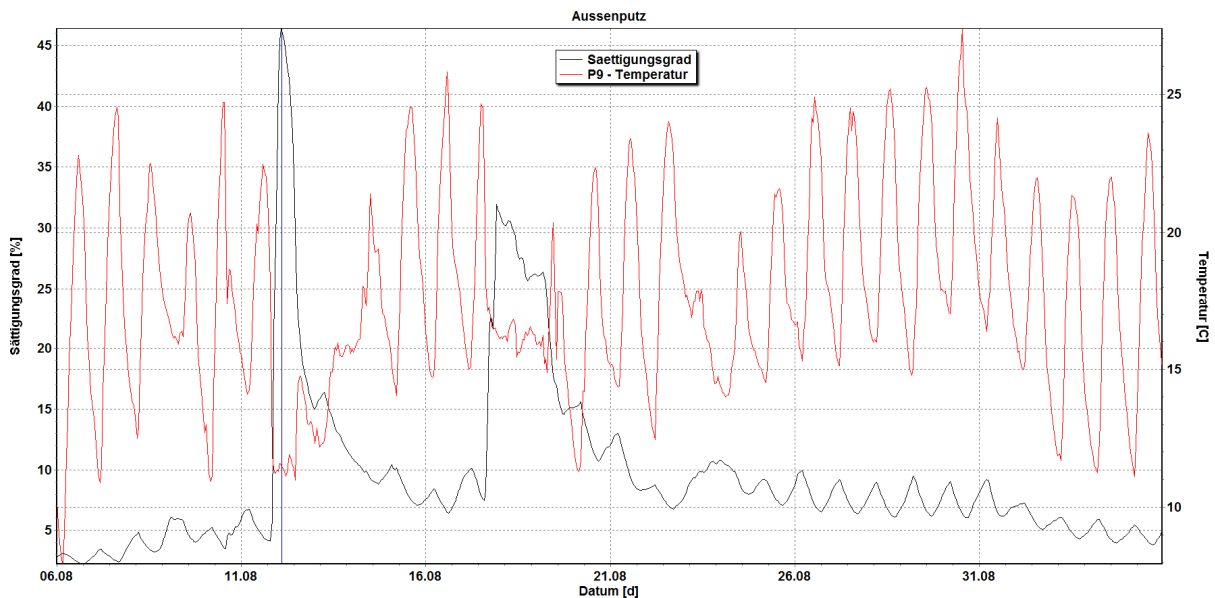


Abbildung 7 Sättigungsgrad und Oberflächentemperatur des Außenputzes am maßgeblichen Tag

Der Tag mit den größten Auswirkungen auf den Feuchtegehalt der Bestandskonstruktion ist der 17. März. In Abbildung 8 ist dargestellt, wie die Feuchteentwicklung in m^3/m^3 an diesem Tag in der Bestandskonstruktion aussieht.

Ausführung mit Multipor den größten Feuchtegehalt im maßgeblichen Punkt 5 aufweist, daher wird an dieser Stelle ein Vergleich der Bestandskonstruktion mit der Sanierungsvariante mit Multipor vorgenommen.

Vergleicht man die Sanierungsvarianten untereinander, dann zeigt sich, dass die

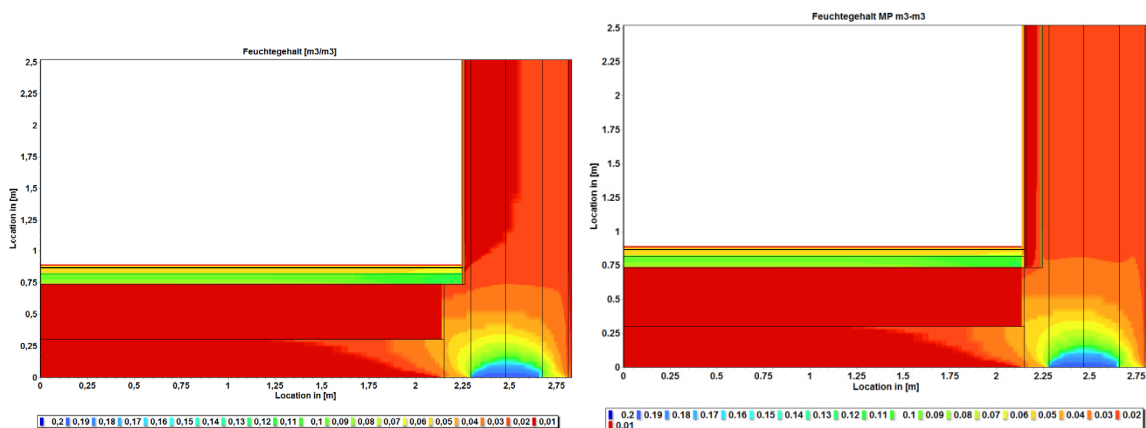


Abbildung 8 Vergleich des Feuchtegehalts [m^3/m^3] der Bestandskonstruktion (links) und der Sanierungsvariante mit Multipor

Es ist deutlich zu erkennen, dass durch die Innendämmung die Temperatur im Mauerwerk gesenkt wird, somit die Austrocknung schlechter stattfindet und eine Erhöhung des Feuchtegehalts die Folge ist. Außerdem sieht man den Einfluss der aufsteigenden Feuchtigkeit vom Sockel, der zwar in das Außenmauerwerk des Erdgeschoßes hineinreicht, jedoch für die Innendämmung keine maßgeblichen Auswirkungen mehr hat. Die mittlere Temperatur am 17. März beträgt im Punkt 5 für die Bestandskonstruktion 15,6°C und für die Sanierungsvariante 18,1°C. Im Jahresmittel beträgt die Temperatur vom maßgeblichen Punkt des Bestandes 17,4°C und jene der Sanierung 19,2°C. Die Temperaturunterschiede sind in den Wintermonaten (Differenz ~ 2°C) größer als in den Sommermonaten (Differenz ~ 1°C).

SCHLUSSFOLGERUNG

Die umfangreichen Randparameter von erdberührten bzw. erdnahen Innendämmungen erfordern einen enormen Aufwand um instationäre, hygrothermische Simulationen realitätsnah durchführen zu können. Ohne Messungen am Bauwerk ist die Erzielung eines realistischen Ergebnisses ein Glücksspiel. Vier verschiedene Klimabedingungen von Außenklima, Innenklima Wohnbereich, Kellerklima, bis zum Erdreich liefern eine Fülle an möglichen Fehlerquellen.

Relevante Unterschiede zwischen einer Modellierung einer homogenen Außenwand und einer mit Fugen zeigten sich bei hohen Sättigungsgraden im Mauerwerk, jedoch waren diese für das Untergeschoß nicht von Belang, da die Sanierung unter den gegebenen Umständen nicht möglich war. Diese Modellierung hätte bei Sichtmauerwerk viel weitreichendere Auswirkungen. Die Modellierung eines umfassenden, erdberührten 2D Details mit der Abbildung der Fugen im Mauerwerk ist aus heutiger Sicht kaum möglich.

Der Einfluss des Erdreiches bei nicht abgedichteten Wohnhäusern wird umso größer, je feuchteempfindlicher die verbauten Materialien sind und umso näher der Wohnbereich dem Erdreich ist. Die Notwendigkeit einer Innendämmung ist meist bei Gründerzeithäusern, ohne Abdichtungen gegeben. Zerstörerische Prüfungen sind in den wenigsten Fällen erwünscht und haben bei

diesen alten Mauerwerken auf Grund der Inhomogenität nicht die gleiche Aussagekraft wie bei jüngeren Gebäuden.

Einflüsse wie Salzgehalt und Alterung der Baustoffe haben auf die hygrothermischen Simulationen großen Einfluss. Für diese Parameter gibt es für die Interpretation von instationären, hygrothermischen Simulationen jedoch noch keine allgemein anerkannte, genormten Grenzwerte.

Durch die rasche Fortschreitung von immer leistungsfähigeren Rechnern, wird die Gesamtsimulation des dargestellten Umfangs eines Sockelbereiches samt Erdreich, Keller, Wohnraum und Außenklima möglich werden. Das erhöht nicht nur die Geschwindigkeit der Simulationen, sondern auch die Genauigkeit, da thermische und hygrische Transportprozesse in jede Richtung ablaufen können und dies bei einer Unterteilung eines Gesamtbereiches eingeschränkt wird.

LITERATUR

- <http://www.bauklimatik-dresden.de/delphin/index.php>
- Kautsch, P. 2016. bauphysiktagung2016, Tagungsband Graz. Seite 123-137.
- ÖNORM B 3355 Trockenlegung von feuchtem Mauerwerk - Bauwerksdiagnose, Planungsgrundlagen, Ausführungen und Überwachung. 2017-03-01
- ÖNORM EN ISO 6946 Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren. 2008-04-01
- ÖNORM EN ISO 10211 Wärmebrücken im Hochbau - Wärmeströme und Oberflächentemperaturen - Detaillierte Berechnungen. 2008-04-01
- Viitanen H., Ritschkoff A. 1991. Mould growth in pine and spruce sapwood in relation to air humidity and temperature.

KONZEPTE ZUR REGELUNG EINER ADAPTIVEN VERGLASUNG

M. Husser¹, W. Haase¹ und W. Sobek^{1,2}

¹Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart, Deutschland

²Werner Sobek Group GmbH, Stuttgart, Deutschland

KURZFASSUNG

Von den Autoren wurde ein schaltbares Element auf Flüssigkristallbasis in eine Fassadenverglasung (TN-Verglasung) integriert. Für die Verglasung wurden verschiedene Ansteuerungsstrategien entwickelt und sowohl simulativ als auch messtechnisch in einem Fassadentestgebäude getestet. Die Ansteuerung der Verglasung kann dabei sowohl über eine autonome Regelung als auch über eine Interaktion mit dem Nutzer erfolgen. In Verbindung mit der Sensorik zur Erfassung der Nutzerposition und einer effektiven Regelungsstrategie können mit der TN-Fassade eine Komforterrhöhung für den Nutzer und eine Erweiterung der Funktionalität der Gebäudehülle erreicht werden. Im vorliegenden Beitrag werden die getesteten autonomen Regelungsstrategien und ausgewählte Ergebnisse der numerischen Simulationen und der messtechnischen Evaluierung vorgestellt.

EINLEITUNG

Die bisher bekannten Gebäudehüllen besitzen üblicherweise konstante physikalische Eigenschaften, wodurch sie auf Veränderungen der Außen- und Innenraumsituation nicht oder nur sehr eingeschränkt reagieren können. Eine Möglichkeit, dem Problem der fehlenden Flexibilität entgegenzuwirken, ist die Adaptivität der Fassade. Diese kann mithilfe des von den Autoren entwickelten schaltbaren Verglasungssystems auf der Basis von Flüssigkristallen erzielt werden. Die verwendete Technologie basiert auf der Adaptation der in der Bildschirmtechnik etablierten verdrillt nematischen Flüssigkristallzellen (twisted nematic / TN-Zellen). Mit der Integration dieser Zellen in eine Isolierverglasung wird die Anpassungsfähigkeit der Verglasung an Außen- und Innenbedingungen sowie die Fähigkeit zur

Verschattungsregelung, zur Optimierung der Tageslichtsituation und zur Kontrolle des Energieeintrags ins Gebäude erreicht. Dabei ist im Gegensatz zu allen bisherigen vergleichbaren Systemen eine Strukturierung in einzeln ansteuerbare und dimmbare Pixel umgesetzt, die dem Gebäudenutzer neuartige Möglichkeiten einer individualisierten Fassadengestaltung zur Verfügung stellen.

TN-Technologie

Die Hauptkomponente einer TN-Zelle ist eine wenige Mikrometer dicke Schicht aus nematischem Flüssigkristall, die zwischen zwei Glassubstraten eingeschlossen ist (Haase 2004; Chen 2011). Durch das Anlegen einer geringen Spannung (< 3 V) kann der Licht- und Energiedurchgang durch die Zelle verändert werden. Hierfür sind folgende weitere Funktionsschichten notwendig: elektrisch leitfähige Schichten (transparente Elektroden) dienen dem Aufbau eines elektrischen Feldes, Orientierungsschichten dienen zur Kontrolle der Ausrichtung der Flüssigkristallmoleküle, zueinander um 90° gedrehte Polarisatoren ermöglichen eine Polarisation des einfallenden Lichts. Die gesamte schaltbare Einheit ist mit 2,2 mm sehr dünn. Der Aufbau einer TN-Zelle ist in Abbildung 1 dargestellt.

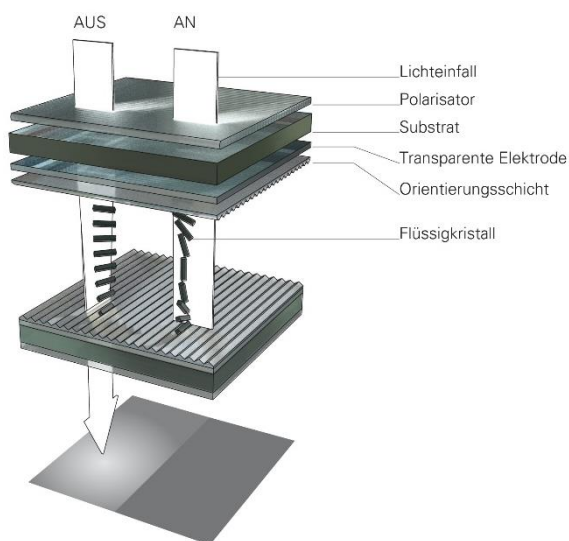


Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer TN-Zelle im nicht angesteuerten Zustand (links) und angesteuerten Zustand (rechts).

Beim Auftreffen des unpolarisierten Lichts durch die erste Polarisatorschicht wird lediglich eine Schwingungsrichtung durchgelassen. In der Flüssigkristallschicht erfolgt eine Drehung des Direktors des E-Felds um 90° , sodass das Licht den zweiten Polarisator passieren kann und die Zelle durchsichtig erscheint. Überschreitet die an die Zelle angelegte Spannung einen bestimmten Wert, so werden die Direktoren im Flüssigkristall parallel zum E-Feld ausgerichtet und das Licht weitestgehend absorbiert. Die Zelle erscheint dunkel (Haase et al. 2016). Dieser Schaltvorgang dauert wenige Millisekunden, die Leistungsaufnahme Zelle liegt bei weniger als einem Watt/m^2 .

Mittels Laserstrukturierung oder photolithographischer Verfahren ist es möglich, eine TN-Zelle, ähnlich wie bei LCD-Bildschirmen, in einzelne Pixel (Bildelemente) zu unterteilen. Jeder Pixel kann autonom angesteuert werden, sodass eine partielle Fassadenverdunkelung möglich wird. In Kooperation mit der Firma BMG MIS GmbH wurden von den Autoren Muster der substrukturierten schaltbaren Zellen (TN-Module, s. Abbildung 2) gefertigt und in einen Isolierglasaufbau integriert (Haase 2017; Husser et al. 2018). Bedingt durch die Produktionsausstattung betrug die maximale herstellbare Zellengröße ca. $310 \text{ mm} \times 275 \text{ mm}$. Die Herstellung größerer schaltbarer Elemente ist jedoch bei entsprechender Ausstattung ebenfalls möglich.

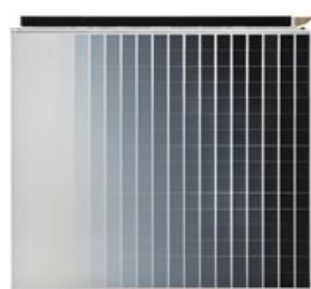


Abbildung 2: Durchlichtaufnahme eines TN-Moduls mit Graustufenschaltung. Modulabmessungen: $310 \text{ mm} \times 275 \text{ mm}$. Phot.: G. Metzger.

Testumgebung

Um schaltbare Verglasungen unter realen Bedingungen testen zu können, wurde von den Autoren ein Fassadentestgebäude errichtet (s. Abbildung 3). Das in Holzrahmenbauweise ausgeführte Gebäude besteht aus vier Testräumen mit den Abmessungen $B \times T \times H = 2,0 \text{ m} \times 4,2 \text{ m} \times 2,7 \text{ m}$ und einer Technikzone. Jeder Testraum ist mit Sensorik zum Raummonitoring ausgestattet. Die Südfassade ist für die Aufnahme geschosshoher Verglasungsmuster vorgesehen. Im Testraum 0.1 befindet sich die behandelte TN-Verglasung.



Abbildung 3: Fassadentestgebäude. Südfassade. Phot.: G. Metzger.

Aufgrund der geringen Größe der einzelnen Module wurden diese innerhalb der Isolierverglasung in 6 Spalten und 9 Zeilen angeordnet. Mittels Kunststoffhalter sind die Module auf der nach innen gerichteten Seite der Außenscheibe einer Zweifachverglasung fixiert.

Numerische Simulationen

Das Testgebäude mit der integrierten schaltbaren Verglasung wurde numerisch modelliert, um den Einfluss der Verglasungsadaptivität auf den Raumenergiebedarf und den Innenraumkomfort evaluieren zu können. Für die Simulationen kam die Software TRNSYS 18 zur Anwendung, nachdem das Gebäude in Sketchup 2016 und die Verglasungen in Window 7 und Optics 6 modelliert wurden. Die Adaptivität der TN-Verglasung wurde mittels einer variablen Verglasungs-ID in TRNBuild abgebildet. Ausgewählte lichttechnische Analysen erfolgten darüber hinaus mit Daysim 3.1.

Als Nutzeranwesenheitszeiten wurden Büroarbeitszeiten von Montag bis Freitag zwischen 8:00 Uhr und 17:00 Uhr angenommen. Die Simulationen erfolgten für vier verschiedene Standorte. Der Standort Stuttgart (48° 46' N, 9° 10' O) ist für das Übergangsklima in Südwestdeutschland repräsentativ. In diesem Klima zeigt ein adaptives Verglasungssystem sein größtes Potenzial. Die Variabilität der klimatischen Bedingungen bedingt eine Anpassung der Verglasungseigenschaften. Während der Kühlsaison kann eine geringe Transmission der Verglasung dazu beitragen, die solaren Gewinne zu minimieren. In der Heizsaison dagegen sind hohe solare Gewinne und hohe Lichttransmissionswerte erwünscht. Darüber hinaus ist vor allem aufgrund der niedrigen Sonnenhöhe im Winter ein effektiver Blendschutz notwendig. Zusätzlich zu Stuttgart wurde der Testraum an drei weiteren Standorten simuliert: Helsinki (60° 10' N, 24° 56' O) in Finnland, Valencia (39° 29' N, 0° 2' W) in Spanien, und Accra (5° 03' N, 0° 13' W) in Ghana. Klimadaten für die ausgewählten Standorte wurden aus der EnergyPlus Wetterdatenbank (National Renewable Energy Laboratory) importiert.

Die TN-Verglasung wurde simulativ mit zwei konventionellen Referenzverglasungen verglichen, deren Aufbauten und Charakteristika in Abbildung 4 und Tabelle 1 dargestellt sind (Glasstärken und Breiten der Scheibenzwischenräume entsprachen jeweils der TN-Verglasung).

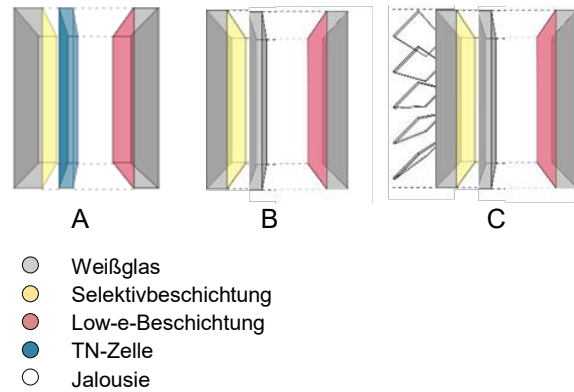


Abbildung 4:: Simulierte Verglasungsaufbauten (links jeweils Außenraum, rechts Innenraum)

Tabelle 1: Eigenschaften simulierter Verglasungen. A: TN-Verglasung im maximal abgedunkelten (on) und maximal aufgehellten (off) Zustand, B: Referenzverglasung ohne Jalousie, C: Referenzverglasung mit Jalousie, für Jalousie vollständig geschlossen (on) und Jalousie hochgefahren (off), jeweils mit Luftfüllung, berechnet mit Window 7, NFRC-Randbedingungen.

		A	B	C
Tvis [-]	on	0,03	-	0,00
	off	0,27	0,66	0,66
Tsol [-]	on	0,09	-	0,00
	off	0,14	0,34	0,34
Rvis [-]	on	0,09	-	0,70
	off	0,11	0,14	0,14
Rsol [-]	on	0,42	-	0,70
	off	0,43	0,43	0,43
g [-]	on	0,17	-	0,02
	off	0,21	0,37	0,37
U [W/m²]	on	1,3	-	1,0
	off	1,3	1,3	1,3

Regelungsstrategien der TN-Verglasung

Für die vorgestellte Verglasung wurde ein Konzept einer dynamischen Unterteilung vorgeschlagen, die eine Trennung der Sonnenschutzfunktion von der Blendschutzfunktion der Verglasung ermöglicht. Die gesamte Verglasungsfläche wurde demnach in zwei Bereiche unterteilt, die getrennt voneinander angesteuert werden können, um unterschiedliche Komfortanforderungen zu erfüllen (Husser et al. 2016). Der Blendschutzbereich ist so klein wie möglich und seine Position und Größe hängen von der Anzahl und der Position der Raumnutzer ab. In einem Einzelbüro mit einem fassadennahen Arbeitsplatz (Blickpunkt des Nutzers auf der Höhe von ca. 1,2 m, in ca. 1,2 m von der Fassade) wird eine Fassadenfläche von bis zu ca. 0,25 m² benötigt, um eine direkte Blendung durch die Sonnenscheibe zu verhindern. Nach einer Sonnenbahnberechnung

wird der Blendschutzbereich automatisch an der Schnittstelle zwischen der Sonnenposition und dem Blickpunkt des Nutzers platziert, wie in Abbildung 5 gezeigt. Die Implementierung der dynamischen Unterteilung der TN-Verglasung im Fassadenprüfstand ist in Abbildung 6 dargestellt.



Abbildung 5: Unterteilung der Verglasungsfläche in zwei Funktionsbereiche. Konzeptskizze.



Abbildung 6: Unterteilung der Verglasungsfläche in zwei Funktionsbereiche. Aufnahmen aus dem Innenraum des Fassadentestgebäudes im Tagesverlauf. Phot.: G. Metzger.

Im aktuellen Forschungsprojekt wird eine automatische Detektierung der Nutzeranzahl und -positionen entwickelt, nach der eine individuelle Blendschutzpositionierung möglich ist. Dank einer Nutzerschnittstelle kann der Nutzer die Ansteuerung nachträglich beeinflussen (z.B. über eine Gestensteuerung, s. Abbildung 7).

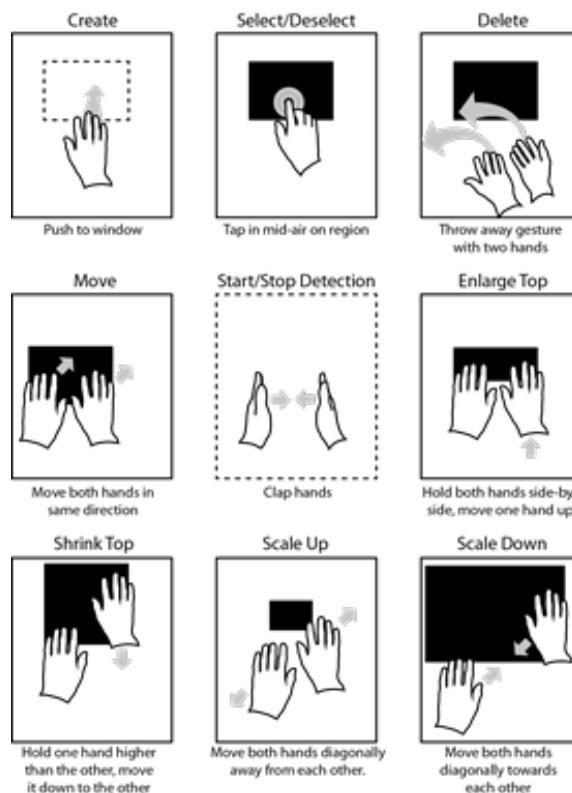


Abbildung 7: Veränderung der Größe- und Position des Blendschutzbereichs durch den Nutzer durch Gestensteuerung (Bader et al. 2018)

Die Ansteuerung des restlichen Verglasungsbereichs, des s.g. Tageslichtversorgungsbereichs, soll die Tageslichtversorgung des Raums gewährleisten und zur Verbesserung des thermischen Komforts für die Raumnutzer sowie zur Verringerung des Energiebedarfs zur Raumkonditionierung beitragen. Um diese Ziele zu erreichen, wurden von den Autoren verschiedene autonome Regelungsstrategien untersucht.

Im Rahmen der Strategien 1 und 2 wird der Tageslichtversorgungsbereich der Verglasung nach dem Parameter Innentemperatur angesteuert. Steigt die Raumtemperatur zwischen $T_{\min} = 20\text{ °C}$ und $T_{\max} = 26\text{ °C}$ während der Büroarbeitszeiten an, so wird die Verglasung stufenweise abgedunkelt, um die Temperaturerhöhung zu verlangsamen. Erreicht die Innentemperatur während der Arbeitszeiten 28 °C , wird das Kühlsystem aktiviert. Bei Temperaturen von weniger als 20 °C (während der Arbeitszeiten) bzw. 18 °C (außerhalb der Arbeitszeiten) wird die Heizung eingeschaltet. Die künstliche Beleuchtung wird nach Bedarf hinzugeschaltet, um eine ausreichende Helligkeit auf der Arbeitsfläche zu erreichen. Im Rahmen der Regelungsstrategie 2 wird ein zusätzlicher Parameter, die Beleuchtungsstärke, bei der Verglasungsregelung berücksichtigt, um

nicht nur einen thermischen, sondern auch einen möglichst hohen visuellen Komfort zu gewährleisten. Fällt die Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche unter einen Wert von 500 lx (DIN EN 12464-1), wird die temperaturbedingt eingestellte Transmission der Verglasung solange erhöht, bis entweder die geforderte Beleuchtungsstärke oder die maximale Verglasungstransmission erreicht ist.

Bei der Steuerungsstrategie 3 wird die Verglasung anhand der Parameter diffuse Bestrahlungsstärke auf die Fassadenoberfläche und Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche angesteuert. Da die Solarstrahlung insbesondere bei großflächig verglasten Fassaden den Hauptgrund für die sommerliche Überhitzung darstellt, kann eine sofortige Reaktion auf die Bestrahlungsstärke der Überhitzung vorbeugen (dieser Indikator wird häufig zur Ansteuerung von herkömmlichen Lamellensystemen verwendet (vgl. (Lichtmess 2008)). Ein oberer ($I_{max} = 400 \text{ W/m}^2$) und ein unterer Schwellenwert ($I_{min} = 150 \text{ W/m}^2$) der diffusen Bestrahlungsstärke wurden definiert (Fehringer 2015; Husser und Haase 2017). Liegt die Bestrahlungsstärke zwischen diesen beiden Schwellenwerten, wird die Verglasungstransmission stufenweise in Abhängigkeit von der Diffusstrahlung verändert. Wie bei der zuvor vorgestellten Strategie 2, wurde ein zusätzlicher Parameter, die Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche, berücksichtigt. Der zur Gewährleistung der minimalen Innenbeleuchtungsstärke von 500 lx notwendige Lichttransmissionswert der Verglasung wurde im Fall der Strategie 3 in Anlehnung an die Außenhelligkeit berechnet.

Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse der Raumenergiebedarfsanalysen für die vier Standorte: Stuttgart, Helsinki, Valencia und Accra sind in Abbildung 8 gegeben. Es wurde jeweils ein Testraum (s. Abbildung 3, Testraum 0.1) mit der in die Südfassade integrierten TN-Verglasung (A, angesteuert nach den Strategien 1, 2, 3), mit der Referenzverglasung B und der Referenzverglasung C mit außenliegendem Sonnenschutz simuliert. Die Sonnenschutzlamellen des Systems C wurden jeweils nach dem Parameter Bestrahlungsstärke auf die Fassade angesteuert (vollständig geschlossen bei einem Bestrahlungsstärkewert von $\geq 400 \text{ W/m}^2$ und wieder hochgefahren, sobald die Bestrahlungsstärke unter 150 W/m^2 fiel).

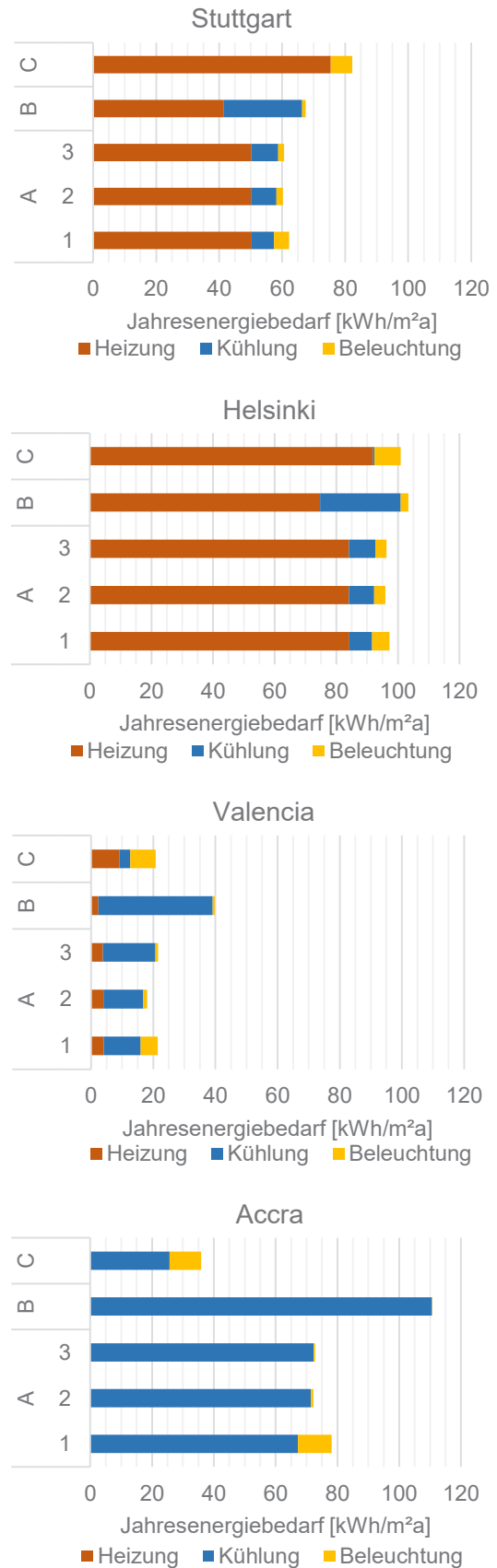


Abbildung 8: Ergebnisse der energetischen Simulationen des Testraums mit der TN-Verglasung (A, angesteuert nach Strategien 1, 2 und 3) und mit Referenzverglasungen B und C, an vier Standorten

Wie erwartet, übertrifft die TN-Verglasung A die Dreifachverglasung B ohne externen Sonnenschutz energetisch an allen untersuchten Standorten. Darüber hinaus ist die Verglasung A an fast allen Standorten konkurrenzfähig zur Referenzverglasung C mit einem konventionellen Sonnenschutz hinsichtlich des Gesamtenergiebedarfs. Dabei ist der besonders hohe Beleuchtungsenergiebedarf beim Einsatz der Verglasung C erkennbar, der auf eine sehr niedrige Tageslichtversorgung des Raums schließen lässt. Vergleichsweise geringe Tageslichtversorgung tritt auch bei der Regelungsstrategie 1 der TN-Verglasung auf. Da die Raumausleuchtung für den visuellen Komfort am Arbeitsplatz ausschlaggebend ist, wird der Einsatz von Regelungs- und Steuerungsstrategien empfohlen, die auf mindestens zwei Parametern basieren (Strategien 2 und 3). Der relativ geringe Unterschied der Energiebedarfe beim Einsatz der jeweiligen Strategien weist darauf hin, dass bereits einfache Strategien eine hohe Ausnutzung der Potentiale der schaltbaren Verglasung ermöglichen (weitere Untersuchungen der Autoren belegen diese Erkenntnisse). Dies ist mit dem relativ geringen g-Wert-Schalhub ($g_{\max} - g_{\min} = 0,04$, s. Tabelle 1) des Systems zu begründen. Wird im Verlauf weiterer Projektentwicklung ein größerer Schalhub im nicht sichtbaren Wellenlängenbereich des Solarspektrums erreicht, so können der Energiebedarf und die Raumtemperatur durch eine Regelungsstrategie zu einem höheren Grad beeinflusst werden. Am Beispiel einer auf dem Markt befindlichen, bläulichen elektrochromen Verglasung auf der Basis von Wolframtrioxid (Abbildung 3, Testraum 1.1), mit einem deutlich höheren g-Wert-Schalhub ($g_{\max} = 0,33$, $g_{\min} = 0,07$, $g_{\max} - g_{\min} = 0,26$ bei $U = 1,3 \text{ W/m}^2$) (International Glazing Database 2011; Products | SageGlass 2016) wird gezeigt, dass durch die entsprechende Schaltung sowohl der Heizenergie als auch der Kühlenergiebedarf reduziert werden können. Ein Vergleich der Raumenergiebedarfe für die TN-Verglasung A und die elektrochrome Verglasung EC, jeweils angesteuert nach der Strategie 3, ist in Abbildung 9 gegeben. Der sich für die elektrochrome Verglasung ergebende sehr hohe Beleuchtungsenergiebedarf resultiert aus niedrigen Lichttransmissionswerten bei allen verfügbaren Abdunklungszuständen dieser Verglasung (Nur im Zustand maximaler Transparenz ist ein hoher Lichttransmissionswert von 0,56 gegeben. Sobald die Tönung aktiviert wird, beträgt

er 0,01 – 0,16) (berechnet mit Window 7 (International Glazing Database 2011)).

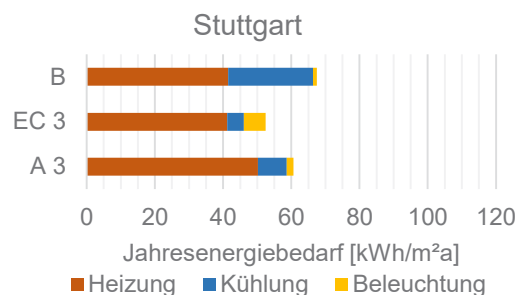


Abbildung 9: Vergleich der Jahresenergiebedarfe des Testraums mit der TN-Verglasung (A), einer kommerziell verfügbaren elektrochromen Verglasung EC (jeweils angesteuert nach Strategie 3) und der Referenzverglasung B in Stuttgart

Der entscheidende Vorteil der vorgestellten TN-Verglasung gründet somit in der Beeinflussung der Raumhelligkeit und der Blendungserscheinungen. Eine Jahresanalyse der Tageslichtversorgung auf der Basis der durchgeführten Simulationen wird anhand der Indizes Tageslichtautonomie (DA) und nutzbare Tageslichtbeleuchtungsstärke (UDI) beispielhaft für Stuttgart in Abbildung 10 aufgezeigt.

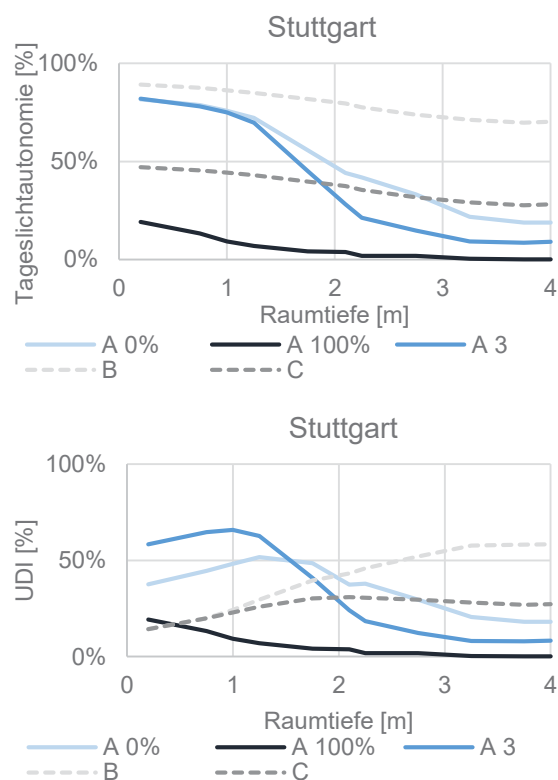


Abbildung 10: Ergebnisse der lichttechnischen Analysen des Testraums mit der TN-Verglasung (A) im Zustand minimaler Abdunklung (A 0%), im Zustand maximaler Abdunklung (A 100%) und angesteuert nach der Strategie 3 (A 3) sowie mit Referenzverglasungen B und C. Oben: Tageslichtautonomie, unten: nutzbare Tageslichtbeleuchtungsstärke.

Mit der Tageslichtautonomie wird der prozentuelle Anteil der Arbeitsstunden im Jahr ausgedrückt, an dem die geforderte Mindestbeleuchtungsstärke (hier $E \geq 500 \text{ lx}$) (DIN EN 12464-1) an einem Punkt in der Raumtiefe ausschließlich durch Tageslicht gewährleistet werden kann. Die nutzbare Tageslichtbeleuchtungsstärke beschreibt den entsprechenden Anteil der Stunden, an den nicht nur die Mindestbeleuchtungsstärke erreicht ist, sondern auch zu hohe, für eventuelle Blendungseffekte verantwortliche Beleuchtungsstärken vermieden werden (hier $500 \text{ lx} \leq E \leq 2500 \text{ lx}$). Es ist erkennbar, dass die Ansteuerung der TN-Verglasung nach zwei Parametern (Bestrahlungsstärke und Beleuchtungsstärke) zu hohen Tageslichtautoniewerten in fassadennahem Raumbereichen führt, die geringfügig die Werte der Dreifachreferenzverglasung ohne Sonnenschutz unterschreiten. Darüber hinaus wird ab einer Raumtiefe von ca. 2,5 m der empfohlene Mindestwert der Tageslichtautonomie von 40 % (Rogers 2006) erreicht (bei der kommerziell verfügbaren elektrochromen Verglasung (Strategie 3, vollflächige Abdunklung) wird dieser Wert bereits ab der Raumtiefe von ca. 1,2 m nicht mehr erreicht). Am Beispiel der nutzbaren Tageslichtbeleuchtungsstärke UDI wird ersichtlich, dass die hohe Tageslichtversorgung der Referenzverglasung B mit einer Blendungsgefahr verbunden ist. Die mit einer TN-Verglasung erreichbaren Helligkeiten liegen (in fassadennahen Raumbereichen) an wesentlich mehreren Stunden im komfortablen Bereich $500 \text{ lx} - 2500 \text{ lx}$ als die der Referenzverglasungen.

Die Ergebnisse des Raummonitorings im Fassadentestgebäude in Stuttgart bestätigen den positiven Einfluss der entwickelten Regelungsstrategien auf die Raumausleuchtung. Am Beispiel sonniger Wintertage wird in Abbildung 11 die Helligkeitsverteilung in der Raumtiefe bei drei Schaltzuständen der TN-Verglasung dargestellt (am 07.12.2017 befand sich die Verglasung im Zustand maximaler Transmission, am 24.01.2018 im Zustand minimaler Transmission, am 02.02.2018 wurde sie nach der Strategie 3 angesteuert, wonach sie um 11:15 Uhr einem Lichttransmissionswert von 27 % erreichte). Da die Außenhelligkeitswerte an den analysierten Tagen nicht gleich waren, wurden zum Vergleich die jeweiligen Quotienten der Innenbeleuchtungsstärke zur Außenbeleuchtungsstärke („Tageslichtquotienten“) berechnet.

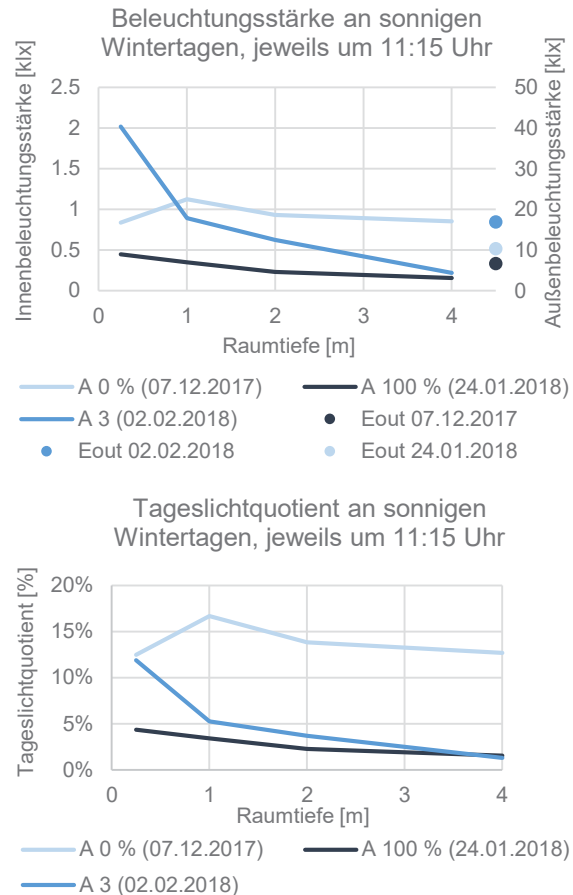


Abbildung 11: Messtechnische Erfassung der Beleuchtungsstärken an sonnigen Wintertagen, im Testraum mit der TN-Verglasung im Zustand minimaler Abdunklung (A 0 %), im Zustand maximaler Abdunklung (A 100 %) und angesteuert nach der Strategie 3 (A 3). Oben: Innen- und Außenbeleuchtungsstärke (Eout), unten: Tageslichtquotient.

Die Anwendung der Ansteuerungsstrategie 3 bei der TN-Verglasung führte zur erwünschten Erhöhung des Tageslichtquotienten (für die Arbeitsfläche empfohlener Mindestwert beträgt 2 % (ASR A 3.4 2014)) im Vergleich zur maximal abgedunkelten Verglasung und zur Einhaltung der Mindestbeleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche von 500 lx . Insbesondere durch die Analyse der Tageslichtquotienten wird die wirksame Kontrolle der Raumausleuchtung im Vergleich zu beiden Extremzuständen der Verglasung erkennbar.

Darüber hinaus wird durch die partielle Abdunklung der Verglasung eine Reduktion der Blendung erzielt. Eine mit Daysim 3.1 durchgeführte Berechnung der DGP-Werte (Daylight Glare Probability nach (Wienold und Christoffersen 2006)) zeigte je nach Standort eine Reduktion der störenden Blendung im Jahr durch die nach der Strategie 3 angesteuerte TN-Verglasung um 75 % - 100 % im Vergleich zur Referenzverglasung B. Ein beispielhafter Vergleich der simulierten

DGP-Werte für den wechselhaften Frühlingstag am 03.04. ist in Abbildung 12 dargestellt. Eine Weiterentwicklung des Modullayouts (Reduktion der nicht ansteuerbaren Zuleitungsbereiche zwischen den einzelnen Pixeln, s. Abbildung 2) soll das verbleibende Blendungsrisiko eliminieren.

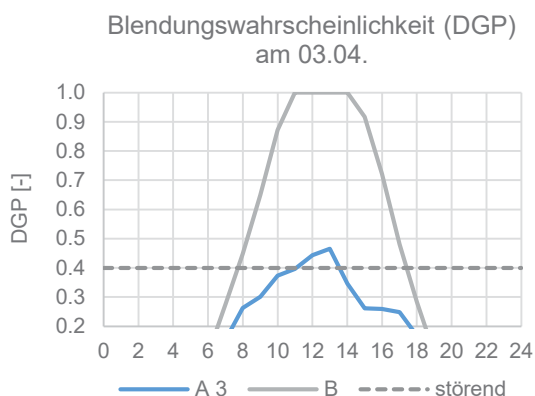


Abbildung 12: Blendungsanalyse für einen wechselhaften Frühlingstag in Stuttgart, für die nach der Strategie 3 angesteuerte TN-Verglasung (A 3) und die Referenzverglasung B, berechnet mit Daysim. Gestrichelt wurde die hohe Wahrscheinlichkeit störender Blendung nach (Wienold und Christoffersen 2006) aufgetragen.

ZUSAMMENFASSUNG

Mit den durchgeführten thermisch-energetischen und lichttechnischen Simulationen sowie den Messungen im Fassadentestgebäude konnte gezeigt werden, dass die vorgestellte flüssigkristallbasierte Verglasung ein hohes Potential besitzt, herkömmliche Sonnenschutzsysteme in Zukunft zu ersetzen. Energetisch betrachtet, ist sie unter den meisten Klimabedingungen konkurrenzfähig zu Verglasungen mit externen Sonnenschutzjalousien. Dabei ist im aktuellen Entwicklungsstadium der TN-Verglasung der erreichbare Schalthub beim g-Wert noch relativ gering im Vergleich zur möglichen Veränderung der Lichttransmission. Durch die hohe Variation der Lichtdurchlässigkeit kann der visuelle Nutzerkomfort besonders positiv beeinflusst werden.

Um die Potentiale des Systems auszuschöpfen, wurden verschiedene Ansteuerungsstrategien entwickelt und evaluiert. Die Verglasung kann zum einen autonom geregelt werden (auf der Basis mehrerer sensorisch erfasster Parameter), im Zusammenhang mit der künstlichen Beleuchtung und dem Heiz- und Kühlsystem. Zum anderen ist eine Interaktion der Raumnutzer mit der Verglasung möglich. Durch die geringe Umschaltdauer, die Flexibilität der Abdunklungsbereiche und den sehr geringen Leistungsbedarf im Betrieb kann

die Verglasung nicht nur als Sonnen- und Blendenschutz fungieren, sondern auch zur Darstellung von Bildern oder Texten dienen. Erste Studien zur Nutzerzufriedenheit (Bader et al. 2018) zeigen eine positive Resonanz der präsentierten Technologie bei den meisten Testpersonen. Dabei wird die Möglichkeit einer Interaktion mit dem Verglasungselement besonders positiv empfunden. Großflächige Verglasungen, die gleichzeitig zusätzliche Funktionen erfüllen können (z.B. Informationsanzeige) werden von den Befragten bevorzugt.

DANKSAGUNG

Die Forschungsergebnisse, die in diesem Artikel beschrieben werden, entstanden im Rahmen von einem vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung geförderten Forschungsprojekt „Adaptive Verglasungssysteme. Einsatzbereiche, energetische und tageslichttechnische Evaluierung, Regelungsstrategien“, Förderkennzeichen: SWD -10.08.18.7-12.35) und einem von der Baden-Württemberg-Stiftung geförderten Vorhaben („i³: intelligente, interaktive, integrative Fassadenverglasung für Sonnenschutzanwendungen“, Förderkennzeichen: NaBau-03 (i³)). Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung durch die Förderstellen. Des Weiteren danken die Autoren den Industriepartnern, insbesondere der Firma Rubner Haus AG - S.p.A. für die Errichtung des Testgebäudes, den Firmen Toshiba Klimasysteme Beijer Ref Deutschland GmbH, TWL-Technologie GmbH, Nimbus Group GmbH, Alcoa GmbH und Paul Bauder GmbH & Co. KG für die Zurverfügungstellung der Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung, Beleuchtung, Verglasungsrahmen und Dachabdichtung für das Testgebäude sowie den Firmen Okalux GmbH und BMG MIS GmbH für die Unterstützung mit Display- und Verglasungskomponenten.

LITERATUR

- ASR A 3.4 Technische Regeln für Arbeitsstätten – Beleuchtung (2014).
- Bader, P.; Voit, A.; Le, H.; Wozniak, P. W.; Henze, N.; Schmidt, A. (2018): WindowWall: Towards Adaptive Buildings with Interactive Windows as Ubiquitous Displays. In: ACM Transactions on Computer-Human Interaction, eingereicht.

- Chen, R. H. (2011): Liquid crystal displays. Fundamental physics and technology. Hoboken, N.J.: Wiley (Wiley SID series in display technology).
- DIN EN 12464-1: Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten - Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen (2011).
- Fehringer, A. (2015): Vergleichende Analyse unterschiedlicher Regelungsstrategien schaltbarer Verglasungen unter Berücksichtigung der Einflussparameter Strahlung und Temperatur. Universität Stuttgart.
- Haase, W. (2004): Adaptive Strahlungstransmission von Verglasungen mit Flüssigkristallen. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Haase, W. (2017): TN-Technologie für den Einsatz in Architekturverglasungen. Endbericht. Universität Stuttgart.
- Haase, W.; Husser, M.; Sobek, W. (2016): Potentiale strukturierter, schaltbarer Verglasungen. In: Bernhard Weller und Silke Tasche (Hg.): Glasbau 2016. Berlin: Ernst und Sohn.
- Husser, M.; Haase, W. (2017): Adaptive Verglasungssysteme. Einsatzbereiche, energetische und tageslichttechnische Evaluierung, Regelungsstrategien. Abschlussbericht. Hg. v. Fraunhofer IRB Verlag. Universität Stuttgart. Stuttgart (Forschungsinitiative Zukunft Bau).
- Husser, M.; Haase, W.; Bader, P.; Sobek, W.; Schmidt, A. (2018): i³ - intelligente, interaktive, integrative Fassadenverglasung für Sonnenschutzanwendungen. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben NaBau-3 bei der Baden-Württemberg Stiftung im Rahmen der Ausschreibung "Nachhaltiges Bauen". Universität Stuttgart.
- Husser, M.; Haase, W.; Hoß, P.; Sobek, W. (2016): New Possibilities of Sun and Glare Protection with a Structured Switchable Glazing. In: Challenging Glass 5. Ghent.
- International Glazing Database (2011), zuletzt aktualisiert am 11.11.2016.
- National Renewable Energy Laboratory: Weather Data. Online verfügbar unter <https://energyplus.net/weather>, zuletzt geprüft am 13.12.2017.
- Products | SageGlass (2016), zuletzt aktualisiert am 13.09.2016.
- Rogers, Z. (2006): Daylighting metric development using daylight autonomy calculations in the sensor placement optimization tool. Hg. v. Architectural Energy Corporation. Boulder, Colorado, USA.
- Wienold, J.; Christoffersen, J. (2006): Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. In: Energy and Buildings 38 (7), S. 743–757. DOI: 10.1016/j.enbuild.2006.03.017.

III. NUMERISCHE LÖSUNGSVERFAHREN, OPTIMIERUNG UND IMPLEMENTIERUNG

A COMPARISON OF MEASURED AND SIMULATED HYGRO-THERMAL PERFORMANCE INDICATORS' VALUES: THE CASE OF A RETROFITTED WALL CONSTRUCTION

S. Aien¹, M. Taheri², M. Schuss¹ and A. Mahdavi¹

¹Department of Building Physics and Building Ecology, TU Wien, Vienna, Austria

²arbnco Ltd., Glasgow, United Kingdom

ABSTRACT

The present contribution includes a case study regarding the reliability of a hygro-thermal simulation tool as applied to an existing wall construction. Measured data was used to define the model's initial conditions and to evaluate the validity of the simulation results. Efforts were made to study the impact of input assumptions pertaining to boundary conditions and component's geometry representation (one versus two-dimensional) on the simulation accuracy. The results displayed a noticeable improvement of the simulations' predictive potency by adjusting the input variables based on measurements. Moreover, a more detailed representation of the component's geometry contributed to more dependable simulation results.

INTRODUCTION

In recent years, many efforts were undertaken to improve the energy efficiency and performance of existing buildings. Building retrofit, with a major concern regarding the envelope performance, became widely common (Masera et al. 2017). However, minimizing the condensation and mold growth risk still represents a challenge in retrofit projects. The occurrence of moisture problems as a result of poor design and construction, or unexpected behavior of new building materials, can lead to unwanted consequences (Ibrahim et al. 2014).

Applying a thermal insulation layer is a common retrofit solution for old and historical building façades. Depending on the requirements to maintain the style and shape of the façades, this layer can be applied on the external or internal wall surface (Santamouris and Dascalaki 2002).

In this regard, new plaster solutions based on silica aerogels are an effective option in case of buildings whose original façade appearance needs to be preserved (Schuss et al. 2017). In order to predict the hygro-thermal performance of buildings and the condensation damage potential, software solutions for the computation of moisture transfer in building components have been developed (see, for instance, WUFI 2018). To increase the credibility of the simulation outcomes, calibration of the initial energy performance simulation models, assisted by monitored data, has been presented as a promising method (Taheri et al. 2013).

In this context, the present contribution entailed the results of a case study on the predictive performance of hygro-thermal simulation of an existing wall construction. A set of sensors was installed within different layers of the construction in the course of a previous research project. Thus, measured data was used to define the model's initial conditions and to evaluate the validity of the simulation results. Furthermore, the study explores the impact of input assumptions, i.e. boundary conditions, and layers' geometry modelling techniques (one versus two-dimensional), on the rate of accordance between the measured and simulated performance indicators' values. For this purpose, commercially available one and two-dimensional hygro-thermal simulation software were used. The results displayed that the predictive potency of the simulation model can considerably improve by adjusting the input variables based on measurements. Moreover, more dependable simulation results were achieved as a result of the more detailed representation of the component's geometry.

METHODOLOGY

The Building Model

The case study of the present contribution is an office area at TU Wien, Vienna, Austria. The old wall construction of the case study included three layers. For the purpose of refurbishments, a plaster system encompassing a highly-insulated Aerogel layer (i.e., Fixit 222) was applied on the existing construction (Fixit 2018). Moreover, a mineral-based undercoat stabilizer (i.e., Röfix 380) was sprayed on the aerogel plaster. This layer hardens the surface and gives it a better grip for the finishing layers (Fixit 2018, Schuss et al. 2017). Figures 1 and 2 present the external wall surface as well as a section of the layers after retrofit.

Building Monitoring

For the purpose of in-situ measurement of temperature and relative humidity levels, a set of sensors was installed within different layers of the construction. Figure 3 illustrates the position of the measured nodes within different layers of the construction (i.e., nodes 01, 02, 04, and 05). It should be noted that, in both building retrofit and sensor installation process, any change in the composition of the original layers was avoided, to the extent possible. Moreover, indoor and outdoor environmental conditions were monitored for the duration of the experiments, i.e., year 2015.



Figure 1: Tested façade, external surface after retrofit.

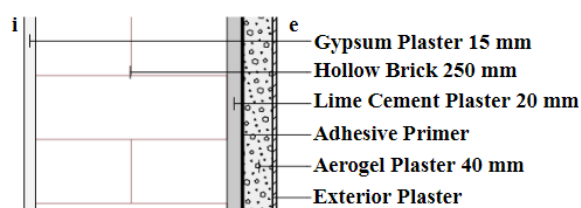


Figure 2: Tested façade, section of the layers.

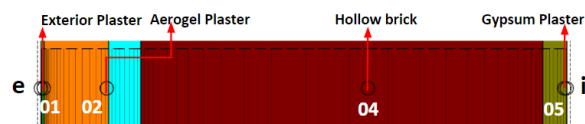


Figure 3: Position of measured nodes in different layers of construction (01, 02, 04, and 05)

Hygro-Thermal Performance Simulation

The computer programs WUFI Pro 5.3 and WUFI 2D 3.4 were used in this study (WUFI 2018). The tools enabled the simultaneous calculation of heat and moisture transport in one (WUFI PRO) and two (WUFI 2D) dimensional multi-layered building components. Generally, two-dimensional analyses are necessary for complicated geometries, thus WUFI 2D is a complement, and not an alternative, to WUFI Pro. The wall construction model was generated with the exact same input assumptions and program settings in both programs. Table 1 shows the general program settings. Table 2 demonstrates the thermal and hygro-thermal characteristics of the materials as used for the simulations. The properties of the materials were defined based on the best available information (e.g., material catalogs), measurements, and observations. In case of the missing information, the material data library of WUFI was used. The boundary conditions, i.e. outdoor and indoor environmental conditions, as well as the initial condition of each layer at the beginning of the simulations, were specified as well (Table 3).

Table 1: General setting and input of WUFI

Setting and inputs	Unit	Value
Orientation	Height	[m] > 20
	Inclination	[°] 90
Building height-driven rain coefficient	Rain load (According to the ASHRAE Standard 160)	- FD=1.5 FE=1
	Thermal resistance of exterior surface	[m ² ·k·W ⁻¹] 0.0588
Surface transfer coefficient	sd-value of exterior surface	[m] 0.0002
	Short wave radiation absorptivity	- 0.2
	Ground short wave reflectivity	- 0.2
	Adhering fraction of rain	- No absorption
	Thermal resistance of interior surface	[m ² ·k·W ⁻¹] 0.125
	sd-value of interior surface	[m] 0.1

Table 2: Input data pertain to the thermal and hygro-thermal properties of material

Properties	Unit	Röfix 380	Aerogel Brick	Interior plaster	
Layer thickness	[m]	0.002	0.04	0.25	0.02
Bulk density	[kg·m ⁻³]	1000	220	1560	1721
Porosity		0.24	0.92	0.38	0.31
Specific heat capacity	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	1000	1000	850	850
Thermal conductivity (dry material at 10°C)	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	0.47	0.029	0.4	0.2
Water vapor diffusion resistance factor	[-]	12	4	14.93	13
Reference water content (RH 80%)	[kg·m ⁻³]	45	6.6	11.80	1.77
Free water saturation (RH 100%)	[kg·m ⁻³]	210	213	368.9	264.2
Water absorption coefficient (A-value)	[kg·m ⁻² ·s ^{-0.5}]	0.02	0.0004	0.51	0.30
Moisture-dependent thermal conductivity supplement	[%·M ^{10%}]	8	0.5	8.51	3.23

Table 3: Initial conditions assumptions in the initial simulation model

Initial conditions	Unit	Exterior plaster	Aerogel Brick	Interior plaster	
Temperature	[°C]	-1.88	13.37	17.05	19.18
Relative humidity	[%]	72.09	31.64	41	22.37
Water content	[kg·m ⁻³]	31.679	0.796	2.120	0.408

SIMULATION SCENARIOS

Scenarios were designed based on alternative configurations of input data (i.e. initial condition, indoor and outdoor climate, layers' geometry) to explore the reliability of hygro-thermal simulation models and potential model calibrations. These configurations (labelled as Initial Model, Scenario 1, Scenario 2, Scenario 3, and Scenario 4) are listed in Table 4. Note that, general setting and material properties presented in the tables 1 and 2 were kept constant in all configurations.

Table 4: Simulation Scenarios

Scenarios	WUFI	Initial condition	Indoor condition	Outdoor climate
Initial model	PRO	Constant	EN15026	Map file
01	PRO	Measured	EN15026	Map file
02	PRO	Measured	Measured	Map file
03	PRO	Measured	Measured	Measured
04	2D	Measured	Measured	Measured

- Initial model: It represents the case when measurements are not available. Initial conditions in this model were the default values suggested by the program (temperature 20°C and relative humidity 80% for each layer). The outdoor climate was selected from the database of WUFI for the city of Vienna, Austria. Indoor climate was automatically derived in the program based on outdoor climate, by using standard EN15026 (EN15026 2007) recommended by WUFI.
- Scenario 1: Similar to the initial model, however in this case the initial condition for each layer was defined based on the measured data. In fact, the initial conditions were imported as a text file including measured values at the beginning of the run period.
- Scenario 2: Similar to Scenario 1, with the imported actual indoor environmental conditions, instead of the calculated indoor conditions.
- Scenario 3: An outdoor climate file was created based on the measured values from the locally installed weather station. Software Meteororm 7 was used for this purpose (Meteororm 2018).
- Scenario 4: To evaluate the impact of detailed modeling of the component's geometry on simulation predictions WUFI 2D was used in this Scenario instead of WUFI Pro (Figure 4). All other input assumptions were kept exactly the same as in Scenario 3.

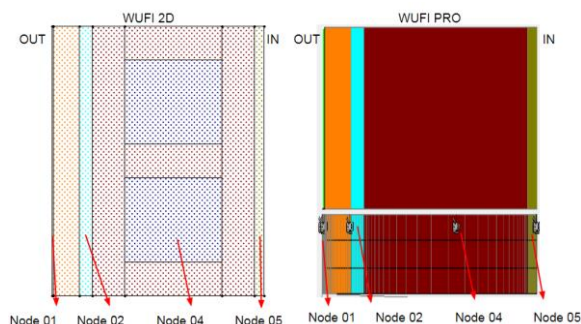


Figure 4: Layer's geometry modelled in 2D (left), and WUFI Pro (right).

EVALUATION METHOD

The simulation results of the hygro-thermal performance indicators, namely temperature and relative humidity, were compared with the corresponding measured values at each time step. For a better comparison, four statistical indicators were used. The first measure is the coefficient of variations of root mean squared deviations CV (RMSD), which aggregates time step errors over the runtime into a single dimensionless number. Moreover, the coefficient of determination R^2 was used, which describes the proportion of the variance in measured data explained by the model (Tahmasebi and Mahdavi 2013). In addition, the absolute and relative errors were calculated for each scenario in this study. Absolute error is the difference between the measured value and predicted value and relative error is the absolute error divided by the magnitude of the measured value.

RESULTS AND DISCUSSIONS

Figures 5 and 6 respectively present the distribution of relative humidity and temperature in each node in different simulation scenarios as well as measurements. Based on these results through the simulation scenarios, the relative humidity in nodes 2, 4, and 5, (aerogel, brick, and interior plaster, respectively) improved significantly and became closer to the measurements. The temperature results illustrate some improvement in all nodes.

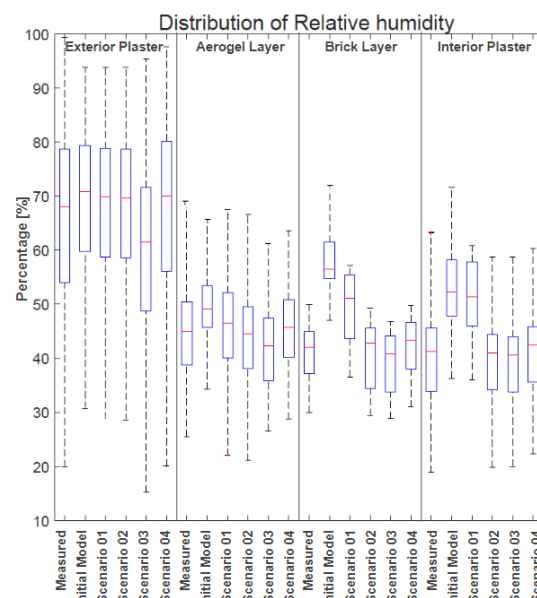


Figure 5: Distribution of measured and simulated relative humidity data for all scenarios and each node.

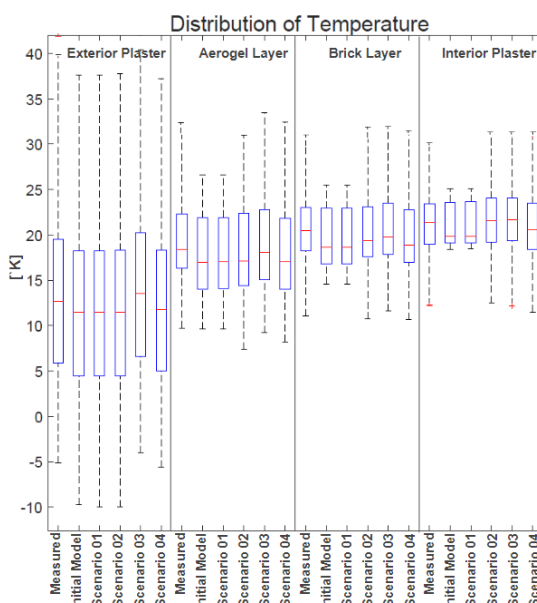


Figure 6: Distribution of measured and simulated temperature data for all scenarios and each node.

Figures 7 and 8 show the R^2 values of relative humidity and temperature of all scenarios in each node, respectively. The model in scenario 3 generated outputs with acceptable R^2 values, for both relative humidity (more than 0.8) and temperature (more than 0.94). There was a significant improvement after feeding in the actual indoor conditions (Scenario 2), in three layers of Aerogel, brick, and interior plaster. Moreover, feeding the local outdoor climate (Scenario 3) improved the result of relative humidity and temperature in the exterior plaster layer.

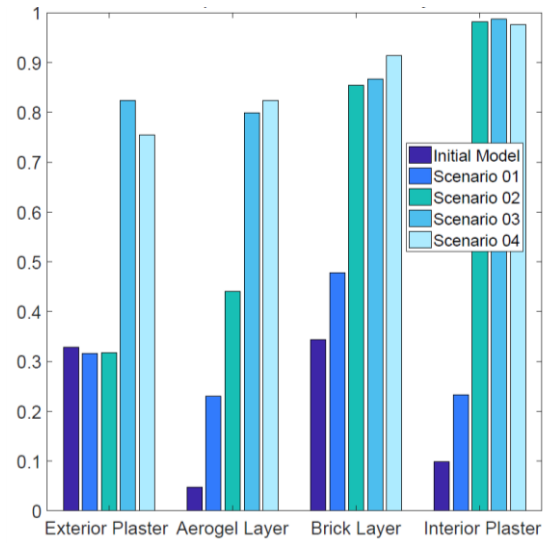


Figure 7: R^2 of relative humidity of all scenarios in each node.

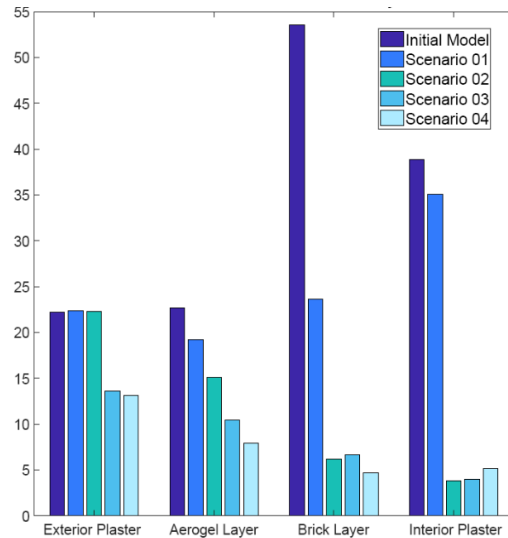


Figure 9: (CV) RMSD of relative humidity of all scenarios in each node.

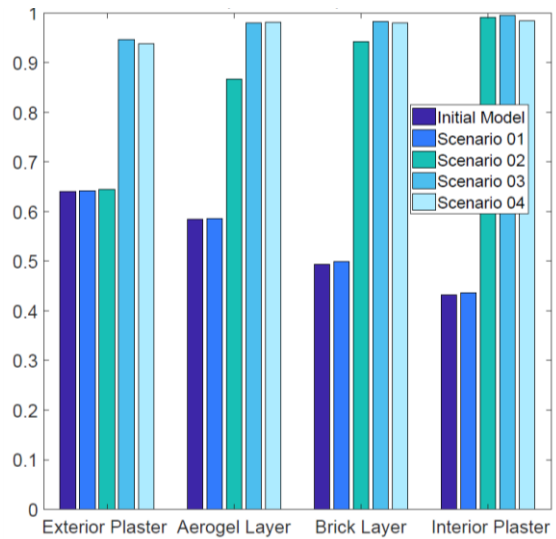


Figure 8: R^2 of temperature of all scenarios in each node.

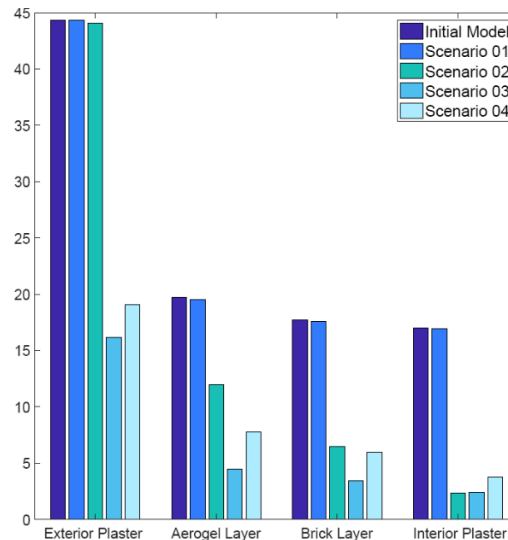


Figure 10: CV(RMSD) of temperature of all scenarios in each node.

Detailed modelling of the layer's geometry (Scenario 4) was slightly effective in improving R^2 values for relative humidity. However, temperature values appear not to be sensitive to detailed geometry modelling in our case.

Figures 9 and 10 illustrate the calculated CV (RMSD) for each node in the corresponding scenarios. The calculated errors are below 10% and 5°K for relative humidity and temperature, respectively, except in node 01, which shows higher corresponding errors (13% and 15°K).

The calculated absolute and relative errors (see, Figures 11 to 16) further confirm the above-mentioned results. Calculated absolute errors of less than 1°K for the temperature and 5% for the relative humidity show considerable improvements in all nodes (Figures 11 and 12). The rate of errors in exterior layer is slightly higher as compare to the other layers (i.e. 2°K and 8% for temperature and relative humidity, respectively).

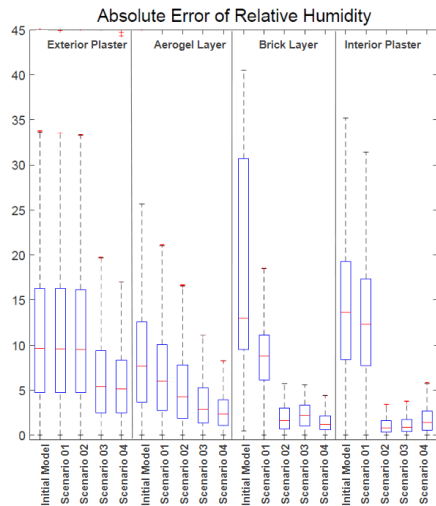


Figure 11: Absolute error of relative humidity [%] of all scenarios for each node.

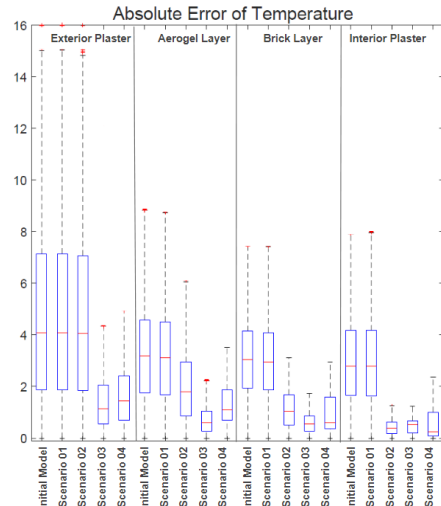


Figure 12: Absolute error of temperature [K] of all scenarios for each node.

A similar pattern of improvement was observed in relative errors. Figures 13 to 16 indicate the cumulative percentage of relative errors for relative humidity in all nodes. Note that, except for the interior plaster layer, Scenario 4 (modelled in WUFI 2D) has the minimum rate of relative error in all nodes. Scenario 4 especially

performs better in the Aerogel and brick layer. In case of the interior plaster layer, Scenarios 2 and 3 were more effective. As shown in Figure 17, detailed geometry modeling of hollow brick, namely two-dimensional modelling, improved the relative humidity predictions.

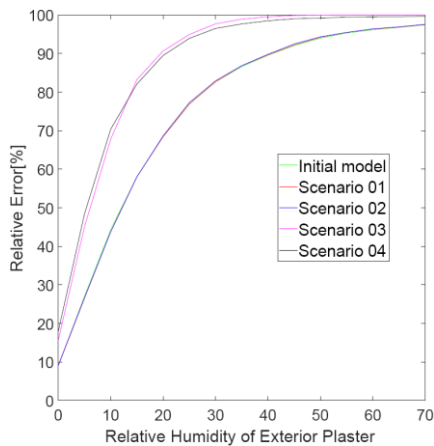


Figure 13: Relative error of relative humidity, exterior plaster.

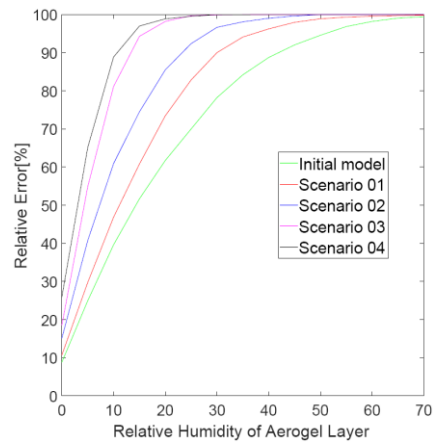


Figure 14: Relative error of relative humidity, Aerogel layer.

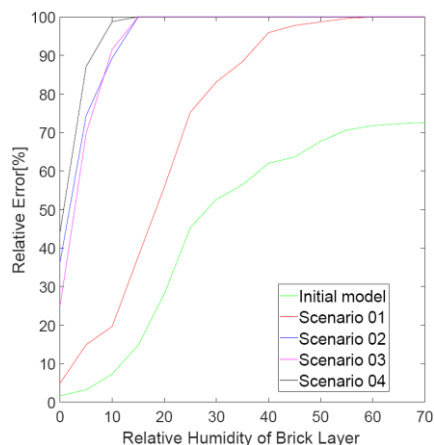


Figure 15: Relative error of relative humidity, brick layer.

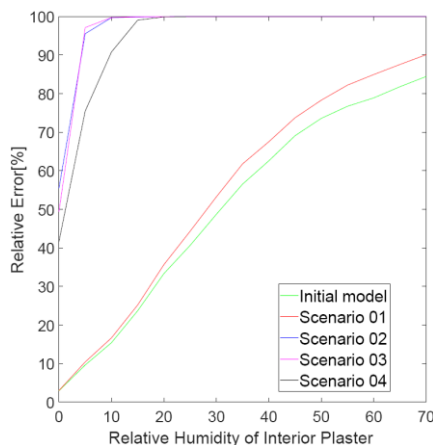


Figure 16: Relative error of relative humidity, interior plaster.

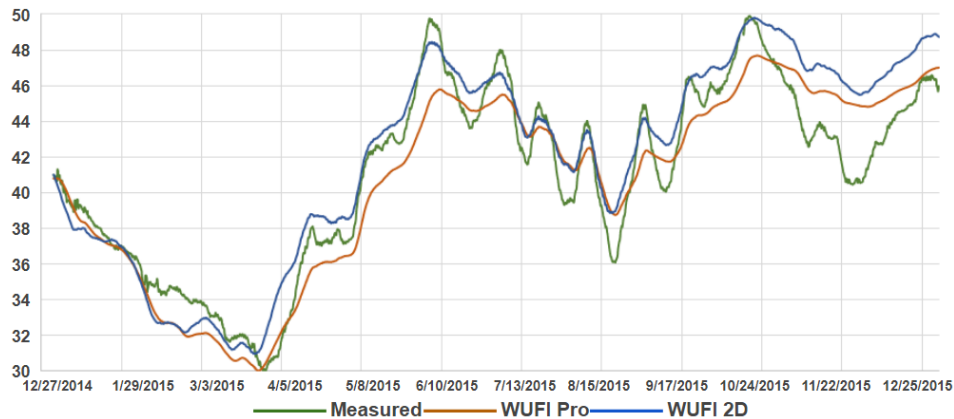


Figure 17: Trend of relative humidity in middle of the wall-Brick layer.

CONCLUSION

This paper presents the results of a case study on the predictive performance of hygro-thermal simulations of an existing wall retrofitted with an Aerogel-based plaster layer. The results of the study displayed a noticeable improvement of the predictive potency of the simulation model by adjusting the input variables based on measurements. In fact, in this case the actual representation of the local indoor and outdoor climate significantly improved model predictions. Likewise, accurate representation of initial conditions (i.e., starting values for layer temperature and humidity) resulted in more dependable simulation outcome. Moreover, a more detailed representation of the components' geometry (in this case for hollow brick layer) contributed to more dependable simulation results.

REFERENCES

- EN 15026. 2007. Hygrothermal performance of building components and building elements: Assessment of moisture transfer by numerical simulation. ISBN: 9780580547416.
- Fixit. 2018. <http://www.fixit.ch/Home/Produkte/Restaurierungs-und-Sanierungsprodukte/>. Last accessed on 20.04.2018.
- Ibrahim M., Wurtz E., Biwole, P.H., Achard P., Sallee H. 2014. Hygrothermal performance of exterior walls covered with aerogel-based insulating rendering, *Energy and Buildings*, vol. 84, 241–251.
- Masera G., Ghazi Wakili K., Stahl T., Brunner S., Galliano R., Monticelli C., Aliprandi S., Zanelli A., Elesawy A. 2017. Development of a Super-Insulating, Aerogel-Based Textile Wallpaper for the Indoor Energy Retrofit of Existing Residential Buildings, *Procedia Engineering* 180, 1139-49.
- Meteonorm. 2018. Information on <http://www.meteonorm.com/en/product/productpage/meteonorm-software/>. Last accessed on 20.04.2018.
- Santamouris M., Dascalaki E. 2002. Passive retrofitting of office buildings to improve their energy performance and indoor environment: The OFFICE project, *Building and Environment*, vol. 37, 575–578.
- Schuss M., Mahdavi A., Pont U., Sustr C., Aien S., Ghazi Wakili K., Stahl T. 2017. *Strukturierte Aerogelputze*, *Bauphysik-Kalender 2017*, 1, Ernst & Sohn. Architektur und technische Wissenschaften Berlin, ISBN: 9783433031698, 153 – 175, Berlin.
- Taheri M., Tahmasebi F., Mahdavi A. 2013. Two case studies in optimization-based thermal building performance model calibration, *CESBP - 2nd Central European Symposium on Building Physics*, Vienna, Austria.
- Tahmasebi F., Mahdavi A. 2013. A two-staged simulation model calibration approach to virtual sensors for building performance data, *13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, 26-28, 608–613, Chambéry, France.
- WUFI. 2018. Fraunhofer Institute for Building Physics, Holzkirchen, Germany. Information on http://www.WUFI.de/index_e.html. Last accessed on 20.04.2018.

OPTIMAL RENEWABLE ENERGY BASED SUPPLY SYSTEMS FOR SELF-SUFFICIENT RESIDENTIAL BUILDINGS

M. Kleinebrahm¹, J. Weinand¹, A. Ardone¹ and R. McKenna¹

¹ Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute for Industrial Production (IIP), Chair of Energy Economics, Karlsruhe, Germany

ABSTRACT

To cover 100% of the energy demand using renewable energies, technologies like small wind turbines (SWT) or hydrogen (H₂) storage systems could be integrated into the household energy system. In this study optimal self-sufficient energy supply systems for residential buildings are determined using an MILP optimization model. To consume energy at the time it is generated, flexible devices and optimal charging strategies for electric vehicles are considered. Least cost systems for different regions are identified and compared to a conventional reference system. It is shown that H₂ storage systems and SWT can be economically beneficial for self-sufficient household supply.

INTRODUCTION

The household and transport sectors accounted for over 55% of final energy consumption in Germany in 2016 (Umweltbundesamt). Due to the steady decline in the price of photovoltaic (PV) systems, the levelized cost of electricity of rooftop PV is lower than the electricity price for private households in Germany since about 2010 (Karneyeva and Wüstenhagen, 2017). In order to increase the share of self-consumption, over 80,000 PV systems in Germany were installed with a battery storage (BS) by the beginning of 2018 (BSW Solar, 2018). With a further drop in prices and a resulting large-scale expansion of on-site supply systems, less electricity could be drawn from the grid and the fixed portion of the electricity retail price must be allocated over less electricity. This development could lead to increasing electricity prices or to the introduction of new tariff schemes (Agnew and Dargusch, 2015; Janko et al., 2016; Parag and Sovacool, 2016). PV-BS systems need to be extremely oversized for residential off-grid supply in

Germany due to the seasonal character of PV generation and the high specific cost of battery storage (Bracke et al., 2016). To provide energy when the sun is not shining, technologies like small wind turbines or hydrogen storage systems need to be taken into account. Additionally, flexibility options on the demand side can be used to match household demand and supply. Hence, in the longer term, it is important to evaluate how many additional costs have to be spent to become independent from rising electricity prices and fossil fuels.

Self-sufficient renewable energy based household supply systems have been studied by several researchers. Kotzur et al. (2017) calculate cost-optimal energy supply systems for a self-sufficient single family household (SFH), focussing on different H₂ storage options. By using a reversible SOFC combined with a Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) system for long-term storage, energy cost can be reduced by 72% compared to a PV-BS based system. Leonard and Michaelides (2018) investigate two grid independent zero-energy buildings (ZEB) in the USA, which are supplied by PV-BS-H₂ Systems. Energy conservation and efficiency measures are identified to have the greatest impact on PV area and nominal power requirements. Lacko et al. (2014) evaluate the feasibility of a completely renewable based heat and electricity supply for an isolated household in Slovenia's costal region using the simulation software HOMER and actual measured data. The results show that 100% renewable energy supply is technically feasible and can be cost-effective compared to a fossil fuel based energy supply system. Marino et al. (2013) analyse an energy supply system for a public building, combining a small wind turbine with PV modules and a H₂ storage system, with regard to economic and

ecological criteria. The system is dimensioned for off-grid operation but can only be operated economically when connected to the grid. Goldsworthy and Sethuvenkatraman (2018) show that electrical self-sufficiency with a PV-BS system can be economical in Australia if demand side adjustments are made. In pilot projects, self-sufficient residential buildings with SWT and H₂ storage facilities are already being built. Prominent examples are the world's first energy self-sufficient multi-family house, the "Oekohaus Markert", in Switzerland, and the "Solar House" in Germany (Diermann, 2016; Schleicher, 2014; Voss et al., 1995). Table 1 gives an overview of the presented sources and projects. An integrated analysis of load flexibilities by electric vehicles and household appliances in combination with innovative small scale technologies such as H₂ storage and SWT for 100% self-sufficient residential buildings is missing in literature. By taking into account flexibility potentials, storage demand and generation plants could be reduced resulting in lower system costs. In this paper a mixed integer linear programming (MILP) optimization model is presented which determines the optimal system structure and dispatch of self-sufficient energy supply systems, taking into account flexible devices on the demand side as well as optimal charging strategies for electric vehicles (EV). Different self-sufficient energy supply systems are compared and effects of different local conditions are investigated. Furthermore, cost developments are examined depending on the degree of self-sufficiency (DSS).

METHODOLOGY AND DATA

Model overview

Only an integrated analysis can account for the interactions between generation, conversion, storage and demand side flexibilities in order to find the optimal energy supply system structure for self-sufficient buildings. To determine the optimal design and operation of the energy supply system, a MILP model is developed, which minimizes total system cost over a period of 20 years using a Greenfield approach. Therefore, energy and mass flows are calculated in hourly resolution for a period of one year. An overview of the technologies and their interconnections considered in this paper can be found in Figure 1. Solar thermal (ST) energy is not taken into account due to the competition for roof area with PV. The presented model is generated in Matlab and solved with the Gurobi solver.

Target function

The target function (cf. Eq. (1)) minimizes the objective value (OBJ) as total discounted system cost (TDSC) over a period of consideration (*poc*=20 years) (Variables are printed in bold below).

$$\min \mathbf{OBJ} = \sum_{l \in L} c_{l,inv} + \sum_{a=1}^{poc=20} \frac{\mathbf{acf}}{(1+i)^a} \quad (1)$$

Table 1: Overview of discussed papers and projects regarding renewable based self-sufficient energy supply for single buildings (PV: photovoltaic, SWT: small wind turbine, BS: battery storage, H₂: hydrogen storage system, DSM: demand side management, EV: electric vehicle, HS: heat storage, HP: heat pump, ST: solar thermal plant, HR: heating rod)

Source	Application/Description	Approach	Technology								Country		
			PV	SWT	BS	H ₂	DSM	EV	HS	HP		ST	HR
Kotzur et al. 2017	100% renewable based energy supply for SFH	Cost-optimisation	x		x	x			x	x		x	Germany
Leonard et al. 2018	Analysis of two off-grid ZEB	Simulation	x			x	x						USA
Lacko et al. 2014	Hybrid energy system for heat and power supply	Homer Simulation	x	x		x			x			x	Slovenia
Marino et al. 2013	Electrolysis to generate hydrogen in a public building	Environmental and economic analysis	x	x		x							Italy
Goldsworthy et al. 2018	28 off-grid households	Simulation	x		x		x						Australia
Projects	First self-sufficient MFH	-	x		x	x	x		x	x			Switzerland
	Self-sufficient energy house Markert	-	x	x	x							x	Switzerland
	Solarhouse Freiburg	-	x		x	x			x		x		Germany
This study	Optimal energy supply system for SFH	Cost-optimisation	x	x	x	x	x	x	x	x		x	Germany

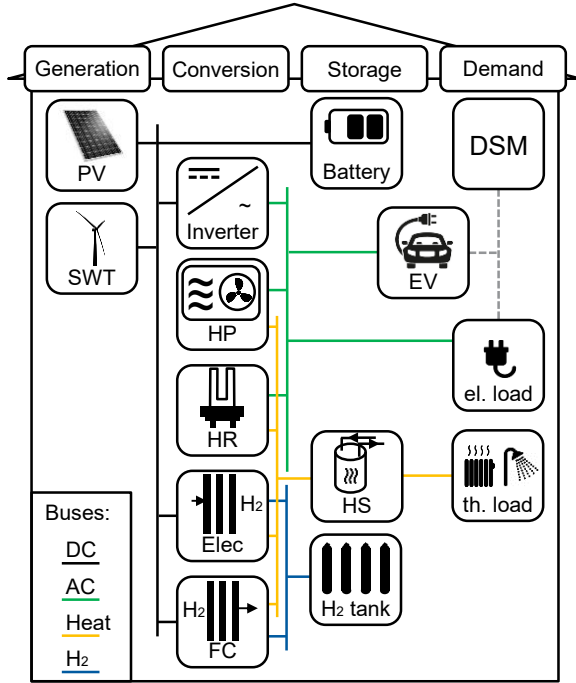


Figure 1: Household energy supply system (Elec: electrolysis, FC: fuel cell, el.: electrical, th.: thermal)

The objective value is the sum of the investments ($l, j \in L$) in the individual technologies ($c_{l,inv}$) and the discounted sum of annual cash flows (acf). The technology investment consists of three parts: the investment itself, the reinvestment and the remaining value after the period of consideration (cf. Eq. (2)). The product of the technology specific investment cost in year a ($c_{l,inv,spc,a}$) and the installed capacity (cap_l) is considered as the investment itself. If the period of consideration exceeds the calendar lifetime of technology l , a reinvestment is taken into account. If the calendar lifetime (clt) exceeds the period of consideration, the residual value of the technology is subtracted based on the remaining calendar lifetime (clt_{rem}).

$$c_{l,inv} = c_{l,inv,spc,a=0} \cdot cap_l + \frac{c_{l,inv,spc,a=clt_l} \cdot cap_l}{(1+i)^{clt_l}} - \frac{clt_{rem,l} \left(\frac{c_{l,inv,spc,a=poc} \cdot cap_l}{(1+i)^{poc}} \right)}{clt_l} \quad (2)$$

The acf consists of capacity specific fixed operation and maintenance cost ($c_{l,O\&M}$) and the sum of flow specific ($f_{l,j,t}$) variable cost ($c_{l,j,var}$) per time step (t) over the period of one year (T).

$$acf = \sum_{l \in L} c_{l,O\&M} \cdot cap_l + \sum_{l \in L} \sum_{j \in L} \sum_{t \in T} c_{l,j,var} \cdot f_{l,j,t} \quad (3)$$

Analogous to Kaschub et al. (2016), neither the investment decision in an EV nor the costs of the EV are considered in the model. It is assumed that the investment in the EV is only made for reasons of mobility.

Main constraints

The properties of the technologies, their interactions and the household demand, described in Figure 1, are mathematically represented in the model using five different classes: generator, consumer, converter, storage and buses. The mathematical formulation of the classes is generically described in Eq. (4)-(8), analogous to Kotzur et al. (2017).

$$cap_l \cdot p_{l,t} = \sum_{j \in L} f_{l,j,t} \quad \forall l, t \quad (4)$$

$$\sum_{l \in L} f_{l,j,t} = d_{j,t} \quad \forall j, t \quad (5)$$

$$\sum_{l \in L} f_{l,j,t} \cdot \eta_{j,t,con} = \sum_{k \in L} f_{j,k,t} \quad \forall j, t \quad (6)$$

$$\eta_{j,ch} \cdot \sum_{l \in L} f_{l,j,t} - \eta_{j,dch} \cdot \sum_{k \in L} f_{j,k,t} + SOC_{j,t-1} \cdot (1 - \eta_{j,sd}) = SOC_{j,t} \quad \forall j, t \quad (7)$$

$$\sum_{l \in L} f_{l,j,t} = \sum_{k \in L} f_{j,k,t} \quad \forall j, t \quad (8)$$

p_l : technology specific normalized output

d_l : load specific household demand

η_{con} : conversion efficiency

η_{ch} : charging efficiency

η_{dch} : discharging efficiency

η_{sd} : self discharge rate

SOC : State of charge

Generation

To calculate the amount of electricity that is generated by PV modules and SWT for different geographical locations, the local amount of irradiance and the wind speed are simulated. The calculation of the global irradiance on tilted PV modules is done according to the presented approach in (Mainzer et al., 2017). Based on the calculated position of the sun and radiation data (provided by DWD (2011)), the components of direct, diffuse and reflected radiation are determined. The calculation of the normalized electrical PV output is based on the global irradiance, the module temperature and technical properties of the PV module (Quaschnig, 2015).

A south orientation with a roof tilt of 34° and a 300 Watt module (Percium JAM6) are assumed for performance modelling. To estimate the local wind speed at different altitudes, reanalysis data from Modern Era Retrospective Analysis (MERRA) are used (Steven Pawson, 2015). The data are in a temporal resolution of one hour, a spatial resolution of 50km, are available worldwide and are given at 10m above displacement height. Due to the relatively low spatial resolution, local effects are not captured properly. However, since the focus of this study is not on the assessment of the operation of SWT at certain locations, but rather on the general investigation of areas in which self-sufficient buildings might be applied, the wind data are sufficient. For the wind speed estimation at other heights than 10m, the power law is used (Quaschnig, 2015):

$$v(h_2) = v(h_1) \cdot \frac{\ln((h_2 - d)/z_0)}{\ln((h_1 - d)/z_0)} \quad (9)$$

h_1 : Measurement height (10m)

h_2 : Turbine height (m)

d : Displacement height (m)

z_0 : roughness (m)

The normalized turbine output is calculated using the local wind speed at turbine height (12 m) and an averaged normalized power curve. The averaged power curve is based on all SWT certified by the Small Wind Certification Council (2018) within a rated power of 1 to 6 kW. Ten percent losses due to dirt on blades, maintenance, forced outages etc. are considered (Olauson et al., 2016). A roughness length of 0.03 m and a displacement height of 0 m are assumed for the calculations, which corresponds to a remote landscape with some houses (Quaschnig, 2015).

Conversion

To convert a mass/energy flow into another mass/energy flow, five conversion technologies are integrated in the model. The inverter converts DC into AC with a power-independent efficiency. The heating rod and the air-source heat pump convert AC into heat. The heating rod has a constant conversion efficiency, while the conversion efficiency of the heat pump (COP) is dependent on the temperature difference between heat source and heat sink and is

therefore calculated for each time step (Staffell et al., 2012). To convert DC electricity into H₂ a proton exchange membrane (PEM) electrolysis cell is used due to the good combinability with renewable energy sources. The operating temperature of 80°C enables a quick start-up and the operation at partial loads. The same advantages apply to the reconversion in a PEM fuel cell (Teichmann et al., 2012). The by-product of electrolysis and fuel cell operation is waste heat, which can be used for domestic hot water and room heating. The employed conversion efficiencies are shown in Table 2.

Storage

Energy can be stored in the form of electricity, heat and H₂. All storages are modelled with a charging and discharging efficiency and a self-discharging rate according to Eq. (7). Electricity can be stored in the stationary DC-coupled Lithium-Ion BS and in the AC-coupled EV BS. Due to charging with constant current and voltage, the charging power of the Batteries is reduced for a high state of charge (SOC) according to Kaschub et al. (2016). It is possible to feed electricity from the EV BS back into the house grid. The discharging of the EV causes additional BS aging, which is taken into account with a price of 6.75 ct/kWh (based on a BS investment of 270 €/kWh and 4000 equivalent full cycles). The EV SOC is limited by a lower and upper bound and the EV can only be charged at home (Figure 2).

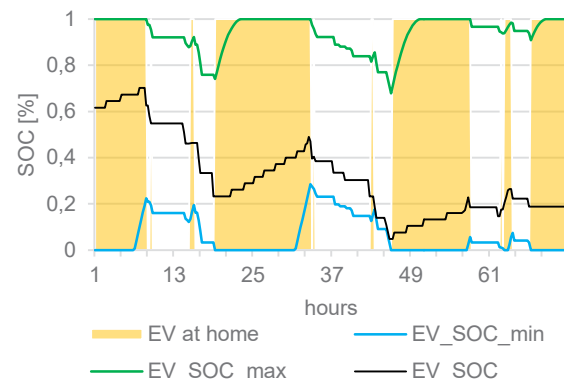


Figure 2: Exemplary course of the EV SOC for three days based on (Kaschub et al., 2016)

Mobility patterns of households are used, which are modelled in Kaschub et al. (2016) based on survey data for conventional vehicles (BMVBS, 2010). In this study a BS EV with a BS size of 28 kWh is considered. The produced heat is stored

in a hot water storage from which the demand for domestic hot water and space heating is covered. H₂ can be stored in a H₂ tank at a pressure of 200 bar. As in (Kotzur et al., 2017), an isentropic compressor efficiency of 75% is assumed, so that three kWh of electrical energy is required to compress one kg of H₂. Three kWh electricity corresponds to approx. 10% of the calorific value of one kg H₂. Consequently, taking into account $\eta_{elec,el.}$, a H₂ tank charging efficiency of 93% is assumed. An overview of the assumed charging and conversion efficiencies is given in Table 2.

Table 2 Charging and conversion efficiencies

Technology	Parameter	Efficiency [%]
BS	$\eta_{ch}/\eta_{ach}/\eta_{sd}$	95/95/0.003
EV	η_{ch}/η_{ach}	90/90
HS	$\eta_{ch}/\eta_{ach}/\eta_{sd}$	95/95/0.83
H ₂ tank	η_{ch}/η_{ach}	93/100
Inverter	$\eta_{inverter}$	95
Heating rod	η_{HR}	98
Electrolysis	$\eta_{Elec,H2}/\eta_{Elec,th.}$	70/20
Fuel Cell	$\eta_{FC,el.}/\eta_{FC,th.}$	55/35

Demand

The thermal and electrical household demand must be covered in every time step of the year in accordance to Eq. 5. The employed synthetic load profiles are generated with the software SynPro (Fischer et al., 2016). Electrical load profiles are available in device-specific resolution and heat demand is composed of hot water consumption and space heating. The charging profiles for the EV are taken from Kaschub et al. (2016). A single-family household (passive-house standard) with two inhabitants and an annual electrical demand of 5349 kWh (household devices: 2905 kWh, EV: 2444 kWh) and a thermal load of 5663 kWh/a (space heating: 3328 kWh/a, domestic hot water: 2335 kWh/a) is examined. In order to take load flexibility on the demand side into account, it is assumed that the washing machine, dishwasher and dryer can be operated flexibly within 24 hours after their original switch-on. The load flexibilities are considered in the model using equations (10)-(12).

$$d_{el,t} = d_{base,t} + \sum_{fl} d_{fl,t} \quad (10)$$

$$s_{fl,org,t} = s_{fl,t} \cdot s_{fl,pos,t} \quad (11)$$

$$d_{fl,t_2} = s_{fl,t_1} \cdot d_{fl,t_1,t_2} \quad (12)$$

$$\forall t, t_1, t_2 \in T, \forall fl \in FL$$

d_{el} : electrical demand

d_{base} : electrical base demand

d_{fl} : demand of fl

$s_{fl,org}$: original start of fl (binary parameter)

$s_{fl,pos}$: possible start of fl (binary parameter)

s_{fl} : start of flexible load (binary variable)

d_{fl,t_1,t_2} : demand of fl in t_2 when started in t_1

RESULTS AND DISCUSSION

Optimal energy supply systems to cover the energy demand for electricity, heat and mobility are calculated for a passive house in Brunswick (town in the middle of Germany). To investigate the effects of different meteorological conditions on the sizing of the energy supply system in Germany, single family houses in the surroundings of Brunswick, Munich and Buesum are compared. The economic assumptions are shown in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**. The economic parameters for the H₂ system are subject to high uncertainty, as the H₂ system is a combination of future technologies for which no market data are yet available. A nominal interest rate of 4% is assumed.

Table 3: Cost assumptions according to (Grieser et al., 2015; Kaschub et al., 2016; Kotzur et al., 2017)

Technology	Investment [€/kW(h)]	O&M [%/Inv./a]	Lifetime [a]
PV	1350	1.5	25
SWT	6000	2.5	20
Inverter	250	-	15
Heat pump	1150	2	20
Heating rod	100	2	30
Electrolyser	5550	2	10
Fuel cell	4530	2	10
H ₂ -tank	25	-	25
Heat storage	45	-	25
BS	600	-	15

Self-sufficient energy supply systems

Figure 3 gives an overview of the TDSC of six different technology combinations suitable for self-sufficient renewable energy based supply of a passive house in Brunswick. In addition, the TDSC of a reference system [ref] are shown in which electricity is drawn from the grid. An electricity price of 29.81 cent/kWh and an electricity price increase of 2 %/a are assumed. A HP/HS combination is used to cover the thermal demand. 7887 kWh/a are drawn from the grid to cover the household energy demand for electricity, heating and mobility. The base system (Base) consists of the following technologies: PV,

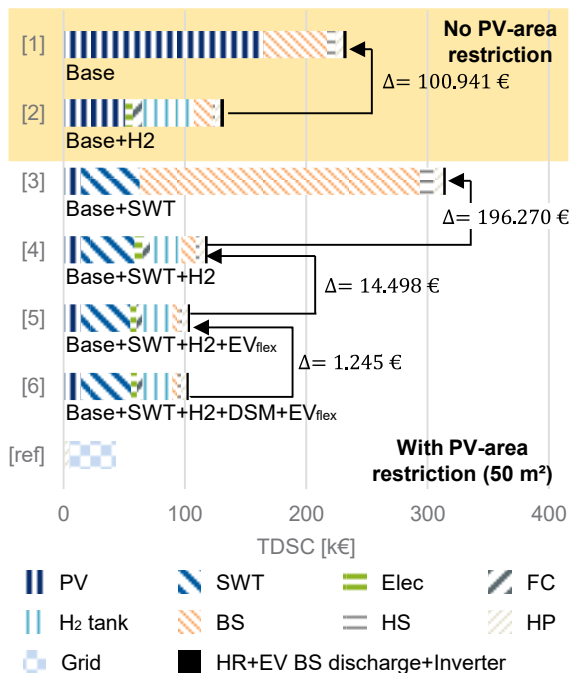


Figure 3: TDSC of energy supply system configurations

BS, HS, HP, HR and Inverter. In system configuration [1] the optimal supply system is determined only under consideration of base system technologies. Due to the fact that the PV system is the only source of power, a self-sufficient supply is not possible if an area restriction of 50 m² is taken into account, which corresponds to a PV peak power of 9.17 kWp. Without taking the area restriction into account, self-sufficient energy supply can be realized by system configuration [1] with TDSC of 233 k€. Over 93 % of the TDSC are caused by the installation and operation of the PV system (105 kWp ~ 71 %) and the BS (62 kWh ~ 22 %). By extending the base system with an H₂ storage system [2], the TDSC can be reduced by 43%. A self-sufficient operation is still not possible under consideration of the PV-area restriction. If the basic system is extended by a SWT [3], an additional electricity source is available and a self-sufficient household supply can be achieved while complying with the PV-area restriction. To provide electricity in periods of low solar irradiation and wind speed, a BS with a capacity of 273 kWh is installed, which accounts for over 73 % of the TDSC. In System [4] a SWT and a H₂ storage system are installed together. The BS (14 kWh) is only used for diurnal storage while the H₂ storage system (1232 kWh) is used for long-term storage. In addition to [4], the EV is charged flexibly and electricity stored in the EV BS can be fed back into the household grid (EV_{flex}) in [5]. The

EV BS (28 kWh) partially replaces the BS in [5], which has a capacity of only 7 kWh. The cost optimal system configuration [6] is composed of all technologies described in Figure 1. In addition to [5] load shifting of flexible electric devices is possible (DSM). By taking DSM measures into account, the TDSC can be further reduced by 1.2 %. For diurnal storage a BS is used with a capacity of 5.6 kWh, which is operated with 267 full charge cycles (stored energy/capacity) per year in system [6]. To account for the mismatch between generation and demand in summer and winter, the H₂ system is used as a seasonal storage with a H₂ tank capacity of 1,145 kWh, which is operated with 1.27 full charge cycles per year. The TDSC of system [6] are 103 k€ and are therefore more than twice as high as the TDSC of the reference system. It is interesting to analyse how the TDSC behave in relation to the degree of self-sufficiency (DSS = grid supply / grid supply in [ref]) (McKenna et al., 2017). Figure 4 shows that a maximum DSS of 70% can be achieved with a limited PV area, if no SWT is taken into account, without the TDSC being doubled in relation to [ref]. With no PV area restriction, the TDSC of [1] and [2] increase slowly up to a DSS of 80%. To meet the last 20% of the energy demand, the BS in [1] needs to be extremely oversized, which results in high TDSC, while in [2] the H₂ system is used for long-term storage, causing lower TDSC. In addition to the TDSC, Figure 4 shows which technologies are added to system [5] in order to reach certain DSS. The SWT and the H₂ system are only installed, if a DSS of higher than 60% should be achieved.

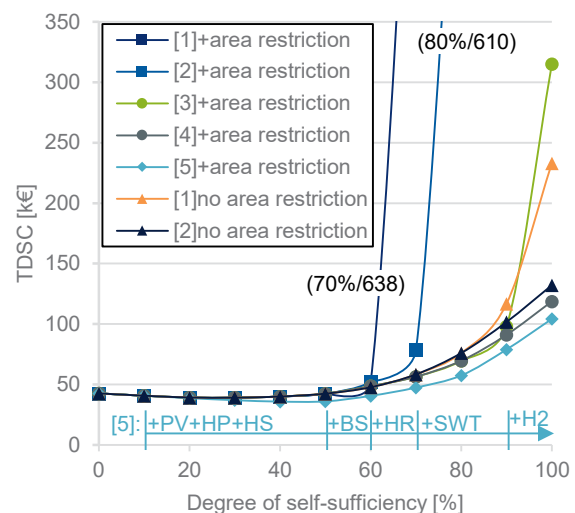


Figure 4: TDSC in dependence of the DSS

Energy supply systems for different locations

To investigate the meteorological influences of different locations on the dimensioning of energy self-sufficient building supply systems, optimal technology combinations for Brunswick, Buesum (at the North Sea) and Munich are calculated. For this purpose, all degrees of freedom are given to the optimizer analogous to System [6]. Due to locally-changing temperatures, solar irradiation and wind speeds, different electricity generation profiles for PV and SWT are calculated, as can be seen in Table 4. Furthermore the locally different space heating loads (SH) are given.

Table 4: Site specific conditions (Temp.: average yearly temperature)

City	PV [kWh/a/kW]	SWT [kWh/a/kW]	Temp. [C°]	SH [kWh/a]
Brunswick	864	916	9.52	3,328
Buesum	1034	1654	9.33	3,937
Munich	1063	415	8.25	4,452

Figure 5 illustrates that the TDSC for the same passive house are strongly affected by the site conditions. Due to good wind conditions in Buesum, the same SWT generates four times more electricity in Buesum in comparison to Munich. This allows both the SWT and the storage system to be dimensioned smaller. The TDSC are heavily dependent on the electricity output of the SWT, as it provides more electricity asynchronously to PV in the winter months, when electricity demand is high due to space heating. Yet, even under good wind conditions, the TDSC of self-sufficient supply systems are almost twice as high as those of the reference system.

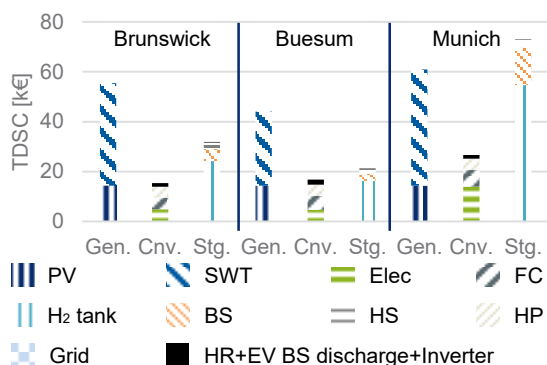


Figure 5: TDSC for different locations (Gen.: Generation, Cnv.: Conversion, Stg.: Storage)

CONCLUSION

In this work the dimensioning and dispatch of self-sufficient renewable energy based supply systems for SFH are determined for different locations. An MILP optimization model is

presented for the calculation of cost-optimal supply systems. Flexible electrical loads on the demand side as well as future technologies like H₂ storage and SWT on the supply side are taken into account. The results indicate that the combination of a SWT and a H₂ storage system with already established technologies is the most economical for self-sufficient energy supply. Load flexibilities on the demand side have a rather small impact on the dimensioning of self-sufficient supply systems. The TDSC of the optimal self-sufficient system are almost twice as high as the TDSC of a conventional supply system. Site conditions have a strong influence on the dimensioning of the energy supply system and therefore on the TDSC. The calculations of this study are based on a multitude of data, some of which are subject to uncertainties; furthermore a deterministic approach is used. Consequently, the results are only a trend and should not be interpreted incoherently. In future work different sites in Europe should be analysed. Bio-fuelled micro combined heat and power plants could be taken into account as a flexible energy source. In addition, aspects of security of supply and the investment in the EV could be analysed.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Helmholtz Association under the Joint initiative "Energy Systems Integration".

REFERENCES

- Agnew, S. and Dargusch, P. (2015) 'Effect of residential solar and storage on centralized electricity supply systems', *Nature Climate Change*, vol. 5, no. 4, pp. 315–318.
- BMVBS (2010) Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Deutsches Mobilitätspanel (MOP) [Online].
- Bracke, J., Tomaschek, J., Brodecki, L. and Fahl, U. (2016) 'Techno-ökonomische Bewertung von Energie-Autarkie für die Energieversorgung von Einfamilienhäusern', *Zeitschrift für Energiewirtschaft*, vol. 40, no. 3, pp. 127–137.
- BSW Solar (2018) Solarstromspeicher: Nachfrage wächst rasant.
- Diermann, R. (2016) 'Ohne Netz: Erstes völlig energieautarkes Mehrfamilienhaus der Welt fertiggestellt', *Wirtschaftswoche*, 2016.

- DWD (2011) Aktualisierte und erweiterte Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse, DWD.
- Fischer, D., Wolf, T., Scherer, J. and Wille-Haussmann, B. (2016) 'A stochastic bottom-up model for space heating and domestic hot water load profiles for German households', *Energy and Buildings*, vol. 124, pp. 120–128.
- Goldsworthy, M. J. and Sethuvenkatraman, S. (2018) 'The off-grid PV-battery powered home revisited; the effects of high efficiency air-conditioning and load shifting', *Solar Energy*.
- Grieser, B., Sunak, Y. and Madlener, R. (2015) 'Economics of small wind turbines in urban settings: An empirical investigation for Germany', *Renewable Energy*, vol. 78, pp. 334–350.
- Janko, S. A., Arnold, M. R. and Johnson, N. G. (2016) 'Implications of high-penetration renewables for ratepayers and utilities in the residential solar photovoltaic (PV) market', *Applied Energy*, vol. 180, pp. 37–51.
- Karneyeva, Y. and Wüstenhagen, R. (2017) 'Solar feed-in tariffs in a post-grid parity world: The role of risk, investor diversity and business models', *Energy Policy*, vol. 106, pp. 445–456.
- Kaschub, T., Jochem, P. and Fichtner, W. (2016) 'Solar energy storage in German households: Profitability, load changes and flexibility', *Energy Policy*, vol. 98, pp. 520–532.
- Kotzur, L., Markewitz, P., Robinius, M. and Stolten, D. (2017) 'Kostenoptimale Versorgungssysteme für ein vollautarkes Einfamilienhaus', in Ramming, K. (ed) *Einleitung; §§ 476 – 480*, Berlin, Boston, De Gruyter, pp. 1–172.
- Lacko, R., Drobnič, B., Mori, M., Sekavčnik, M. and Vidmar, M. (2014) 'Stand-alone renewable combined heat and power system with hydrogen technologies for household application', *Energy*, vol. 77, pp. 164–170.
- Leonard, M. D. and Michaelides, E. E. (2018) 'Grid-independent residential buildings with renewable energy sources', *Energy*, vol. 148, pp. 448–460.
- Mainzer, K., Killinger, S., McKenna, R. and Fichtner, W. (2017) 'Assessment of rooftop photovoltaic potentials at the urban level using publicly available geodata and image recognition techniques', *Solar Energy*, vol. 155, pp. 561–573.
- Marino, C., Nucara, A., Pietrafesa, M. and Pudano, A. (2013) 'An energy self-sufficient public building using integrated renewable sources and hydrogen storage', *Energy*, vol. 57, pp. 95–105.
- McKenna, R., Merkel, E. and Fichtner, W. (2017) 'Energy autonomy in residential buildings: A techno-economic model-based analysis of the scale effects', *Applied Energy*, vol. 189, pp. 800–815.
- Olauson, J., Goude, A. and Bergkvist, M. (2016) 'Wind energy converters and photovoltaics for generation of electricity after natural disasters', *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, vol. 97, no. 1, pp. 9–23.
- Parag, Y. and Sovacool, B. K. (2016) 'Electricity market design for the prosumer era', *Nature Energy*, vol. 1, no. 4, p. 16032.
- Quaschnig, V. (2015) *Regenerative Energiesysteme: Technologie ; Berechnung ; Simulation ; mit 119 Tabellen*, 9th edn, München, Hanser.
- Schleicher, V. (2014) 'Passivhaus ganz aktiv', *Energiesparhaus*.
- Small Wind Certification Council (2018) *SWCC Certified Turbines - Small: Compare Ratings* [Online].
- Staffell, I., Brett, D., Brandon, N. and Hawkes, A. (2012) 'A review of domestic heat pumps', *Energy & Environmental Science*, vol. 5, no. 11, p. 9291.
- Steven Pawson (2015) *MERRA-2*,
- Teichmann, D., Stark, K., Müller, K., Zöttl, G., Wasserscheid, P. and Arlt, W. (2012) 'Energy storage in residential and commercial buildings via Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC)', *Energy & Environmental Science*, vol. 5, no. 10, p. 9044.
- Umweltbundesamt Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen: *Auswertungstabellen zur Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2016*.
- Voss, K., Goetzberger, A. and Bopp, G. (1995) 'The Self-Sufficient Solar House Freiburg - Results of Three Years of Operation

INTEGRATION VERLUSTBEHAFTETER VERBRAUCHER UND VERTEILNETZWERKE IN DYNAMISCHE GEBÄUDEENERGIEMODELLE AM BEISPIEL VON NANDRAD

A. Paepcke¹, A. Nicolai¹ und D. Weiß¹

¹ Institut für Bauklimatik, Technische Universität Dresden, Dresden, Germany

KURZFASSUNG

Wärmeübertragung und Wärmeverlustmechanismen von Anlagenkomponenten und ihrer Verteilnetzwerke haben entscheidenden Einfluss auf den Energieverbrauch und die thermische Behaglichkeit eines Gebäudes. Der Artikel konzentriert sich auf die Integration solcher Modelle in eine dynamische Simulation mit hohem geometrischen Detailgrad. Dabei ist eine numerisch akkurate und effiziente Lösung der Bilanzgleichungen und der algebraischen Kopplungsgleichungen innerhalb des Newton-Algorithmus verpflichtend. Geeignete Algorithmen und ihre Umsetzung werden vorgestellt.

ABSTRACT

Mechanisms of plant component heat transfer and heat loss have a large impact on building energy consumption and thermal comfort. The article focuses on integrating such models into a dynamic simulation with a high geometric detail level. In this case, the numerical solution of the balance equation and the coupled algebraic equations inside Newton's algorithm must be implemented in an accurate and efficient way. The equations lead to large sparse systems, whose structure may become very complex with regard to thermal interaction i.e. between neighbored rooms of the distribution network. We introduce suitable algorithms and implementations.

EINLEITUNG

Der Gebäudeenergiebedarf lässt sich derzeit bereits gut mittels dynamischer Simulationsprogramme abschätzen. Hierbei kommen üblicherweise Mehrzonenprogramme zur Anwendung, bei denen das Gebäude in

charakteristische untereinander verbundene Räume bzw. Raumgruppen unterteilt wird. Bei einer Bedarfsberechnung wird die Wechselwirkung des Gebäudes mit Klima und Nutzer abgebildet, wobei Energie je nach Bedarf den jeweiligen Räumen durch Heizung und Kühlung zugefügt oder entnommen wird.

Die klassische Gebäudeenergiesimulationen erfährt derzeit Impulse durch verschiedene erweiterte Anwendungsszenarien: die Berücksichtigung der Energiebereitstellung und Verteilung im Gebäude durch Anlagenkomponenten, Wärmeverteilnetze und Regelsysteme liefert realistische Leistungsbeschränkungen und führt auf die integrierte Gebäudesimulation. Ansätze hierzu werden sowohl durch klassische Gebäudeenergiesimulationsprogramme wie EnergyPlus, TRNSYS oder IDA-ICE (Castaldo et al., 2018), aber auch Modellentwicklungen auf generischen Plattformen wie Modelica unterstützt (Wetter et al., 2017). Zu nennen sind zudem Kopplungsansätze zwischen Anlagen- und Gebäudesimulation auf Grundlage der FMI-Kopplungstechnologie.

Gleichzeitig werden dynamische Effekte untersucht, die nicht nur das Gebäude zum Zeitpunkt der Auslegungsplanung, sondern auch während der Gebäudelebenszeit abbilden. Hierbei sind detaillierte Wechselwirkungen dynamischer Effekte wie Lastspitzen und thermische Speicherung von Interesse. Dieser Detaillierungsgrad führt auf hochdynamische mathematische Komplexmodelle.

Die numerische Behandlung solcher Modelle erfordert äußerste Sorgfalt. Prinzipiell besteht die Möglichkeit, die Berechnung komplexer

Modells zu vereinfachen. Dabei können jedoch Aussagen vereitelt oder verfälscht werden. Die Schätzung und Bereitstellung einer vorgegebenen numerischen Genauigkeit ist durch vorhandene mathematische Methoden möglich und liefert eine Kontrolle der Simulationsergebnisse. Die Forderung nach fehlerkontrollierten Lösungsverfahren für die Modellgleichungen ist nach Meinung der Autoren notwendig und zeitgemäß. Weiterhin sollte die numerische Lösung Stabilität und Konsistenz garantieren, um numerische Ausreißer oder unplausibles Verhalten zu verhindern. Nicht zuletzt sollte die Simulationsschwindigkeit in einem akzeptablen Rahmen von Minuten bis wenigen Stunden auf einem Bürorechner liegen, was die Voraussetzung für die Anwendung solcher Instrumente innerhalb des Planungsprozesses ist.

Am Institut für Bauklimatik wurde in den letzten Jahren ein Rechenkern unter diesen Maßgaben entwickelt; das Gebäudeenergiesimulationsprogramm NANDRAD (Nicolai et al., 2012; Paepcke et al., 2014).

GEBÄUDESIMULATION NANDRAD

Das Simulationsmodell NANDRAD zeichnet sich durch einen hohen Detaillierungsgrad bei der Abbildung der Gebäudehülle ab. Speziell für die schweren Wandbauteile in Deutschland/Europa konzipiert, bildet es die verfügbare thermische Speichermasse ein- oder mehrschichtiger Konstruktionen durch Verwendung der Finite-Volumen-Methode für alle Flächenbauteile besonders präzise ab. Eine solche Genauigkeit ist beispielsweise bei der Berücksichtigung dynamischen Aufheizverhaltens relevant, vor allem im Sommer ohne aktive Klimatisierung. Die Modellierung berücksichtigt passend detailliert die klimatischen Einwirkungen und Randbedingungen. Zudem löst NANDRAD bei Anforderung die langwelligen Strahlungsbilanzen zwischen den Wandoberflächen (Validierung nach (DIN EN ISO 13791, 2012)). Damit ist die Wärmeübertragung durch langwellige Strahlung genau abbildbar. Thermische Zonen werden durch Luftknoten in einem Mehrzonennetzwerk beschrieben, wobei eine ideale Vermischung der Raumluft vorausgesetzt wird. Details zum physikalischen Modell sind in (Paepcke, 2017) zu finden.

Zur Bestimmung der Gebäudetemperaturen wird für jeden Raumlufknoten eine Energiebilanzgleichung gelöst, für jede Konstruktion mehrere Bilanzgleichungen, je eine für jedes Finite Volumen. Insgesamt führt der Modellansatz auf ein gekoppeltes System gewöhnlicher Differentialgleichungen.

Geometrische Verbraucherkomponenten

Heizkörper bilden Quellen für die Energiebilanzen. Sie können durch einen Wärmequelle innerhalb der Raumluf oder in einer Wandschicht repräsentiert werden, siehe Abbildung 1. Die Menge der abgegebenen Wärmeenergie muss hierbei durch ein geeignetes Anlagenmodell beschrieben werden.

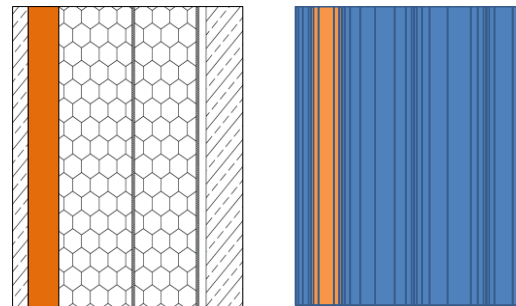


Abbildung 1: Wärmeabgabe eines Heizelementes innerhalb einer aktiven Wandschicht (orange markiert) und typische Wandschichtdiskretisierung

Fußbodenheizungen beispielsweise werden in NANDRAD als thermisch aktive Flächenbauteile modelliert. Der hohe geometrische Detaillierungsgrad der Wandmodelle erlaubt hierbei die Berücksichtigung thermischer Speicher- und Verzögerungseffekte.

Numerisches Lösungsverfahren

Die Bilanzgleichungen bilden ein steifes System von Differentialgleichungen. Dafür sind unter anderem die Energiebilanzgleichungen der Wände verantwortlich, welche als räumlich diskretisierte Simulationsgebiete die wandintere Wärmeleitung berücksichtigen. Als geeignete Kandidaten für die numerische Lösung solcher Systeme sehen die Autoren implizite Zeitintegrationsverfahren als einzige sinnvolle Wahl.

In NANDRAD werden die Gleichungen durch ein implizites Mehrschrittverfahren mit variabler Methodenordnung und adaptiver Zeitschrittsteuerung gelöst (Integrator in Abbildung 2). Letztere verwendet einen Fehlerschätzer zur Anpassung der Zeitschritte, üblicherweise in der

Größenordnung von Millisekunden bis zu maximal 30 Minuten, und erzwingt eine wiederholte Lösungskorrektur, bis eine nutzerdefinierte numerische Genauigkeit erreicht ist.

Die implizite Formulierung des Verfahrens erfordert die mitunter mehrmalige Lösung eines nichtlinearen Gleichungssystems in jedem Zeit- oder Zeitkorrekturschritt. Zu diesem Zweck kommt ein Newton-Verfahren zum Einsatz.

Auswertung der Systemfunktion

Integrator und eingebettetes Newton-Verfahren sind modellunabhängig implementiert. Die Lösungssuche wird vom Integrator durch den Vorschlag einer möglichen Lösung y und Auswertung der Systemfunktion $f(t, y)$ als Antwort des physikalischen Modells konstruiert. Die Lösung entspricht im Fall von NANDRAD den gegebenen Erhaltungsgrößen für alle Bilanzgleichungen. Die Systemfunktion ist vektorwertig und enthält die Änderungsraten der Energiebilanzgleichungen in Folge von Quellen und Senken. Der Integrator ermittelt aus dieser

Information die Zeitableitung aller Erhaltungsgrößen \dot{y} .

Die Auswertung der Systemfunktion bedingt die Lösung aller *algebraischen Zusammenhänge* und die Ermittlung aller Kopplungsgrößen. So müssen in einem Rohrleitungsnetzwerk die voneinander abhängigen Fluidtemperaturen und Strömungsraten bekannt sein, um die Wärmeabgabe der Heizkörper an den Raum und daraus resultierende Wärmequellen an die Zonen oder Wände berechnen zu können.

Auswertung des physikalischen Modells

Algebraische Zusammenhänge und Modellberechnungen, die zu verschiedenen Quellen und Senken beitragen, sind in zustandsbasierten Modellobjekten gekapselt, die voneinander abhängen können. Die einzelnen Modellobjekte werden in einem beliebig erweiterbaren Graphen zusammengefasst, die Bestimmung einer sinnvollen Auswertungsreihenfolge unterstützt.

Diese Modellstruktur ist sehr gut geeignet für die Erweiterung um Rohrnetzwerkmodelle.

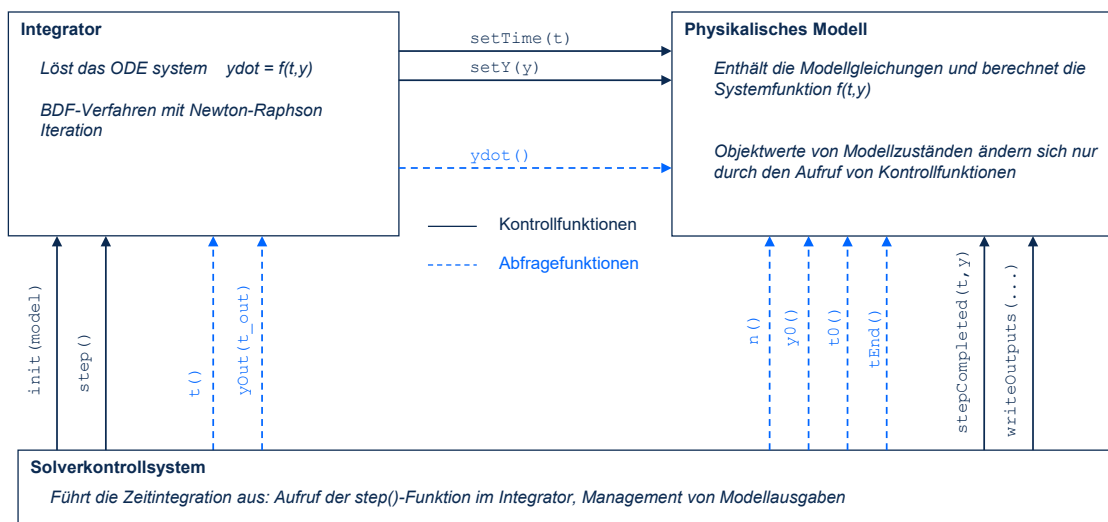


Abbildung 2: Struktur des Integrators, nichtlinearen Gleichungssystemlösers und Zusatzfunktionen (Nicolai et al., 2011)

Newton-Verfahren und Lösung der eingebetteten linearen Gleichungssysteme

Innerhalb der Integrator-Schleife kommt ein Newton-Verfahren zum Einsatz, welches die nichtlineare Lösung durch eine Iteration linearer Ersatzsysteme approximiert. Die effiziente Assemblierung und Umsetzung dieses

Verfahrens bildet die Kernaufgabe eines effizienten Algorithmus.

Zunächst wird die Ableitungsinformation in Form der Jacobi-Matrix ermittelt und durch Differenzen-Quotienten approximiert. Diese Differenzen-Quotienten registrieren Änderungs-

raten der Systemfunktion $f(t, y)$ für verschiedene Lösungsvorschläge und müssen dabei die vollständige Modelldimension abbilden. Daher sind häufige Auswertungen der Systemfunktion die Regel. Implementiert wurde ein Coloring-Verfahren, welches den Auswertungsaufwand bereits drastisch reduziert. Dennoch lässt sich die wiederholte Auswertung der Systemfunktion nicht vermeiden. Daher muss insbesondere die Berechnung der enthaltenen algebraischen Zusammenhänge besonders effizient erfolgen.

Einen numerisch aufwendigen Schritt stellt die Lösung des linearen Gleichungssystems dar. Dabei ist vor allem Struktur und Dimension der Jacobi-Matrix von Interesse, die bei realen Gebäudetypen üblicherweise groß (>10000 Unbekannte), jedoch sehr schwach besetzt (<0.1% Besetzungsgrad) ist. Abbildung 3 zeigt beispielhaft die Struktur der Jacobimatrix eines Gebäudes mit 2 Zonen und 3 Wänden, welche jeweils in 4 Finite-Volumen diskretisiert wurden.

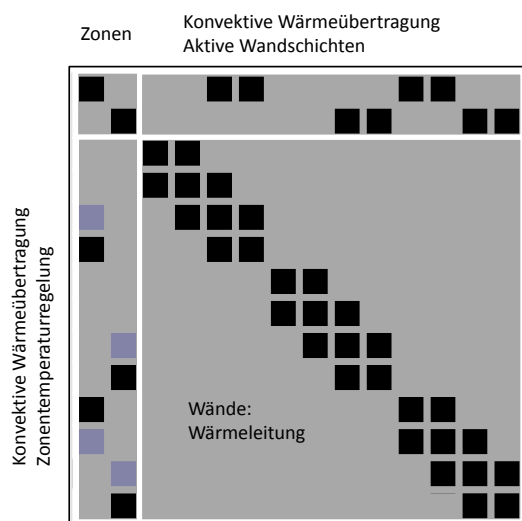


Abbildung 3: Besetzungsstruktur der Jacobimatrix: Oberer Diagonalblock = Zonenwechselwirkungen; Unterer Diagonalblock = Wechselwirkung der Temperaturen der Finiten Volumen in der Wand; Oberer rechter Block = Wirkungen der Wandoberflächentemperaturen auf die Zonenbilanz; Unterer linker Block = Wirkungen der Zonentemperaturen auf die Wandbilanzen

Dieses schwach besetzte lineare Gleichungssystem weicht stark von typischen Bandstrukturen ab, für welche klassische direkte Lösungsverfahren optimiert sind. Daher ist der Einsatz von Verfahren für schwachbesetzte Matrizen entscheidend für eine performante numerische Lösung. In NANDRAD finden iterative Krylow-Unterraumverfahren mit einem

ILU-Vorkonditionierer Verwendung. Insbesondere bei größeren Gebäuden erweist sich diese Verfahrenskombination als ausgesprochen effizient.

Co-Simulation

Bislang konnte detaillierte Anlagentechnik und Wärmeverteilsysteme nur durch FMI-Kopplung an Anlagenmodelle realisiert werden. Umgesetzt und getestet wurde dabei die Co-Simulations-Kopplung für das passive Gebäude (Paepcke et. al. 2016, Nicolai et al., 2017). Die gekoppelten Anlagenkomponenten liefern dabei Einträge konvektiver Wärme oder Strahlungswärme an die Zonenbilanz. Gerade bei stark dynamischer Interaktion von Anlage und Gebäude, z.B. bei Verwendung von Flächenheizkörpern und Gebäudeteilen als thermischen Speichern, erweist sich diese Form der Kopplung als ungünstig: Eingeschränkte Stabilitätsbereiche der globalen Zeitintegrationsmethoden erzwingen sehr kleine Kommunikationsintervalle und führen zu inakzeptabel langen Simulationszeiten.

ERWEITERUNG UM ROHRLEITUNGSNETZWERKE

Die Integration von Rohrleitungen und Heizkörper der Verbraucherseite in das Gebäudesimulationsprogramm ermöglicht es, stark gekoppelte Zusammenhänge innerhalb einer gemeinsamen Lösungsumgebung zu behandeln. Davon versprechen sich die Autoren einen Gewinn an numerischer Stabilität und Simulationsgeschwindigkeit im Vergleich zur bisher vorhandenen Co-Simulationslösung. Mit einer robusten numerischen Lösungsumgebung geht eine höhere Flexibilität in der Modellbildung einher, vor allem was die Komplexität und den Detailgrad der verwendeten Modelle betrifft.

Darüber hinaus können Leitungsverluste des Rohrnetzwerkes an die beteiligten thermischen Zonen beobachtet und bilanziert werden. Die Information über die Lage der Rohrleitungen ist hierfür notwendig. Daher ist es naheliegend, die Netzwerkarchitektur in dem BIM-basierten Datenmodell abzulegen, welches für die Parametrisierung des Simulationsmodells verwendet wird und folglich Kenntnisse über Gebäudegeometrie und Lage der Zonen besitzt. Dass die Generierung der entsprechenden Berechnungsmodelle für Rohrstücke, Heiz-

körper, Thermostate/Ventile innerhalb des Gebäudemodells und nicht in einem externen Programm erfolgt, ist eine zwingende Konsequenz.

Auswirkung auf Systemfunktion

Die Enthalpieströme im Rohrnetzwerk sowie der Temperaturunterschied zwischen Fluid und Umgebung sind verantwortlich für die Wärmeeinträge in der beheizten Zone oder Wandschicht. Diese gehen folglich in die Berechnung der dynamischen Bilanzgleichungen ein. Die zugehörigen Massenströme im Rohrleitungsnetzwerk sind allerdings bedarfsabhängig und werden durch die Pumpenleistung und die Ventilstellungen der Heizkörperthermostate beeinflusst. Folglich ist die Temperatur der jeweiligen Zonen sowohl Systemgröße der Gebäudesimulation als auch Regelgröße für die Rohrnetzwerkberechnung.

Die Druck- und Massestromverteilung im Rohrnetzwerk genügt einem stationären nichtlinearen Gleichungssystem. Somit ist die Rohrnetzwerkberechnung Teil der Systemfunktion und muss möglichst effizient umgesetzt werden (siehe Erweiterung 1 und 2).

Auswirkung auf Jacobi-Matrix

Konvektiver Wärmetransport in einem Rohrleitungsnetzwerk führt zu Verlusten der Fluidtemperatur aufgrund der Wärmeabgabe im Heizelement oder Wärmeverlusten an die Umgebung. Thermische Wechselwirkungen im Gebäude entstehen daher nicht länger nur durch Wärmeaustausch der Zonenluftknoten mit den Wandoberflächen und Wärmetransport durch die Wand. Alle im Rohrnetzwerk verbundenen Zonen geraten in direkten thermischen Austausch miteinander, und die Zonenbilanzen sind untereinander gekoppelt.

Diese Zusammenhänge haben Auswirkungen auf die Newton-Raphson-Methode. Insbesondere die Assemblierung der Jacobi-Matrix muss hierbei besonders sorgfältig erfolgen, um Konvergenzproblemen des Verfahrens vorzubeugen. Alle durch das Rohrnetzwerk gegebenen Kopplungen erzeugen Einträge der schwachbesetzten Jacobimatrix, wie beispielsweise zwischen den Temperaturen und Energiebilanzen unterschiedlicher Zonen eines Netzwerkes in Abbildung 4.

Typische Simulationsfälle können folglich auf beliebig komplexe Besetzungsmuster führen. Die Modellierung von Wandheizelementen beispielsweise stellt direkte Zusammenhänge zwischen Zonentemperaturen und Wandbilanzen her, die zusätzlichen Einträge in den Nebendiagonalblöcken der Matrix entsprechen. Eine manuelle Bestimmung der Jacobi-Besetzung ist nicht mehr allgemeingültig möglich.

Zonenwechselwirkung im Rohrnetzwerk

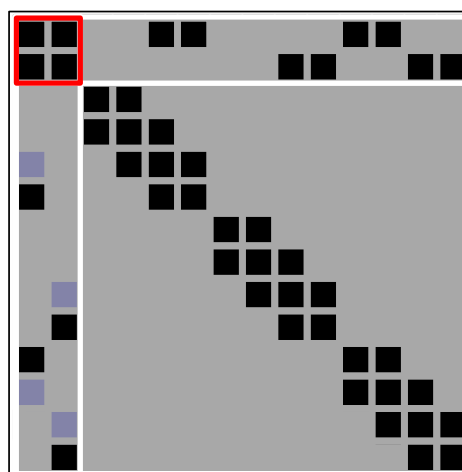


Abbildung 4: Zusätzliche Einträge in der Jacobi-Matrix bei konvektiven Heizkörpern in einem Rohrnetzwerk

Erweiterung 1 – Effiziente Berechnung der Systemfunktion

Die NANDRAD-Modellstruktur besteht aus einem Graphen voneinander abhängiger Modellobjekte. Ein Modellgraph eines Gebäudes ohne Rohrnetzwerk enthält zunächst nur geordnete Zusammenhänge. Ausgehend von gegebenen Eingangsgrößen (konkret Erhaltungsgrößen der Bilanzgleichungen) lassen sich alle Modellobjekte nacheinander auswerten, wobei ein Modellobjekt dabei stets auf vorab von anderen Modellobjekten berechnete und zwischengespeicherte Ergebnisse zugreifen kann.

Modellobjekte in Rohrleitungsnetzwerken sind hingegen zyklisch verbunden. Die Rohrleitungen, welche die Architektur für die Berechnung der Masseströme und Druckverluste definieren, sind bereits zur Modellierungszeit bekannt und werden in ein gemeinsames Modellobjekt gekapselt.

Komplexer gestaltet sich die Berechnung der Fluidtemperaturen. Die Energiebilanzen im Fluid sind nicht auf die Rohrnetzwerke beschränkt,

sondern berücksichtigen Wärmeabgabe an die Umgebung und Wechselwirkung zwischen verschiedenen Rohrsystemen, so zum Beispiel in einem Wärmetauscher. Das System zyklisch gekoppelter Modellobjekte ist folglich erst zur Laufzeit bekannt und enthält viele Elemente. Um dieser Tatsache gerecht zu werden, wurde der Graphenalgorithmus, welcher die Auswertungsreihenfolge berechnet, um eine effiziente Zykluserkennung erweitert. Die Implementierung basiert auf (Bastian et al., 2011), ist jedoch auf die Datenstrukturen im NANDRAD (Modellobjekte) angepasst. Alle Modellobjekte eines Zyklus werden dabei in einer Modellgruppe zusammengefasst, welche nachfolgend wie ein einzelnes Modellobjekt behandelt wird. Dieses Modellgruppen-Objekt vereint die Abhängigkeiten aller der Gruppe zugehörigen Modellobjekte.

Erweiterung 2 – Berechnung von Masse- und Enthalpieströmen im Netzwerk

Die Berechnung von Masseströmen erfolgt unter Berücksichtigung von Druckverlusten in einem eigenen Berechnungsmodell. Die Energiebilanz im Fluid hängt direkt von den zugehörigen Enthalpieströmen ab, aber die Systemgrenzen sind größer als das eigentliche Rohrnetzwerk und zur Modellierungszeit unbekannt. Daher wird die Berechnung der Enthalpieströme unabhängig von der Verteilungsberechnung vorgenommen und durch einen generischen Lösungsalgorithmus ausgeführt.

Rohrnetzwerke erzeugen schwachbesetzte lineare oder nichtlineare Gleichungssysteme. Als geeignetes Lösungsverfahren für solche Problemklassen bewährt sich der KLU-Algorithmus (Davis et al., 2010), der in der Implementierung der KINSOL-Bibliothek (Hindmarsh et al., 2005) integriert ist. Dieses Verfahren wurde für die Rohrverteilungsberechnung und die Lösung der Energiebilanzgleichungen im Fluid adaptiert.

Erweiterung 3 – Bestimmung der Jacobi-Besetzungsstruktur

Die Bestimmung der Jacobi-Matrix bei Anwesenheit von verlustbehafteten Rohrnetzwerken erfolgt automatisiert. Zu diesem Zweck werden die Modellgleichungen in Differentialgleichungen und algebraische Gleichungen eingeteilt. Die Auswertung der Systemfunktion beinhaltet die Lösung aller algebraischen

Zusammenhänge. Heizkörpergleichungen benachbarter Räume 1 und 2 im Rohrnetzwerk sind beispielsweise algebraische Gleichungen. Diese werden bei Auswertung der Systemfunktion gelöst, innerhalb des Systems eliminiert und schaffen so einen transitiven Zusammenhang zwischen Raumtemperatur 1 der Fluidtemperatur am Heizkörpereinlass, der Heizkörpergleichung der Netzwerkvorgängerkomponente zur Raumtemperatur von Raum 2, vergleiche Abbildung 4.

Diese Operation lässt sich durch die Inversion innerhalb einer Block-Matrix abstrahieren: Die algebraischen Gleichungen werden eliminiert und die zugehörigen Zustände als Unbekannte aus dem System entfernt. Das resultierende System enthält alle transitiven Verbindungen, die innerhalb der eliminierten Gleichungen kodiert sind.

In NANDRAD wird die Elimination von Gleichungsblöcken von der Ermittlung der transitiven Hülle begleitet. Hierfür hat sich der Algorithmus von Floyd-Warshall (Floyd, 1962; Warshall, 1962) als effiziente Methode bewährt. Insbesondere erlaubt der Algorithmus die Auswahl einer Teilmenge an Gleichungen, im konkreten Fall aller algebraischen Gleichungsblöcke. Die Ermittlung der Besetzungsstruktur erfolgt auf Basis von Bit-Operationen, die besonders effizient sind. Die originale Besetzung der isolierten Energiebilanzgleichungen für Wände und Räume zusammen mit den Einträgen aus der transitiven Hülle ergeben die Jacobi-Besetzung für das globale ODE-System.

ANWENDUNGSBEISPIEL

Zur Demonstration wurde ein Haus mit zwei bewohnten Etagen identischen Grundrisses gemäß Abbildung 5 und einem darüber liegenden Dachgeschoss generisch erzeugt (Weiß et al., 2018). Alle Zimmer mit Ausnahme des Daches und des Flurs wurden vereinfacht mit je einer Fußbodenheizung versehen. Die Rohrleitung erfolgt durch den Flur von Erdgeschoss und erster Etage, wobei Rohrleitungsverluste berücksichtigt werden. Insgesamt modelliert das Beispiel 13 Zonen, davon 10 beheizte Zonen, 67 Wände mit einer Finite-Volumen Diskretisierung von durchschnittlich 25 Elementen. Dies führt auf insgesamt ca. 1700 Energiebilanzgleichungen.

Die Räume wurden im Sinne einer Referenzlösung mit einer idealen Heizung mit Raumlufttemperaturkontrolle durch einen P-Regler versehen. In einem zweiten Schritt wurde das Heizelement vom Raum in eine Estrich-Schicht der Fußböden versetzt, jedoch immer noch ideal nach der Raumlufttemperatur geregelt. Die abschließende Berechnung modelliert das Heizelement als gewundenen Rohrstrang in einem hydraulischen Netzwerk. Die Raumlufttemperaturregelung erfolgt dabei durch ein Drosselventil vor dem Heizelement (P-Regelung des Strömungswiderstandes bis zu einem sehr hohen Maximalwert). Die benötigte Wassermenge wird durch eine stufenlos regelbare Pumpe mit konstantem Differenzdruck bereitgestellt.

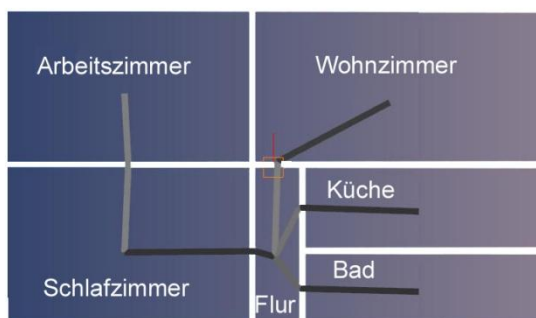


Abbildung 5 Grundriss und Rohrleitung für Erdgeschoss und Obergeschoss

Die sequentielle Berechnung benötigt eine Simulationszeit von ca. 15 Minuten für eine Jahressimulation bei idealer Heizung, ca. 30 Minuten für die Simulation mit integriertem Rohrnetzwerk auf einem Bürorechner. Die Simulationszeiten werden für eine Ingenieuranwendung als akzeptabel eingestuft.

Abbildung 6 zeigt die Raumlufttemperaturen exemplarisch für Arbeitszimmer und Flur der Wohneinheit im Erdgeschoss für die ersten zwei Arbeitswochen des Februars. Das Arbeitszimmer wird in den Nachtzeiten und am Wochenende als nicht belegt eingestuft, die Temperaturvorgaben schwanken zwischen 20°C zu Belegungszeit und 16°C in den Pausenzeiten.

Auffallend ist, dass bei dem Wandheizsystem im Rohrnetzwerk (rote Kurve in Abbildung 6) die Solltemperatur zu Beginn der Wochenarbeitszeit verzögert erreicht wird (zwei bis drei Stunden). Dieser Effekt ist auf die thermische Trägheit der Bodenkonstruktion zurückzuführen. Zur Veran-

schaulichung wurde die Wandheizung ideal ohne Rohrnetzwerk simuliert (grüne Kurve in Abbildung 6). Hier stellt sich das gewünschte minimale Temperaturniveau im Raum zwar pünktlich ein, dabei kommt es allerdings zu einem Überschwingen der Raumlufttemperatur, bis nach zwei bis drei Stunden ebenso die Solltemperatur erreicht wird.

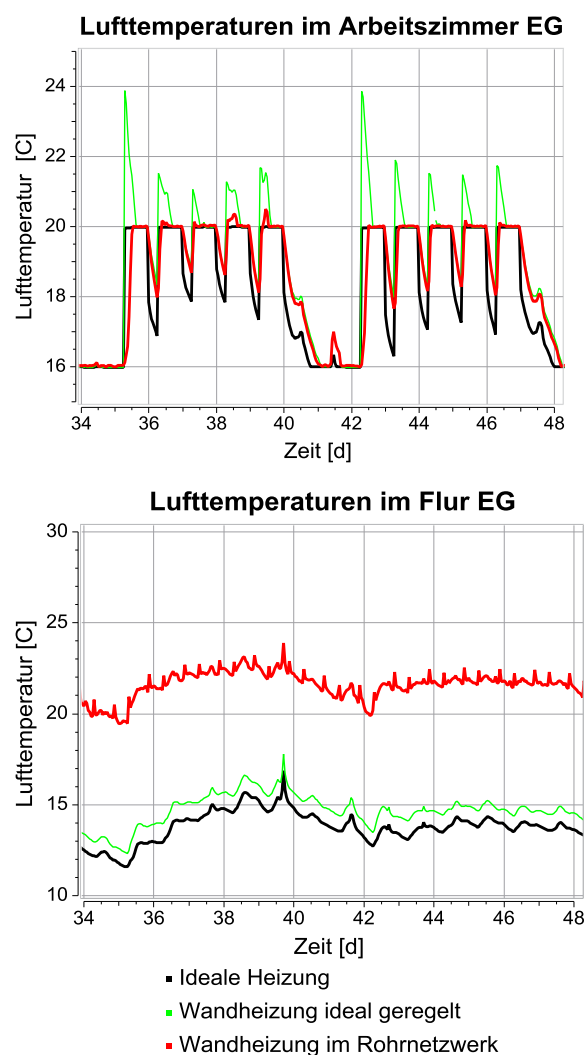


Abbildung 6 Raumlufttemperaturen für verschiedene Simulationsszenarien

Die Einbindung der Heizung in ein hydraulisches Netzwerk liefert hingegen Schranken für die maximale Heizleistung. Dies macht sich in einem geringeren Temperaturanstieg und dem Fehlen des Überschwingens bemerkbar. Zusätzliche Leitungsverluste entstehen durch Wärmeabgabe der Zuleitungsrohre im Flur, ein Effekt, der für die Erhöhung der Flurtemperatur verantwortlich ist, siehe Abbildung 6.

Die beobachteten Effekte werden als realistisch eingeschätzt.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Integration von Rohrnetzwerken in ein dynamisches Gebäudesimulationsmodell erfolgt mit dem Ziel, Wechselwirkungen dynamischer Effekte und thermischer Speichermechanismen im Gebäudebetrieb detailliert abbilden zu können. Vorteile im Vergleich zur Simulationskopplung werden vor allem in einer stabilen und effizienten numerischen Umsetzung gesehen.

Aus der Modellerweiterung ergeben sich verschiedene mögliche Weiterentwicklungen: Die FMI Co-Simulation kann durch alternative Schnittstellen unterstützt werden, die geringere Kopplung aufweisen und eine stabilere Simulation erlauben, so zum Beispiel durch die Kopplung von Erzeuger- und Verbraucher-kreislauf. Die Parallelisierung der Systemfunktion und der Newton-Iteration bietet sich als Ansatz an, eine weitere Verbesserung der Simulationsperformance zu erzielen. Die Erweiterung der verfügbaren Lösungsmethoden, insbesondere die Implementierung eines ILUT-Vorkonditionierers für die dynamischen Bilanzgleichungen bietet Möglichkeiten, die schwache Besetzungsstruktur noch besser zu berücksichtigen und weitere Effizienzgewinne zu erzielen.

DANKSAGUNG

Wir bedanken uns für die vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung gewährte Förderung im Rahmen des Projektes „NANDRAD-PR“, Projektnr. 10.08.18.7-16.31.

LITERATUR

Bastian, J. et al. 2011. Master for co-simulation using FMI. Proc. of the 8th International Modelica Conference, Dresden.

Braun et al. 2017. Solving large-scale Modelica models: new approaches and experimental results using OpenModelica, Modelica Conference 2017, Prag.

Castaldo, L.V. 2018. Uses of dynamic simulation to predict thermal-energy performance of buildings and districts: a review, WIREs Energy Environ. 2018.

Davis, T.A. et al. 2010. Algorithm 907, KLU, A Direct Sparse Solver for Circuit Simulation Problems, ACM Transactions on Mathematical Software 37(3), 2010.

DIN EN ISO 13791 2012. Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik - Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren, 2012.

Floyd, R.W. 1962. Algorithm 97, Communications of the ACM 5, 1962, S. 345.

Hindmarsh, A.C. et al. 2005. SUNDIALS: Suite of Nonlinear and Differential/Algebraic Equation Solvers. ACM Transactions on Mathematical Software 31(3), 2005, S. 363-396.

Nicolai, A. et al. 2011. Towards a semi- generic simulation framework for mass and energy transport in porous materials, Proc. of the 9th Nordic Symposium on Building Physics, Tampere, Finland.

Nicolai, A., et al. 2012. Die Gebäudesimulationsplattform NANDRAD – Physikalisches Modell, Umsetzungskonzept und Technologien im Überblick, BauSIM 2012, Berlin.

Nicolai, A. et al. 2017. Co-Simulation between detailed building energy performance simulation and Modelica HVAC component models, Modelica Conference 2017, Prag.

Paepcke, A. et al. 2014. Anlagenregelung in ODE-Systemen am Beispiel der thermischen Raum- und Gebäudesimulation, BauSIM 2014, Aachen.

Paepcke, A. et al. 2016. Schnittstellen für die Co-Simulationskopplung zwischen Gebäude- und Heizungsanlagensimulation, BauSIM 2016, Dresden.

Paepcke, A. 2017. NANDRAD 1.4 building simulation model, url: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-230427>.

Warshall, S. 1962. A Theorem on Boolean Matrices, Journal of the ACM 9(1), 1962, S. 11–12.

Wetter, M. et al. 2017. New generation computational tools for building and community energy systems, Final Report, IEA EBC Annex 60.

Weiß, D. et al. 2018. Algorithmus zur Aufbereitung generischer Quartiere für die thermische Mehrzonen-Simulation mit dem Gebäudesimulationssolver NANDRAD, BauSIM Konferenz, 2018, Karlsruhe.

SENSITIVITY ANALYSIS OF THE HYGRO-THERMAL SIMULATION MODEL OF A HISTORICAL BUILDING'S FACADE IN A HOT-HUMID CLIMATE

S. Pinich¹, M. Taheri², and A. Mahdavi¹

¹Department of Building Physics and Building Ecology, TU Wien, Vienna, Austria

²arbnco Ltd., Glasgow, United Kingdom

ABSTRACT

This contribution presents a case study regarding the hygro-thermal performance of the exterior brick wall of a historical (temple) building in a hot-humid climate (Thailand), which displays post-retrofit moisture problems. A computational application was used to generate and analyze a hygro-thermal simulation model of the wall. Subsequently, the model was subjected to a systematic sensitivity analysis to identify a subset of the input variables (i.e., material properties), which significantly influence the simulation results (i.e., temperature, humidity, and moisture content). The insights thus obtained can be deployed in the simulation-based identification of hygro-thermally suitable retrofit options.

INTRODUCTION AND BACKGROUND

The occurrence of moisture problems in historical buildings caused by poor retrofit strategies can lead to undesirable consequences, including building component decay, mold growth, poor indoor air quality, corrosion of materials, and structural failure. For decades, finding appropriate solutions for the refurbishment of the historic building façade has been a challenge (i.e. applying different external plasters, paints, coatings, etc.). However, relatively few studies in this area concentrate on the specific circumstances of hot-humid climates, where the occurrence of negative post-retrofit moisture problems is not a rarity.

For the selection of potential retrofit solutions, numeric simulation tools can provide useful support to study hygro-thermal performance of building envelopes. Several numerical tools are

quoted in various publications for prediction of combined heat, air, and moisture transport in building envelopes (see, for example, Othman et al. 2014, Mundt-Petersen and Harderup 2013, Künzle 1995, Mendes et al. 2002, Qinru et al. 2009, Woloszyn and Rode 2008). Moreover, to evaluate retrofit solution possibilities, different energy and thermal performance indicators are used, such as energy use, indoor temperature, etc. Hygro-thermal performance indicators such as water content of the materials represent another group of measures in proposed refurbishment solutions. As such, good knowledge of material related parameters is essential to generate dependable models. Hence, it is important to know the sensitivity of hygro-thermal analysis to the choice of model input data, for instance, the material properties. Sensitivity analysis (SA) allows the identification of those model input parameters, which have the most significant impact on the results (Loucks et al. 2015, Stephan et al. 2013, Tahmasebi and Mahdavi 2012). There are many different SA approaches. Overall, they can be categorized into two groups: local SA and global SA (Othman et al. 2014). Put simply, the local SA explores the changes of model response by varying one parameter, while keeping other parameters constant. Global SA examines the changes of model response by varying all parameters at the same time.

In this context, the present paper includes a case study concerning the hygro-thermal performance of an exterior historical brick wall in the hot-humid climate of Thailand. Thailand is a country with a long history, a great heritage in culture, tradition and language, as well as

historical buildings and artifacts (Bunjerdskul 2014). Given their importance, historical buildings have been maintained and renovated by the government.

The selected historical building in this study serves as a Thai temple and was constructed with traditional techniques of the respective era. Generally, the construction of this and similar buildings was influenced by the location and availability of the materials on the site, as well as the importance of the building (Stephan et al. 2013). A hygro-thermal performance model of the wall was generated and subjected to a SA to identify a subset of the input variables with significant influence on the simulation results.

APPROACH

Case study

The case study of the present contribution is Wat-Niwet-Thammaprawat, a riverine island Buddhist temple, Ayutthaya, Thailand (Figure 1). It was designed by the Architect Joachim Grassi, with the style of an English Gothic church. The building was constructed in 1878, and last refurbished in 2015 (Figure 2). However, the post-retrofit moisture problems can be seen today on the middle and lower part of the walls (Figure 3).

The outside wall of this temple, as a typical Thai traditional temple wall construction from the 19th century, is selected for this study (Watsantachad 2006, Bunjerdskul 2014). The wall construction consists of three main layers, namely lime stucco (0.005 m), lime plaster (0.045 m), and solid clay brick (0.7 m). Figure 4 shows the wall construction detail and the positions considered in the present study (i.e., P1 to P3).



Figure 1: Wat-Niwet-Thammaprawat temple, Ayutthaya, Thailand.



Figure 2: Last refurbishment of the temple's exterior wall in 2015.



Figure 3: Signs of post-retrofit moisture problems.

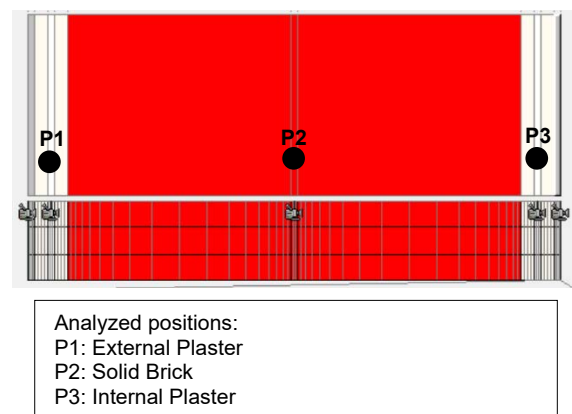


Figure 4: Typical historical Thai wall construction.

Hygro-thermal simulation model

The case study wall construction was simulated in WUFI Pro version 5.3 (WUFI 2018, Künzle 1998). WUFI works based on the discretization of the Künzle model by means of an implicit finite volume scheme. For the numerical solution, WUFI uses the finite volume technique for the spatial discretization of the transport equations, and the fully implicit scheme for the discretization in time. Simulation provides hourly values of temperature, relative humidity, and water content.

The outdoor heat transfer coefficient is calculated by WUFI as a function of wind speed. For the indoor heat transfer coefficient, a constant (default) value is used. The value of short-wave radiation absorptivity corresponds to a bright-colored surface. Ground short-wave reflectivity was set to 0.2 and the adhering fraction of rain to 0.7 (function of the wall inclination). To ensure unidirectional heat and moisture transfer along the x axis, the lower and upper boundaries were defined as perfectly insulated and impermeable.

The assumptions regarding material properties (i.e., lime stucco, lime plaster, and solid clay brick) are based on the material database of WUFI (Table 1). The indoor climate condition was created using a function (Arena and Mantha 2013) provided by WUFI, according to the WTA guideline 6-2-01/E (WTA 2004). Initial conditions in this model included a layer temperature of 25°C and a relative humidity 80%.

The temperature and humidity values required for the calculations were defined based on the actual measured data from a similar building (i.e., The Holy Rosary Church Kalawar, Bangkok, Thailand) in 2016. The outdoor climate was defined based on the the measured data from the Thai Meteorological Department from the year 2016.

Sensitivity analysis of the hygro-thermal simulation model

The aim of the sensitivity analysis is to determine the change in model output data as the result of variations in the model input data. Note that in this study one parameter is changed at a time (local sensitivity analysis). The sensitivity analysis focused on the impact of the choice of material properties on hygro-thermal indicators including water content (%), temperature (°C) and relative humidity (%) at different positions in the wall (see, Figure 4, P1 to P3). The material properties were varied in 6 steps (i.e., $\pm 10\%$, $\pm 20\%$, and $\pm 30\%$) from the initial values presented in Table 1. Altogether, 37 simulation runs (initial model, plus six varying cases for six input parameters) were carried out.

The calculated performance indicators were compared to those of the initial model. For the purpose of comparison, departures from the initial simulation outcomes (i.e., relative deviation and coefficient of variation CV) were calculated.

Table 1: The properties of lime stucco, lime plaster, and solid clay brick as model input parameters

Input variable	Units	Stucco	Plaster	Solid brick
Water absorption coefficient [A]	$\text{Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-0.5}$	0.005	0.05	0.36
Porosity [n]	$\text{m}^3.\text{m}^{-3}$	0.274	0.3	0.31
Density [ρ]	Kg.m^{-3}	1769	1600	1800
Thermal conductivity [λ]	$\text{W.m}^{-1}\text{k}^{-1}$	0.343	0.7	0.6
Specific heat capacity [Cp]	$\text{J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$	840	850	850
Water vapor diffusion resistance factor [μ]	-	310.6	7	15

The input variables were subsequently classified in three groups with low, medium, and high influence on the simulation outcomes. The categorization was done based on *i)* the mean value of relative deviation, and *ii)* the CV. The threshold for the classifications is presented Table 2.

RESULTS AND DISCUSSIONS

We obtained the results presented in this section by performing 37 simulation runs and varying 6 parameters in terms of 6 steps (from -30% to +30%, with intervals of 10%).

In order to classify the parameters with respect to their influence on the water content, temperature, and relative humidity, the statistical indicators were computed at three positions in the middle of each layer in the construction (Figure 4, P1 to P3).

Table 3 presents the calculated mean relative deviation and coefficient of variation (CV) values, averaged over the 6 steps of respective input variable alteration.

Table 2: Threshold of the sensitivity classification based on mean relative deviation and coefficient of variation (CV) values.

Sensitivity class	Thresholds for the sensitivity classification	
	Mean	CV
Low	Mean \leq 0.3	CV \leq 0.7
Medium	0.3 < Mean \leq 0.6	0.7 < CV \leq 1.4
High	Mean > 0.6	CV > 1.4

Table 3: Calculated mean relative deviation and coefficient of variation (CV) values over the 6 steps of respective input variable alteration.

Input variable	Water content		Temperature		Relative humidity	
	Mean	CV	Mean	CV	Mean	CV
Water absorption coefficient [A]	1.73	1.03	0.06	0.87	0.53	0.82
Porosity [n]	0.00	1.91	0.00	2.1	0.00	1.49
Density [ρ]	0.07	0.65	0.04	0.90	0.03	0.57
Thermal conductivity [λ]	0.50	0.87	0.07	0.75	0.31	0.80
Specific heat capacity [Cp]	0.07	0.67	0.04	0.91	0.03	0.63
Water vapor diffusion resistance factor [μ]	0.02	0.86	0.00	0.65	0.81	0.83

Note that the presented values are also averaged over the three positions.

Tables 4 and 5 categorize the input variables with low, medium, and high sensitivities, based on mean relative deviation and CV values calculated in Table 3.

The following observations can be made based on Tables 4 and 5:

- Porosity (n), has a strong effect on all three performance indicators in view of CV. However, it is of lesser influence with respect to the mean relative deviations.

Table 4: Classification of the input parameters with respect to the mean relative deviation.

Sensitivity	Parameter		
	Water Content	Temperature	Relative humidity
Low	n, ρ , Cp	n, ρ , Cp, λ , A, μ	n, ρ , Cp, λ
Medium	λ	-	λ , A
High	A, μ	-	μ

Table 5: Classification of the input parameters with respect to the coefficient of variation CV.

Sensitivity	Parameter		
	Water Content	Temperature	Relative humidity
Low	Cp, ρ	μ	Cp, ρ
Medium	A, λ , μ	Cp, ρ , A, λ	A, λ , μ
High	n	n	n

- The water absorption coefficient (A) and thermal conductivity (λ), are categorized in the medium and high sensitivity classifications based on both statistical indicators (mean deviations and CV).
- Calculated temperatures are less sensitive to all of the above-mentioned material properties, with respect to the mean relative deviations of the results. By looking at the detailed results in each position (Figure 4, P1 to P3), the maximum calculated mean relative deviations in temperature is 0.15 K in interior plaster (i.e., Figure 4, P3), when varying the thermal conductivity (λ) for $\pm 30\%$.
- Water vapor diffusion resistance (μ) has little consequence for temperature calculations. However, it has a strong influence on water content and relative humidity, considering the mean relative deviations. In the classifications based on the CV, μ falls in the medium sensitivity class.
- Density (ρ) and specific heat capacity (C_p) fall in the low-sensitivity class for all performance indicators, except for the temperature with respect to the calculated CVs.

Generally, considering the mean relative deviations, it can be seen from the results that the most influential parameters are the water vapor diffusion resistance factor (μ), the water absorption coefficient (A), and the thermal conductivity (λ).

With respect to the CV of deviations the most influential parameter is porosity (n), followed by water vapor diffusion resistance factor (μ), water absorption coefficient (A), thermal conductivity (λ), specific heat capacity (C_p), and density (ρ).

To provide an example for the distribution of the deviations, Figures 5 and 6 present box plots of the calculated relative deviations of the parameters classified as highly influential with respect to water content (i.e., A and μ), and relative humidity (i.e., μ) in the brick layer (Figure 4, P2).

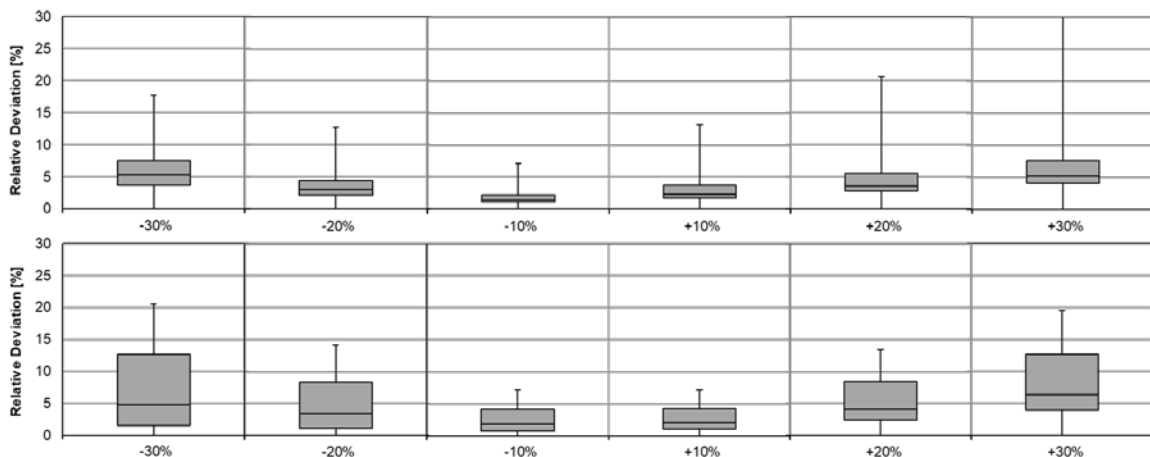


Figure 5: Box plots of relative deviations (from the initial model) of calculated hourly water content values in the brick layer as a result of varying A (Upper chart) and μ (Lower chart).

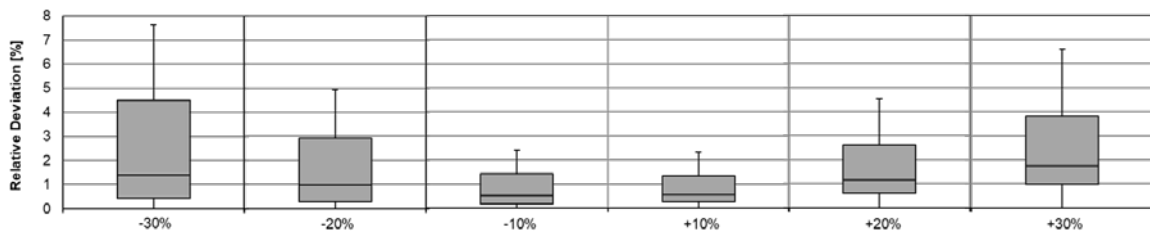


Figure 6: Box plot of relative deviations (from the initial model) of calculated hourly relative humidity in the brick layer as a result of varying μ .

CONCLUSION

The present contribution reports on a case study pertaining to the hygro-thermal performance of the exterior brick wall of a historical temple building in Thailand. The hygro-thermal simulation model of the wall was subjected to a systematic sensitivity analysis to identify a subset of the input variables, which significantly influence the simulation results, including material temperature, water content, and the relative humidity of the air pores in the material. The simulations were carried out for a multilayer Thai historical wall in the hot-humid climate condition. Needless to say, the same model in a different climate conditions could lead to a different classification. In additions, the results obtained in this paper are relative to 0.8 m thick solid (clay brick, lime plaster) wall. Thus, in future efforts, other construction types and configurations will be studied. Moreover, further studies are required to evaluate the sensitivity of the hygro-thermal performance indicators to other material properties, such as water absorption isotherm.

We plan to deploy the generated simulation model to perform hygro-thermal analysis and evaluation of various options (e.g., different external plasters, paints, coating) in order to identify appropriate solutions for the refurbishment of the historical building façade.

REFERENCES

- Arena, L., Mantha, P. 2013. Moisture Research - Optimizing Wall Assemblies. U. S. Department of Energy.
- Bunjerdskul, K. 2014. Changes of slaked lime formula in traditional Thai architectural conservation. Master thesis dissertation. Chulalongkorn University. Thailand.
- Ibrahim, M., Wurtz, E., Biwole, P.H., Achard, P., Sallee, H. 2014. Hygrothermal performance of exterior walls covered with aerogel-based insulating rendering. *Energy and Buildings* 84. 241–251.
- Künzel, H.M. 1995. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. – One- and two-dimensional calculation using simple parameters. IRB Verlag.
- Künzel, H.M. 1998. Effect of interior and exterior insulation on the hygrothermal behavior of exposed walls. *Materials and structures* 31, H. 206, Pages 99-103.
- Mendes, N., Philippi, P.C., Lamberts, R. 2002. A new mathematical method to solve highly coupled equations of heat and mass transfer in porous media, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 45, Issue 3, January 2002, Pages 509–518.
- Mundt-Petersen, S.O., Harderup L. 2013. Validation of a one-dimensional transient heat and moisture calculation tool under real conditions. *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XII International Conference*.
- Othmen, I., Poullain, Ph., Caucheteux, A., Leklou, N. 2013. Sensitivity analysis of the Kunzel model: application to the study of the hygrothermal transfer in a tuffeau wall. *Advanced Computational Methods and Experiments in Heat Transfer XIII* 417.
- Qinru, L., Rao, J., Fazio, P. 2009. Development of HAM tool for building envelope analysis, *Building and Environment*, Volume 44, Issue 5, May 2009, Pages 1065–1073.
- Stephan, E., Caucheteux, A., Cantin, R., Tasca-Guernouti, S., Michel, P. 2013. Sensitivity analysis of an energyplus simulation model of the ambient humidity in an old building. *Proceedings of the 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France*.
- Tahmasebi, F. Mahdavi, A. 2012. Optimization-based simulation model calibration using sensitivity analysis. *IBPSA-CZ. Conference Brno*, 8. a 9. 11.
- Watsantachad, N. 2006. Salts in brick wall. *Journal of the faculty of architecture Silpakorn University. Thailand*.
- Woloszyn, M., Rode, C., 2008. Tools for performance simulation of heat, air and moisture conditions of whole building. *Building simulation*. 1: 5–24.
- WTA-Guideline 6-2-01/E. 2004. *Simulation of Heat and Moisture Transfer*.
- WUFI. 2018. Fraunhofer Institute for Building Physics, Holzkirchen, Germany. Information on http://www.WUFI.de/index_e.html. Last accessed on 20.04.2018.

IV. MODELLIERUNG DES NUTZERVERHALTENS IN GEBÄUDEN

CLUSTERING THE OCCUPANT BEHAVIOR IN RESIDENTIAL BUILDINGS: A METHOD COMPARISON

N. Carbonare^{1,2}, T. Pflug² and A. Wagner¹

¹Fachgebiet Bauphysik und technischer Ausbau, KIT, Karlsruhe, Germany

²Energy efficient buildings, Fraunhofer ISE, Freiburg, Germany

Contact: nicolas.carbonare@ise.fraunhofer.de

ABSTRACT

The aim of this paper is to investigate possible patterns of the occupant behaviour in residential buildings. Measurements were taken in multifamily buildings where several occupant-related variables were recorded. We chose and compared two different clustering methods: whole time series and features clustering (k-means algorithm). The mentioned methods were performed selecting two variables (window opening and indoor temperature), and tested with supervised learning methods. Results suggest that features clustering can perform better than whole time series. The representation of the occupant behaviour through features is meant to be applied in future work regarding the optimization of control strategies in ventilation systems.

INTRODUCTION

The world's increasing energy demand has led in the last twenty years to a raised interest on energy efficiency. The efforts towards the consumption reduction in the residential sector have brought up the retrofit of buildings as a solution in European countries, in which the high air tightness is a characteristic, as it contributes to reduce the heating energy consumption. Within this frame, mechanical ventilation systems gain relevance to maintain a desirable indoor air quality (IAQ) in low-energy residential buildings.

On the other hand, the evaluation of these aforementioned technologies reveals that the

performance is lower than expected in practical applications. It is already clear that the diversity of the occupant plays a key role on this underperformance, generating the so called 'Rebound effect' (Galvin 2014). Besides, one conclusion from the IEA EBC Annex 53 (Polinder et al. 2013) was that taking control of the systems out of the hands of the occupant (i.e. automatic window opening) leads to higher dissatisfaction with the indoor environment. Therefore, the forthcoming technology development should be optimized in order to be compatible to user-defined adjustments in residential buildings.

This paper aims therefore at providing the first steps for a user-orientated control system for mechanical ventilation. As stated in Carbonare et al. (2017), the correct characterization of the user-dependent variables in residential buildings plays a huge role to obtain improvements on the current state-of-the-art. We define a methodology for future research and will be tested on two variables (window opening and indoor temperature), which were already studied by many researchers on the field of building simulation (Calì et al. 2016; D'Oca and Hong 2014; Haldi and Robinson 2009). For reasons of practicality, only the window opening variable will be described, and in the case of the indoor temperature only the results will be presented.

BACKGROUND

Clustering is the process of classifying data into different groups, aiming at finding similarities among them. A cluster is then defined as a

subset of objects in the database that belong to the same group. Similarity is often calculated through distance measures. The main challenges of a clustering process are (Mitsa 2010):

- The attributes that differentiate one cluster from another are unknown
- The data is unlabelled. This means, there is no knowledge on how to distinguish if one object belongs to a certain cluster or another one (except from a priori knowledge provided by domain experts)
- The more data, the more complex the problem becomes
- Algorithms are usually strongly influenced by noisy data, missing values and outliers. Hence the importance of an appropriate pre-processing of the data is highlighted

In the literature review, three main conventional clustering methods were found to be applied for time series clustering, namely shape-based, feature-based and model-based (Aghabozorgi et al. 2015). A shape-based approach means the straightforward comparison of raw time series data (all the points on the same time step are directly compared). In addition, the shape of these objects is matched as well as possible. The shape-based process presents a higher simplicity than the others (since only pre-processing of data is required to perform the clustering), although being usually more computationally expensive due to the number of compared data points. On the other side, a feature-based approach refers to the selection of features that represent as close as possible the characteristics of the time series, reducing the number of data points. The best performing features are usually extracted from the a priori knowledge about the data, as well as from some typical statistical indicators (Guyon and Elisseeff 2003). The main advantage of this method lies on the rapid calculation process and its adaptability to machine learning processes (Guyon et al. 2002). A major drawback could be the potential loss of information, in case of not carefully selecting the features vector. Model-based methods will not be covered in this paper.

In order to cluster data, the distance between the different points must be defined. Regarding the different metrics available for the clustering of time series, several authors have expressed

their opinions about reliability and performance (Iglesias and Kastner 2013; Mitsa 2010). Following the results obtained by Iglesias and Kastner (2013), and due to its widespread use on research activities, the Euclidean distance is selected as the similarity measure for this study. It is defined as the distance between the i^{th} x and y points:

$$D_{eucl}(x, y) = \sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} (x_i - y_i)^2} \quad (1)$$

Analyzing the clustering algorithm selection, researchers established lately that the use of conventional algorithms in the clustering of static data generates results with acceptable quality and efficiency, in terms of time and accuracy (Aghabozorgi et al. 2014). Centroid-based K-Means was selected among different algorithms analyzed on the literature, and it is applied following the K-Means++ application in Raschka (2015). A disadvantage is that the k-means method required the number of clusters as an input, which is typically (and this is no exception) unknown. The elbow method described by Raschka (2015) is also quite popular due to its simplicity. This method consists on the calculation of the percentage of variance explained for every set number of clusters, and to observe in which number of clusters the relative increase of the explained variance by adding a new cluster becomes negligible. Since there is no quantifiable threshold, this method can be combined with other indexes.

The Dunn Index (DI) presents a widely-used measurement technique of cluster validity. The DI was selected on this study because it presents the best performance regarding the k-means clustering procedure (Kovács et al. 2006). The defining equation is then presented:

$$DI = \min_{i=1 \dots n_c} \left\{ \min_{j=i+1 \dots n_c} \left\{ \frac{d(c_i, c_j)}{\max_{k=1 \dots n_c} (diam(c_k))} \right\} \right\} \quad (2)$$

$$d(c_i, c_j) = \min_{x \in c_i, y \in c_j} \{d(x, y)\} \quad (3)$$

$$diam(c_i) = \max_{x, y \in c_i} \{d(x, y)\} \quad (4)$$

where n_c is the number of clusters, $d(x, y)$ the distance between two elements and c_i the centre of each i^{th} cluster. This index compares

directly the distance between clusters (inter-comparison) and the diameter of the clusters (intra-comparison). Therefore, a better clustering configuration means higher values of the Dunn index (larger space among clusters and smaller cluster diameters). The calculation of the DI is usually time consuming and sensitive to a noisy database (Kovács et al. 2006). The chosen implementation of DI compares the distance between the two closest points among clusters (minimum) with the maximum distance between cluster-centroids altogether, which does not collide with single-dwelling clusters whose cluster diameter is zero.

In order to evaluate the quality of the obtained clusters, the task becomes challenging due to the unlabelled data. In this paper a Support Vector Machines classifier (SVM) method is proposed (Hastie et al. 2009), in order to evaluate how a test data adjusts to the training data set. SVM methods are a class of supervised learning algorithms which train the classifier function using labelled data. Given the training data set where each point has a corresponding label, the objective of the problem is to define a hyperplane that separates two points of different classes with a maximal possible margin (the original SVM is defined for two-class classification problems, and in this paper is addressed as a multi-class classification). Since perfect separation between the two classes is often infeasible, errors are allowed through auxiliary variables in the classification of the data that may not be linearly separable. The objective function balances between maximizing the separation margin and minimizing the classification error given an error weight. More about the method can be found in the literature (Raschka 2015).

METHODOLOGY

The data selected corresponds to the measurements in 2012 and 2013 of a high rise building retrofitted to passive house standard in the city of Freiburg, South Germany (Carbonare et al. 2017), in which 27 dwellings were monitored in great detail. Two measured variables from this project were taken, namely window opening and indoor temperature. The year 2013 was used to train the model (6-minute interval), and the data from 2012 as test set (hourly data). This time step mismatch is not

expected to generate a relevant impact on the clustering results. Full year measurements are considered for window opening, while only the winter period (October-April) is taken into account for the indoor temperature, due to its high dependence on the outdoor temperature during summer (direct correlation analysed (Nguyen et al. 2014) – Pearson’s R coefficient = 0.4 for outdoor temperatures below 13°C, and R = 0.91 above 13°C).

Data pre-processing results of utmost importance to improve the performance of the whole procedure, given that clustering is sensitive to noisy data. Several pre-processing methods are presented in the former literature (Aghabozorgi et al. 2015; Mitsa 2010; Raschka 2015). In this case, two variables are handled: one categorical (window opening – binary) and one continuous (indoor temperature). Therefore, they require different treatments. Firstly, using the same rules as developed by Carbonare (et al. 2017), the data corresponding to absence periods was neglected. Since this study considers the clustering of occupant behaviour, it is not the same to consider a window intentionally closed than a window left closed during absence, for example. Secondly, the window opening profiles are processed; the measurements were performed with contacts, which output values are 1 (closed window) and 0 (open window). However, for visualization simplicity, the values are switched (0 to closed and 1 to open). The removal of faulty data (sensor errors) in all variables is besides carried out. In the case of the indoor temperature profiles, no further data pre-processing was performed. Finally, the data is standardized by z-score normalization. The module applied is provided by the Python sklearn package (Pedregosa et al. 2011), for each data point X_i :

$$X_{i,norm} = \frac{X_i - \mu_X}{\sigma_X} \quad (5)$$

with μ_X as the mean of variable X in the training data set, and σ_X as their respective standard deviation. The key point of data normalization in data science is to analyse relative ranges of all measurements, instead of an absolute value. Thus, each data point is characterized by its distance to the sample mean of the training data set.

After pre-processing the data, the clustering takes place. For each variable, a shape-based

and a feature-based clustering are performed. As mentioned above, a K-means clustering algorithm is applied, using the Euclidean distance as similarity metric. When performing a whole time series clustering, the time steps considered are only the ones in which all the analysed dwellings have data (considering also the pre-processing). This reduces the total of 87,590 points to approximately 24,500 points. On the other hand, the feature clustering enables the utilization of every available data point for each variable.

A different set of features for each variable must be defined, depending on its characteristics. Following the literature (Haben et al. 2015), some features regarding *a priori* knowledge from the occupant behaviour in residential buildings were selected. Another set of features regarding statistical analysis of time series is also included, namely mean, standard deviation, skewness and kurtosis (Hastie et al. 2009). More specific, trend and seasonality indicators regarding time series decomposition (Wang et al. 2005) were also considered. Table 1 summarizes the feature selection (\bar{X} means the mean value of the corresponding variable in each case).

Table 1: Proposed features and their suitability for each variable. WO = Window opening, IT = Indoor temperature

Feature	Variable	Definition
Weekend score (WKS)	WO	$\frac{\bar{X}_{Weekday} - \bar{X}_{Weekend}}{\bar{X}}$
Seasonal score (SS)	WO	$\frac{\bar{X}_{Summer} - \bar{X}_{Winter}}{\bar{X}}$
Day-night score (DNS)	WO - IT	$\frac{\bar{X}_{Day} - \bar{X}_{Night}}{\bar{X}}$
Hour change score (HCS)	WO - IT	$\frac{\sum_{h=0}^{8760} \bar{X}_{h+1} - \bar{X}_h}{\bar{X}_h}$
Average state changes score (ACS)	WO	$\frac{\sum_{h=0}^{8760} Stchanges_h}{8760 \text{ hs}}$

Not knowing if the proposed features will be representative for the whole data set, a comparative method is proposed, in order to obtain the optimal feature combination regarding dimensionality, representativeness and cluster structuring. The process follows these steps:

1. For a determined combination of features, calculate the minimal number of clusters that explain a selected threshold of 80% of the variance (K-Means algorithm), aiming at the minimization of the within cluster sum of squares (Raschka 2015)
2. Calculate the Dunn index for the different number of clusters between the obtained minimum and an imposed limit of 12 clusters, as it was considered sensible for 27 dwellings
3. Selection of the best combination of features and number of clusters which result in the highest DI – there is a preference for *a priori* defined features (Guyon and Elisseeff 2003)
4. Analysis of results and final selection of optimal combination considering DI, number of clusters and number of features involved
5. Labelling of the data with the resulting cluster structure and observe how the test data set fits to it through SVM. Comparison of results. Presentation of the obtained cluster structure.

ANALYSIS OF RESULTS

Features clustering

In this publication, the sleeping room of each dwelling is taken as example, due to the clarity of the measured profiles. The detailed procedure is described using the window opening variable of the measured dwellings. After calculating iteratively the DI for all the possible combinations of number of clusters and features, the analysis of the results was performed. The highest DI values are presented in Table 2 and later analyzed in detail to determine the optimal feature combination.

Table 2: Best feature combinations for window opening on the sleeping room

Features	Clusters	Dunn index
Mean, Seasonality, Skewness	3	1.8373
Mean, HCS.	8	1.8025
Mean, HCS, ACS.	8	1.7924
Mean, Skewness	3	1.7773
Mean, Seasonality, Trend, Skewness	3	1.7706

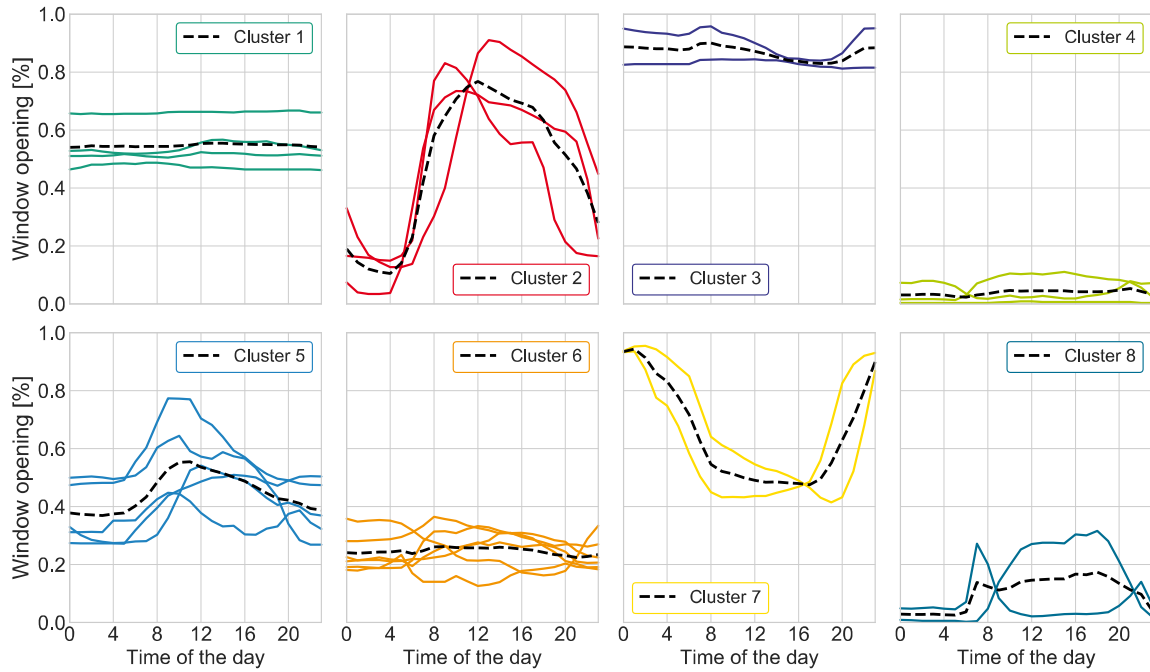


Figure 1: Mean profile sleeping room window opening - Cluster structure after optimal features clustering with training dataset. Dotted line: mean profile of the cluster.

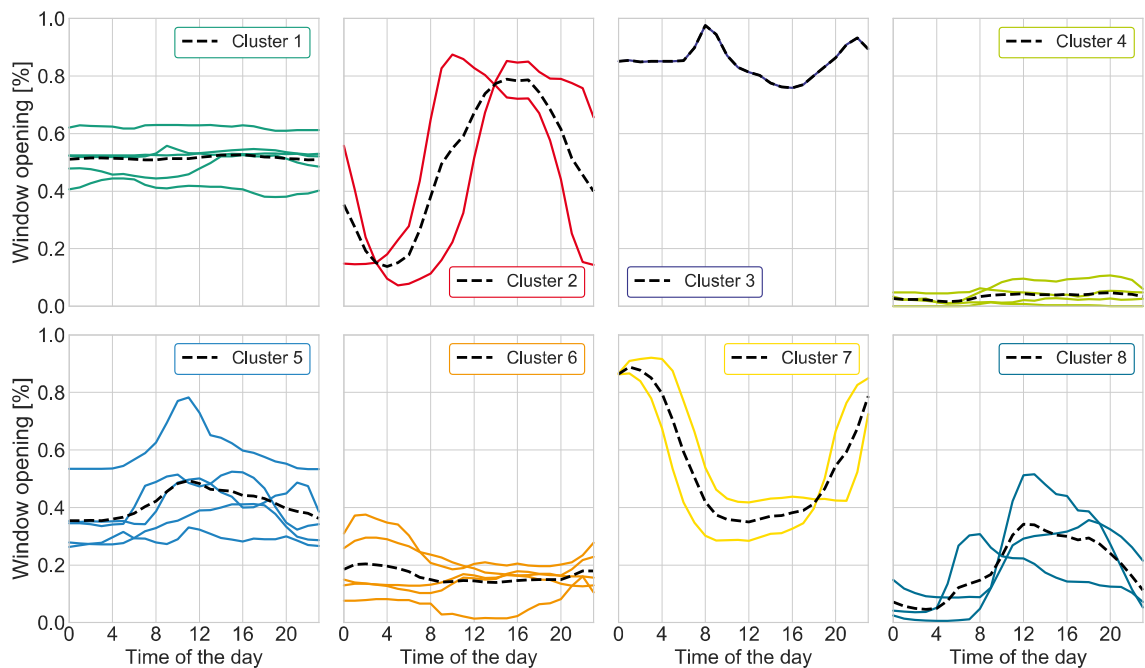


Figure 2: Mean profile sleeping room window opening - Cluster structure with optimal features after SVM with test dataset. Dotted line: mean profile of the cluster.

The five best DI are close to each other; hence it is reasonable to analyze them in further detail. Since simplicity is a desired condition, the models with fewer features are preferred. The models resulting in three clusters were discarded, since a threshold of 4 clusters has been defined, as it is the point in which the explained variance stops improving significantly. Both lasting models from Table 2 generate the same cluster structure in this case, represented on Figure 1. Therefore, the model with the mean and hour change score as key features is selected.

As it can be observed, the resulting clusters have distinctive characteristics:

- Cluster 1: almost no changes during the day, with around 50% window opening (probably open in warm days and closed during cold ones).
- Cluster 2: open during day and closed while sleeping.
- Cluster 3: almost always constantly open.
- Cluster 4: almost always constantly closed.

- Cluster 5: same concept of cluster 2 but with smaller changes between day and night profile, and higher night mean.
- Cluster 6: small changes and low mean value without a typical profile.
- Cluster 7: closed during day and open while sleeping.
- Cluster 8: similar to cluster 2 but with lower mean values during day.

Moreover, we applied data labelling and SVM classification process to the test set, to observe to what extent the conformed structure in the previous step is valid. Figure 2 shows how the test set is classified.

19 out of 27 dwellings were classified at the same category (70 %). Nevertheless, it must be said that those who changed category presented as well a different profile, which are more compatible to the newly assigned clusters. The description of the obtained clusters with the training data set suits the new ones obtained with the test data set. The DI for the test set is 1.5086, which is lower than the original one as expected. Nevertheless it is still higher in comparison with the obtained ones in the iterative process of feature selection.

In the case of the indoor temperature, the resulting cluster structure consists of four clusters, with a DI of 1.5930. The optimal combination of features selected was also mean and hour change, as it was ranked in first place.

The classification of the test set data with SVM showed a correct classification rate of 77.78 % and a DI of 1.3478.

Whole time series clustering

On the contrary, the whole time series clustering method presents significantly lower DI values. After computing the values iteratively, the highest DI (1.0525) was reported with a six-cluster structure, which corresponds to 50% of the variance explained. Figure 3 shows the resulting cluster composition of the whole time series with six clusters and K-means algorithm.

Comparing the results, two cluster structures are identical (Clusters 2 and 7 from Figure 1 against Clusters 3 and 5 in Figure 3), while Cluster 7 from features in Figure 2 was split third was here split into two single-dwelling categories in Figure 3 (Clusters 3 and 4). The two remaining clusters present significant differences among each other, although the Cluster 1 has a tendency to present lower mean values, and Cluster 6 results difficult to understand.

In addition, indoor temperature clustered with the whole-time-series method obtains also a four-cluster structure, with a DI of 1.1996 and 68 % of variance explained. A minimum threshold of 80% of the variance explained in this procedure would have shown a higher number of clusters (16 and 9 for window opening and indoor temperature) and lower DI (0.8452 and 0.7695) respectively.

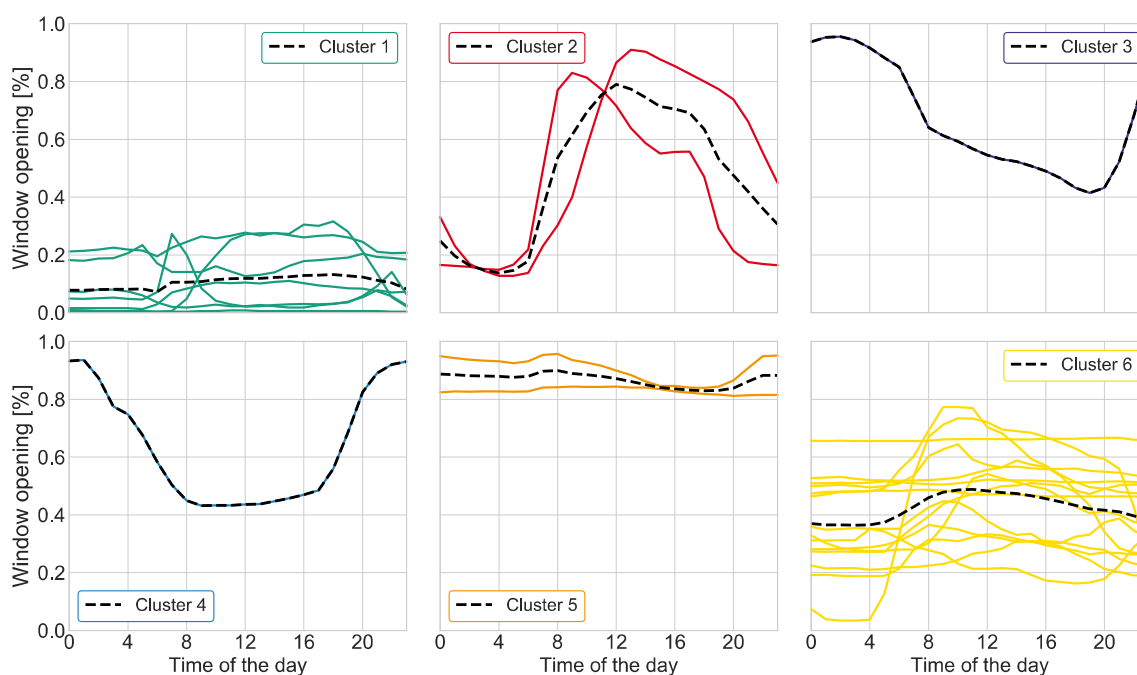


Figure 3: Mean profile sleeping room window opening - Cluster structure after whole time series clustering with training dataset. Dotted line: mean profile of the cluster.

Method comparison

Figure 4 shows the percentage of variance explained for both methods in increasing number of clusters. As it can be seen, the complexity of the data structure while analyzing a complete time series prevents the formation of an “elbow” that defines the potential optimal number of clusters and the variance steadily increases. The optimal features method shows a negligible explained variance increase from five to nine clusters. This justifies that the whole time series method presents weaknesses when obtaining a reliable structure of clusters.

Table 3: Dunn index (DI) for every clustering method

Variable	Window opening	Indoor temperature
Features training set	1.8025	1.5930
Features test set	1.5026	1.3478
Whole series training set	1.0525	1.1996
Whole series test set	0.9423	0.8727

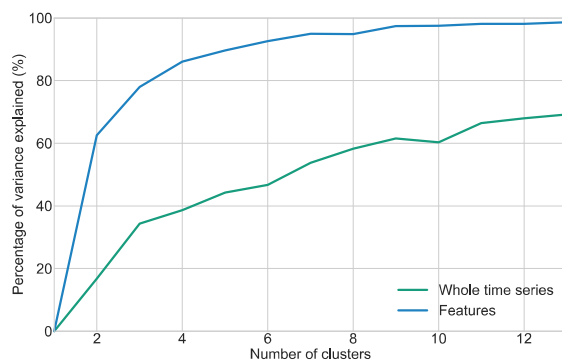


Figure 4: Percentage of variance explained with increasing number of clusters.

In addition, Table 3 summarizes the obtained Dunn indexes, which are significantly higher while dealing with feature methods than with whole time series clustering. This indicator proves that the cluster structure obtained with the optimal features is better posed than the results obtained while comparing each step of the time series, taking into account the above cluster structure described for each method. The same procedure will be applied in future work to other variables regarding the occupant behavior to simplify its representation.

Summarizing, the features clustering method presents advantages over the whole time series clustering at the following points:

- Clustering accuracy and prediction, given by the higher DI in train and test data sets
- Variables representation, as the variance explained is significantly higher with lower number of clusters
- Computational resources, due to dimensionality reduction by feature extraction

CONCLUSION AND SUMMARY

The representation of different variables of the occupant behavior in residential buildings was successfully carried out through features definition. We found different optimal combinations of these features, in connection with the type of room and the variable analyzed. Regarding window opening and indoor temperature on a sleeping room, the combination of the mean and the hour change score previously defined showed the best performance.

Features clustering process presents better results than whole time series clustering when representing the some aspects of the occupant behavior in residential buildings. Better clusters shapes could be found when carrying out an optimization of previously selected features, identified through higher Dunn indexes, higher percentage of variance explained and at the same time well-defined profiles with a manageable number of features and clusters. The application of resulting cluster structures to test sets resulted in smaller DI, but within acceptable values. The representation of different variables of the occupant behavior through selected features is therefore acceptable for future applications. The next research step involves the application of the methodology to different building data, to discuss its transferability by repeating the analysis with other data sets.

Different features following the presented methodology will be selected in future research for other variables of the occupant behavior, in order to perform a multi-variable characterization process, with the objective of developing new control strategies for ventilation systems under consideration of the occupant behavior in low-energy residential buildings.

ACKNOWLEDGEMENT

The study presented in this paper is funded by the German Ministry of Economics and Labour BMWi under the reference FKZ03ET1401A.

REFERENCES

- Aghabozorgi, S., A. Seyed Shirkorshidi, and T. Ying Wah. 2015. "Time-series clustering – A decade review." *Information Systems* 53:16–38.
- Aghabozorgi, S., T. Ying Wah, T. Herawan, H. A. Jalab, M. A. Shaygan, and A. Jalali. 2014. "A hybrid algorithm for clustering of time series data based on affinity search technique." *The Scientific World Journal*:562194.
- Calì, D., R. K. Andersen, D. Müller, and B. W. Olesen. 2016. "Analysis of occupants' behavior related to the use of windows in German households." *Building and Environment* 103:54–69.
- Carbonare, N., F. Coydon, A. Dinkel, and C. Bongs. 2017. "The influence of occupancy behaviour on the performance of mechanical ventilation systems regarding energy consumption and IAQ." *Proceedings of 38th AIVC Conference*.
- D'Oca, S., and T. Hong. 2014. "A data-mining approach to discover patterns of window opening and closing behavior in offices." *Building and Environment* 82:726–739.
- Galvin, R. 2014. "Making the 'rebound effect' more useful for performance evaluation of thermal retrofits of existing homes: Defining the 'energy savings deficit' and the 'energy performance gap'." *Energy and Buildings* 69:515–524.
- Guyon, I., and A. Elisseeff. 2003. "An Introduction to Variable and Feature Selection." *Journal of Machine Learning Research* 3:1157–1182.
- Guyon, I., J. Weston, S. Barnhill, and V. Vapnik. 2002. "Gene Selection for Cancer Classification using Support Vector Machines." *Machine Learning* 46:389–422.
- Haben, S., C. Singleton, and P. Grindrod. 2015. "Analysis and Clustering of Residential Customers Energy Behavioral Demand Using Smart Meter Data.":1–19.
- Haldi, F., and D. Robinson. 2009. "Interactions with window openings by office occupants." *Building and Environment* 44:2378–2395.
- Hastie, T., R. Tibshirani, and J. Friedman. 2009. *The Elements of Statistical Learning. Data Mining, Inference, and Prediction*, Springer New York: USA.
- Iglesias, F., and W. Kastner. 2013. "Analysis of Similarity Measures in Times Series Clustering for the Discovery of Building Energy Patterns." *Energies* 6:579–597.
- Kovács, F., C. Legány, and A. Babos. 2006. "Cluster Validity Measurement Techniques."
- Mitsa, T. 2010, *Temporal Data Mining*, Chapman & Hall/CRC: USA.
- Pedregosa, F., G. Varoquax, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, M. Blondel, P. Prettenhofer, R. Weiss, V. Dubourg, J. Vanderplas, A. Passos, D. Cournapeau, M. Brucher, M. Perrot, and É. Duchesnay. 2011. "Scikit-learn: Machine Learning in Python." *Journal of Machine Learning Research* 12:2825–2830.
- Polinder, H., M. Schweiker, A. van der Aa, K. Schakib-Ekbatan, V. Fabi, R. K. Andersen, N. Morishita, C. Wang, S. P. Corgnati, P. Heiselberg, D. Yan, B. W. Olesen, T. Bednar, and A. Wagner. 2013, *IEA EBC Annex 53 - Occupant behavior and modeling - Separate Document Volume II. Total energy use in buildings analysis and evaluation methods*.
- Raschka, S. 2015, *Python Machine Learning. Unlock deeper insights into machine learning with this vital guide to cutting-edge predictive analytics*, Packt Publishing: Birmingham B3 2PB, UK.
- Wang, X., K. A. Smith, and R. J. Hyndman. 2005. "Dimension Reduction for Clustering Time Series Using Global Characteristics." *ICCS 2005* 3516:792–795.

USING A “MRT MANIKIN” TO ASSESS LOCAL AND OVERALL THERMAL SENSATION AND COMFORT

A. Ganji Kheybari¹, K. Boudier¹ and S. Hoffmann¹

¹Faculty of civil engineering, TU Kaiserslautern, Kaiserslautern, Germany

ABSTRACT

For most indoor environments providing thermal comfort for occupants is indispensable. This paper discusses the use of a virtual manikin to calculate mean radiant temperature (MRT) for single body parts of a building occupant. This “MRT manikin” can be used in a detailed physiology, sensation and comfort model in combination with building simulation. The local MRT values are calculated using the 3D geometry of a (seated) manikin with 16 cuboids which represent the body segments in the physiology model. The physiology model considers all heat transfer processes including longwave radiation and calculates body temperatures which then allow for a detailed assessment of thermal sensation and comfort.

The investigation of this method is carried out by comparing the calculated local MRT values using different ways of generating view factors.

The innovation of the suggested “(Wo)Man in Cube” method consists of 1. flexibility in using a geometrically complex manikin for detailed comfort calculation, 2. reducing the computation time of view factor calculation by providing a pre-calculated relation between the manikin and its immediate environment (Cube), and 3. the opportunity of placing the “(Wo)Man in Cube” in any building environment and in any simulation tool.

INTRODUCTION

Thermal comfort plays a growing role in the built environment. In order to optimize thermal comfort and identify possible energy savings, it is important to accurately evaluate the radiative

heat exchange between the human body and its environment.

Conventionally, Fanger’s PMV (Predicted Mean Vote) index (Fanger 1970) has been suggested by standards such as (Norm DIN EN ISO 7730 :2006-05) and (ASHRAE 2013) to predict thermal comfort. PMV along with PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) are the most used comfort indices. However, PMV is not suitable for non-uniform spaces (Tanabe et al. 2000) and under transient conditions. Since ambient conditions in buildings are often asymmetrical (e.g. large glazing areas, radiant heating/cooling panels), a detailed physiology, sensation and comfort model “PhySCo” (Boudier et al.) is recommended. The model is capable of calculating local sensation and comfort values for different body parts as well as overall sensation and overall comfort for any asymmetric environment and transient condition.

The physiology model of PhySCo takes local MRT values for 16 body segments and hence a detailed view factor calculation is required to get accurate local MRT values. The view factors were calculated with different methods. The local MRT values for every body part were determined considering the position, posture, and the shape of the human body for radiative heat exchange with the environment.

The final objective of this paper was to present a new approach, called “(Wo)Man in Cube”, to calculate specific local mean radiant temperatures which can be used with PhySCo to calculate detailed thermal indices.

First, by comparing the local MRT values, this study discusses the impact of different methods

of computing view factors which are essential for MRT calculation. Second, the impact of different calculated local MRTs on final results was investigated using a comparison between A) local and overall sensation (using 16 local MRT values) and B) PMV index (using overall MRT value) for a seated occupant.

For this study, three different scenarios have been defined to assess the impact of radiant heat transfer on human thermal comfort in different asymmetric indoor environments.

BASIC DEFINITIONS

Radiative heat exchange of the human body

Humans need to maintain their body core temperature at around 37 °C, whether in cold or hot environments. Beside convection and conduction, the human body is in direct radiative heat exchange with surrounding surfaces.

The following equation can be used to calculate the radiative heat flux in Watts ($q_{1 \rightarrow 2}$ and $q_{2 \rightarrow 1}$) between the human body and any other surface in the enclosure.

$$q_{1 \rightarrow 2} = \varepsilon * \sigma_s * F_{1 \rightarrow 2} * A_1 * (T_1^4 - T_2^4) = q_{2 \rightarrow 1} \quad (1)$$

This equation considers the emissivity of the object ε (normally 0.99 for the environment surfaces), the Stefan-Boltzmann constant $\sigma_s = 5.67 * 10^{-8} \text{ (}\frac{W}{m^2 K^4}\text{)}$, the view factor $F_{1 \rightarrow 2}$, the effective radiation area A (m^2) and the surface temperatures T (K).

Mean radiant temperature (MRT); calculation methods and limitations

Basically, the mean radiant temperature (MRT), is defined as the uniform temperature of an imaginary enclosure in which the radiant heat transfer from the human body is equal to the radiant heat transfer in the actual non-uniform enclosure (ASHRAE 2013). For the calculation of MRT the following equation has been used:

$$\bar{T}_r^4 = T_1^4 F_{p-1} + T_2^4 F_{p-2} + \dots + T_N^4 F_{p-N} \quad (2)$$

\bar{T}_r : mean radiant temperature, K

T_N : temperature of surrounding surface N, K

F_{p-N} : view factor between a person and surface N

Equation 2 shows that the surface temperatures, the specific position of the human body in the room, the posture, and shape of the body

influence local MRT values. All these parameters are addressed in the view factor which is often neglected in simplified methods.

By using a “plane radiant temperature” approach, it is possible to calculate the overall MRT (\bar{T}_r) based on different sets of “plane radiant temperature” for ceilings, walls and floors (t_{pr}) in six directions and posture (seated or standing) (ASHRAE 2013). In the following equation for a standing person, even the specific position of the occupant and the size and geometry of the building surfaces are completely neglected.

$$\bar{T}_r = \{0.08[t_{pr}(\text{up}) + t_{pr}(\text{down})] + 0.23[t_{pr}(\text{right}) + t_{pr}(\text{left})] + 0.35[t_{pr}(\text{front}) + t_{pr}(\text{back})]\} / [2(0.08 + 0.23 + 0.35)] \quad (3)$$

In the other method introduced by (Cannistraro et al. 1991) and adopted by (Norm DIN EN ISO 7726:2002-04), for seated or standing subjects calculating the view factor is possible by using graphs proposed by (Fanger 1982) and (ASHRAE 2009) and equations which can take into account the distances of the subject to any surface in the room without computing the view factor.

Moreover, in common building simulation software, a sphere (e.g. In Trnsys) or a cuboid (e.g. In ESP-r) at the position of the occupants was considered to calculate the overall MRT. Even though the software benefits the view factor calculation, shape and posture of the occupant are still neglected, which might have a significant influence on the MRT calculation.

Regardless of the accuracy of the reviewed methods, only one overall MRT can be calculated, which is not sufficient for the detailed physiology, sensation and comfort model.

Considering the human body

Regarding the required inputs for a detailed model, local values of MRT should be calculated by considering the 3D geometry of the building, and the specific posture, position, and shape of occupants. Enhancing the calculation of the local MRTs, this paper uses the 3D geometry of a simplified seated manikin to compute accurate view factors with different approaches (Ray-tracing, analytical and adaptive integration, and combined) where all the body segments have been considered.

In addition, it is important to take into account the impact of the shape and temperature of other body parts during the calculation of their local MRT.

Therefore, considering the human body surface temperature (skin or/and clothing) is essential. Body surface temperature can differ for different body segments based on room temperature, clothing, metabolic rate, humidity, velocity, and MRT itself. This means that getting an accurate body surface temperature requires an iterative process.

View factor calculation methods

The calculation of high-resolution radiant energy exchange requires computing the view factors with an appropriate method based on the 3D geometry of the room surfaces and a manikin.

The view factor is the fraction of energy exiting an isothermal and diffuse surface through emission, which is directly received by another surface. The view factors depend only on geometry and they can be calculated by analytical expressions or computationally by tracing random rays and samples. View factor calculations are often computationally intensive and computation time can increase exponentially with the number of surfaces involved (Walton 2002).

Semi-Analytic method (using View3D)

The view factors can be calculated by using the NIST (National Institute of Standards and Technology) open source program, View3D. 3D geometries of the building and manikin should be described in terms of simple triangles or planar polygons for adaptive integration algorithm to calculate the view factors (Walton, Pye). The adaptive integration method has significant advantages in accuracy and even in computational speed (Walton 2002). Since all the manikin's surfaces (body segments) are already part of the geometry within the room, the resultant view factor considers their presence. This method is thus the most fitting view factor generation method to calculate local MRTs of body parts. Consequently, the View3D method was used as a baseline in this study.

Ray-tracing method (by ESP-r)

Ray-tracing is a method of solving a problem by tracing the path of a random ray or particle within space. Ray-tracing has been used to compute

the view factor for radiative heat exchange in many studies (Semlitsch 2010).

View factor computations in ESP-r are carried out by Ray-tracing calculations between the MRT sensors and surfaces in the zone (Hand 2015). This process places a grid on each surface in order to compute how much that surface views the other surrounding surfaces. The computation time and the accuracy of the resultant view factor in this method are highly dependent on the grid and patch division size.

A cuboid sensor can be defined in an ESP-r model at the occupant's specific position and the user can apply a maximum of six sensors within the thermal zone.

Using one cuboid sensor is not sufficient to calculate the local MRT values for human body parts. To avoid this limitation, a simplified manikin (seated) composed of 16 cuboid sensors was defined. Every cuboid has specific dimensions and position representing a human body part. Consequently, the resultant view factor can be used to calculate the local MRTs. Due to the original definition of MRT sensors in ESP-r, this view factor calculation still neglects the presence of other sensors (other body segments). This issue also affects the effective radiative area of each body part.

(Wo)Man in Cube

To overcome the shortcoming described above, this paper proposes a combined approach called "(Wo)Man in Cube". This way, it is possible to benefit from ESP-r's ability to generate view factors and calculate proper local MRTs. Consequently, the local MRTs can be used in PhySCo to evaluate the thermal condition in building simulation smoothly.

In this proposed approach, the MRT calculation for local body parts is based on two view factor files. The first one (Vf_1) is the calculated view factor in ESP-r which describes the relation between an imaginary three MRT cube assemblage (at the position of the human body in the room) and the surrounding room surfaces. The dimension of this assemblage was defined to fully envelop the seated simplified manikin. The second view factor file (Vf_2) contains the relation of human body surfaces (simplified manikin) within the three MRT cubes (bounding box) which is computed in View3D. Since the position of the

manikin inside the three MRT cube assemblage is always fixed, the second view factor can be generated once to be used many times. Using this method, the position and orientation of the human body is very flexible in the ESP-r model and can be easily defined by locating the three MRT cubes in a desired position within the room.

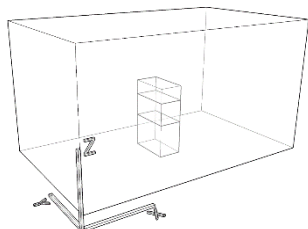


Figure 1: Three MRT cube assemblage in ESP-r model for a seated person

Based on the environmental condition in ESP-r, the radiative impact of the room surface temperatures is calculated on the surfaces of imaginary three MRT cube assemblage by using the first view factor file (Vf1). These new surface temperatures and the second view factor file (Vf2) from View3D can be used to calculate the local MRT values for body parts.

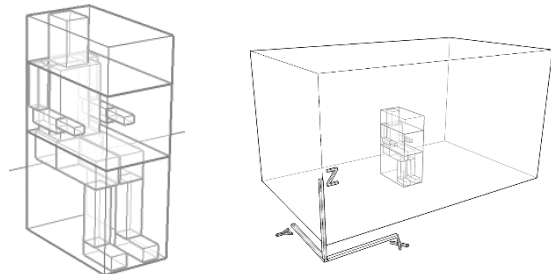


Figure 2: Three MRT cube assemblage and the seated manikin inside, left: how it is modelled in View3D, right: how the manikin is located in relation to the room geometry in ESP-r

The “(Wo)Man in Cube” approach to calculate a detailed view factor for the 16 body segments can be used for other building simulation tools with any arbitrary manikin as well.

Thermal sensation and comfort

In addition to MRT, other environmental parameters such as dry bulb temperature, air velocity, relative humidity and solar influence affect the thermal sensation and comfort of humans. Personal parameters such as clothing value and activity level (metabolic rate) should also be considered.

The detailed Physiology, Sensation and Comfort model (Boudier et al.) deals with asymmetric

environments and transient conditions. It takes local MRT values for body parts into account and calculates the skin and core temperatures as well as local and overall sensation and comfort. The physiology model is a 65-node model based on prominent experimental and numerical work in the field of thermo-regulatory models for the human body over the last 5 decades (Stolwijk 1971; Tanabe et al. 2002; Huizenga et al. 2001; Hoffmann et al. 2012). This model describes the physiological processes through a complex set of equations in which the human body is represented by 16 body parts, each of them consisting of 4 layers (core, muscle, fat, skin) and a blood flow node. This model is linked to a model based on an empirical study (Zhang et al. 2010c) (Zhang et al. 2010a) (Zhang et al. 2010b) which calculates local sensation and comfort for each body segment along with overall sensation and comfort.

METHODS

This study compares different methods of computing view factors to calculate the local MRT values in order to evaluate thermal sensation in different environments. For this reason, the same 3D geometry for the room and a simplified seated manikin was used with three different scenarios for environmental conditions.

Room geometry

A cuboid with a length of 5.0 m, width of 3.0 m and height of 2.7 m was used for the calculations in ESP-r and View3D without any window or opening.

Simplified manikin geometry

Due to the simplification of the manikin, the total surface area is higher than the reference human body (Du Bois surface area 1.87 m²). However, since the main focus of this study is on the comparison of the results by applying methods to the same geometry, this limitation (overestimation) does not impact our comparative study.

Because the presence of other sensors is neglected, using multiple sensors in ESP-r requires a modification of the effective radiative area based on the area fraction of the surface which is covered or exposed (0 to 1) to the other surfaces.

This modification has been implemented by defining some coefficients called PSS (Position Specific Sensor) specifically defined for each MRT cuboid sensor in ESP-r.

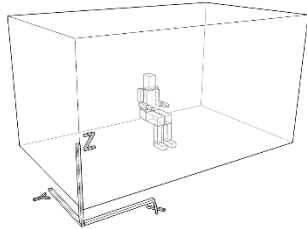


Figure 3: Simplified Manikin based on 16 MRT sensors in the middle of the room as it is modeled in ESP-r and View3D

Scenarios

In this study, three different scenarios were defined to simulate asymmetric indoor environments including a room with a chilled wall, a heated floor, and a chilled ceiling.

For all scenarios, the room temperature is assumed to be 24°C constantly. This air temperature can provide a neutral condition (Zhao et al. 2014) in combination with the chosen clothing level of 0.6 clo (light summer clothing) and an activity level of 1.2 met (70 W/m²) for sedentary office work (filing) (ASHRAE 2013). In the base scenario (S0) the surface temperature of all surrounding surfaces (walls, ceiling, floor) was set to 24°C. Figure 4 shows the three scenarios, with their specific surface temperatures for the wall (10°C), floor (35°C), and ceiling (15°C) while all the other surfaces are at 24°C.

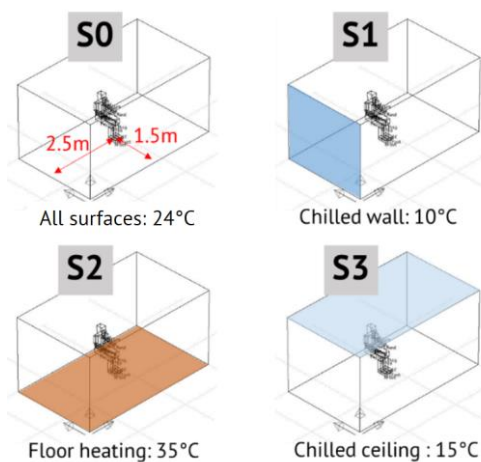


Figure 4: S0: General scenario, all surfaces 24 °C, S1: Chilled wall on the right side of a manikin (10°C), S2: Floor heating (35°C), S3: Chilled ceiling (15°C)

Basically, the thermophysiology model considers environmental conditions as different “phases”

and it requires a “warm-up” phase to set up all the thermoregulatory mechanisms and reach a steady state. Table 1 shows the “warm-up” phase and the “main phase” conditions. Local MRT values for body parts were calculated based on different scenarios in order to be used in PhysCo. Other parameters are assumed the same for “warm-up” and “main” phase.

Table 1: Thermophysiology simulation parameters

Phase	Duration	Metabolic rate	Air velocity	Humidity	Clothing	Air temperature	Scenarios Local MRT
Warm up	480 min	70 W/m ²	0 m/s	50 %	0.6 clo	24°C	S0
Main	480 min	70 w/m ²	0 m/s	50 %	0.6 clo	24°C	S1 S2 S3

Calculation methods of local MRT

In this paper, different methods were used to compute view factors by using a simplified manikin and calculating the local MRT values for body parts. At step one, the calculated local MRTs based on different view factor computing methods were compared. The view factor file generated in View3D has been considered the baseline.

At step two, the detailed thermal sensation results which are calculated based on different local MRTs (the outcome of step 1) were compared to investigate the influence of different methods. These results are also compared with a common PMV index (which uses one overall value for MRT) to finally assess the impact of using an MRT manikin (and local MRTs for body parts) in building simulation tools on thermal comfort evaluations.

In order to calculate PMV, two different overall MRT values were used; the estimated value based on the plane radiant temperature in six directions (as described in “plane radiant temperature” approach), and the calculated overall MRT which is an area weighted average of the local MRTs of body parts.

RESULTS

The results in this study contain 1) the comparison of calculated local MRTs for body parts, and 2) the comparison of thermal sensation for different conditions.

I. Comparison of local MRTs

Figure 5 depicts the calculated results of local MRTs for 16 body parts based on different view factors. The local MRTs based on the view factors generated in View3D are considered the most accurate results (as a baseline). Local MRTs based on ESP-r view factors were calculated with and without using the PSS coefficients. Another set of results are calculated using the proposed approach “(Wo)Man in Cube”. Three graphs represent three specific scenarios for different environmental conditions (S1, S2, and S3).

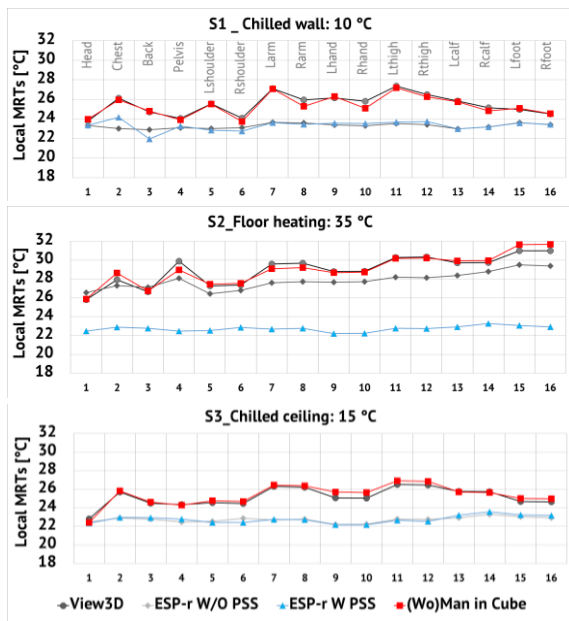


Figure 5: Comparison of calculated local MRTs with different methods for different scenarios, for 16 body parts

II. Comparison of thermal sensation

In Figure 6 the results of simulation in the PhySCo model are depicted over the “warm up” and “main phase” period with different scenarios. The local sensation is the sensation of the human body in terms of being warm or cold. Sensation can be classified on a sensation scale ranging from -4 (very cold) to +4 (very hot) by defining -/+3 (cold/hot), -/+2 (cool/warm), -/+1 (slightly cool/warm) and 0 (neutral).

i. Local sensation values

The graphs show local sensation values for head, chest, shoulders, and feet for S1, S2, S3.

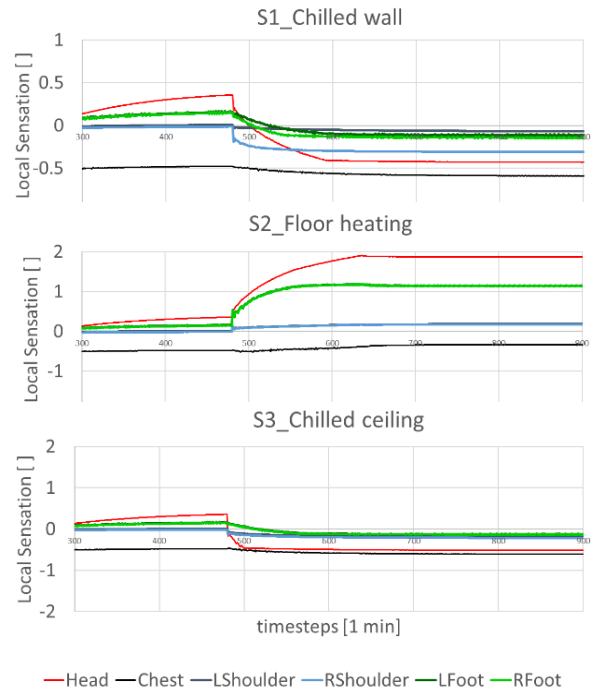


Figure 6: Comparison of local sensation values for different scenarios, timesteps from 300 to 900

ii. Comparison of local sensation, overall sensation, and PMV

Table 2 and Table 3 compare the local and overall sensation values with PMV for the calculation methods View3D and “(Wo)Man in Cube”.

Table 2: Warm up phase, results are from minute 360 in the warm-up phase (total 480 min)

Phase	Local Sensation (Head)		Overall sensation		PMV	
	View3D	(Wo)Man In Cube	View3D	(Wo)Man In Cube	View3D	(Wo)Man In Cube
Warm up	0.25	0.25	-0.44	-0.44	0.23	0.23

Table 3: Comparison of Local sensation of head, overall sensation and PMV (at timestep 900 min)

Scenario	Local sensation of head		Overall sensation		PMV	
	View3D	(Wo)Man In Cube	View3D	(Wo)Man In Cube	View3D	(Wo)Man In Cube
S1	-0.44	-0.43	-0.41	-0.41	0.14	0.13
S2	1.84	1.87	0.88	0.86	0.59	0.59
S3	-0.5	-0.52	-0.45	-0.44	0.11	0.12

III. Comparison of PMV, local and overall sensation (MRT ESP-r W PSS)

Table 4 shows the comfort condition during the warm-up phase. Table 5 compares the PMV index (derived based on a conventional method that uses overall MRT) with local and overall sensation (using local MRTs based on the view factor calculated in ESP-r).

Table 4: Warm-up phase, results at TS 360 min, during the warm-up phase (total duration 480 min)

Phase	Local Sensation (head)	Overall Sensation	PMV
warm up	-0.44	-0.48	-0.04

Table 5: Comparison of PMV with local sensation of head and overall sensation (at TS 900 min)

Scenario	PMV		Local sensation of head	Overall sensation
	estimated overall MRT	overall MRT ESP-r W PSS	local MRTs ESP-r W PSS	
S1	-0.33	-0.13	-0.52	-0.48
S2	0.13	0.45	1.58	0.9
S3	-0.20	-0.20	-0.57	-0.53

DISCUSSION

Comparison of local MRTs

The graph for S1 shows that the newly introduced approach “(Wo)Man in Cube” matches well with the baseline (View3D). The graph shows the expected deviations for the left and right body parts (0.6 to 0.8 K). The MRT values might be around 2 K higher than the ESP-r results, due to the influence of other body parts’ surface temperature being neglected.

In scenario S2, the “(Wo)Man in Cube” approach matches with the baseline of View3D. As expected the feet show higher MRT values than the other body parts.

For the scenario S3, the results are consistent with what we expected. The MRT value for the head is the lowest value compared to the other values for both lines “(Wo)Man in Cube” and “View3D”.

Generally, the calculation of local MRT values with the “(Wo)Man in Cube” approach is appropriate since it is well aligned with the baseline.

Comparison of thermal sensations

i. Local sensation values

All the sensation values were located around -1 (slightly cool) to +2 (warm). No extreme conditions appear while the dry bulb temperature and surface temperatures are kept at 24 °C (apart from the scenarios). This was cited close to a neutral state with a clothing value of 0.6 and an activity level of 1.2 (Zhao et al. 2014).

For scenario S1, the graph shows the deviation of sensation values between the left and right side of shoulders and feet, which confirms the findings of the MRT values. Also, the head sensation value shows a big drop, based on the assumption that the head MRT sensor has a big

surface area exposed to the wall. However, the chest MRT sensor has a small surface area (exposed to the chilled wall), thus showing a small drop over time.

The results for scenario S2 show promising results as the feet sensation values show an increase of 1 point on the sensation scale. The head receives more radiation (based on size and exposed area), and hence shows a higher increase of local sensation. Also, the fact that the head is sensitive to a warm environment (Zhang et al. 2010c) could influence this significant increase in local sensation. The chest and the shoulders show a slight increase of local sensation as they are not very exposed.

Scenario S3 shows the expected results. The sensation values of the head dropped, as it is located close to the ceiling. As in S2, the values for the chest show only a small drop compared to the other body parts. Also for the shoulder and feet, the drop is smaller compared to the head even if these body parts receive smaller MRT values. These body parts are not as sensitive to thermal influence as the main body parts like the chest, back, and pelvis (Zhang et al. 2010c).

ii. Comparison of local and overall sensation and PMV

In the warm-up phase the comparison between the methods Direct “View3D” and “(Wo)Man in Cube” match well. In the main phase(s) some small deviations appear for all estimated sensations in the table comparing the “View3D” method and “(Wo)Man in Cube” approach. These are negligible as they are still close to each other. More focus should be put on the comparison of overall sensation and PMV.

As we compare the overall sensation with the PMV the results always show deviations. Especially for the scenarios with cooling (S1 and S3), the PMV is still in a positive neutral range, whereas the overall sensation is also in a neutral state but on the negative side. For S2, the overall sensation is close to slightly warm and the PMV is still neutral. But the local sensation of the head is 1.84/1.87, which is close to warm (+2) on the sensation scale.

iii. Comparison of PMV, local and overall sensation (MRT ESP-r W PSS)

The comparison between the observed PMV values with different methods supports the argument that posture and view factors play a role in the calculation of local MRTs. We can especially see differences for the cases of S1 and S2. The overall sensation shows more extreme values in the directions of cold (S1, S3) and warm (S2). That could be due to the fact that the PhySCo model considers the driving factors of local disturbing votes in the sensation model. But overall sensation values are all neutral, except for S3 where the floor heating lead to the overall body state being slightly warm at 0.9. The local sensation of the head shows a slightly warm to warm value of 1.58. That could be because the head is very sensitive to warm conditions. These issues are not considered in the PMV values.

This data must be interpreted with caution because for the ESP-r W PSS values no surface temperature is mentioned.

CONCLUSION

Comparing the results, using an MRT manikin to calculate local MRT values significantly improves the evaluation of thermal comfort in an asymmetric environment.

MRT values play an important role in the calculation of comfort, and the determination of local MRT values is an influential factor. With the knowledge of local thermal sensation and comfort, energy savings and thermal comfort condition can potentially be increased at the same time by adjusting the condition of the most uncomfortable body parts with low energy solutions (such as decentralized systems).

OUTLOOK

The “(Wo)Man in Cube” approach can facilitate thermal sensation and comfort evaluation for indoor or outdoor environment, through direct implementation in a building simulation tool, where essential inputs of detailed comfort model can be calculated dynamically for different human body shapes and postures.

Overall, thermal comfort modeling in combination with a detailed local MRT calculation for different body parts with building simulation will help us to better understand human thermal comfort. Additionally, the opportunities for energy savings when using local decentralized devices for heating and cooling can be taken into account.

These can be used for adjusting the HVAC central dead band in building simulations.

REFERENCES

- ASHRAE (Ed.) (2009): ASHRAE Fundamentals. Thermal Comfort. ASHRAE.
- ASHRAE (Ed.) (2013): ANSI/ASHRAE Standard 55-2013. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE.
- Boudier, Katharina; Fiorentini, Massimo; Hoffmann, Sabine; Kalyanam, Raghuram; Kokogiannakis, Gergios: Coupling a thermal comfort model with building simulation for user comfort and energy efficiency. In : Proceedings of the Central European Symposium on Building Physics (CESBP) and BauSIM, Dresden, Germany, September 2016, pp. 481–487.
- Cannistraro, G.; Rizzo, G.; Franzitta, G. (1991): Algorithms for the calculation of the mean projected area factors of seated and standing persons. In *Special Issue on Thermal Comfort Standards* 17 (3), pp. 221–230. DOI: 10.1016/0378-7788(91)90109-G.
- Norm DIN EN ISO 7726:2002-04, 2002 - 04: Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities.
- Norm DIN EN ISO 7730:2006-05, Mai 2006: Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005.
- Fanger, P. O. (1970): Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. New York, N.Y.: McGraw-Hill.
- Fanger, P. O. (1982): Thermal Comfort. Malabar, FL: Robert E. Krieger.
- Hand, Jon William (2015): Strategies for Deploying Virtual Representations of the Built Environment (aka The ESP-r Cookbook).
- Hoffmann, Sabine; Jedek, Christoph; Arens, Edward (2012): Assessing thermal comfort near glass facades with new tools. BEST 3 Building Enclosure Science, UC Berkeley, Center for the Built Environment.
- Huizenga, Charlie; Zhang; Hui; Arens, Edward (2001): A model of human physiology and

- comfort for assessing complex thermal environments. *Building and Environmental Performance Simulation: Current State and Future Issues*. In *Building and Environment* 36 (6), pp. 691–699. DOI: 10.1016/S0360-1323(00)00061-5.
- Semlitsch, Bernhard (2010): Advanced Ray Tracing Techniques for Simulation of Thermal Radiation in Fluids. MSc Thesis. TU Wien, Wien. Institut für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung (E322).
- Stolwijk, J.A.J. (1971): A mathematical model of physiological temperature regulation in man. NASA Contractor report, NASA CR-1855. Washington, D.C.
- Tanabe, Shin-ichi; Kobayashi, Kozo; Nakano, Junta; Ozeki, Yoshiichi; Konishi, Masaaki (2002): Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD). In *Special Issue on Thermal Comfort Standards* 34 (6), pp. 637–646. DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00014-2.
- Tanabe, Shin-ichi; Narita, Chie; Ozeki, Yoshiichi; Konishi, Masaaki (2000): Effective radiation area of human body calculated by a numerical simulation. In *Energy and Buildings* 32. DOI: 10.1016/S0378-7788(00)00045-1.
- Walton, George (2002): Calculation of Obstructed View Factors by Adaptive Integration. NISTIR 6925. In *NIST Interagency/Internal Report (NISTIR)* November.
- Walton, George; Pye, John: View3D. Edited by Sourceforge. Available online at <http://view3d.sourceforge.net/>, checked on 4/24/2018.
- Zhang, Hui; Arens, Edward; Huizenga, Charlie; Han, Taeyoung (2010a): Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part II: Local comfort of individual body parts. In *1st International Symposium on Sustainable Healthy Buildings* 45 (2), pp. 389–398. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.06.015.
- Zhang, Hui; Arens, Edward; Huizenga, Charlie; Han, Taeyoung (2010b): Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part III: Whole-body sensation and comfort. In *1st International Symposium on Sustainable Healthy Buildings* 45 (2), pp. 399–410. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.06.020.
- Zhang, Hui; Arens, Edward; Huizenga, Charlie; Han, Taeyoung (2010c): Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part I: Local sensation of individual body parts. In *1st International Symposium on Sustainable Healthy Buildings* 45 (2), pp. 380–388. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.06.018.
- Zhao, Yin; Zhang, Hui; Arens, Edward A.; Zhao, Qianchuan (2014): Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part IV. Adaptive neutral setpoints and smoothed whole-body sensation model. In *Fifty Year Anniversary for Building and Environment* 72, pp. 300–308. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.11.004.

HUMAN AGENTS IN BUILDING MODELLING: BETWEEN DÉJÀ VU AND EPIPHANY

A. Mahdavi¹

¹Department of Building Physics and Building Ecology TU Wien, Austria

ABSTRACT

Explanatory models of people's perception and behaviour provide the basis for a rational approach to the definition of desirable indoor environmental conditions in buildings. But we do not possess definitive instances of such models. Moreover, they come in different degrees of detail and sophistication. Nevertheless, a cursory look at related theoretical work reveals a recurrent pattern. This suggests that, despite their multifariousness, models of environmental perception and evaluation may share some essential features. To pursue this possibility via consideration of a few instances of such models is not only of interest from the historical point of view. Rather, it could also facilitate an intuitive understanding of the nature of indoor-environmentally relevant human requirements relevant to the indoor environment.

INTRODUCTION

Scientific models of buildings' performance must account for people's presence, requirements, and behaviour. Models must also address the spatio-temporal distribution of inhabitants in buildings and their performance-relevant passive and active influences. Naturally, target indoor conditions (important as input information for building performance models), are expected to be formulated based on people's needs and preferences.

Explanatory models of people's perception and behaviour provide, amongst other things, the basis for a rational approach to the definition of desirable indoor environmental conditions in buildings. But we do not possess definitive instances of these models. Moreover, they come

in different degrees of detail and sophistication. However, a cursory inspection of high-level descriptions of such models – as formulated over the last century – reveals a recurrent pattern. Aside from invoking a kind of déjà vu feeling, this recurrence suggests that, despite their palpable differences, models of environmental perception and evaluation may share elements of an underlying logic. The present contribution pursues this possibility via consideration of a few instances of such models. These are not only of interest from the historical angle, but could also provide application-oriented building professionals with an intuitive and useful entry toward understanding the underlying logic of human requirements as relevant to indoor environmental conditions.

THEORIES AND APPROACHES

Motivation

Numerous attempts have been made in the past to explain and model human perception and behaviour. It is not possible here to meaningfully cover even a fraction of such efforts. Nonetheless, a selected few are alluded to in following, as they can exemplify a certain thread in scientifically motivated explanatory patterns of human perception and behaviour (a thread to which the *déjà vu* notion in the present contribution's title refers). Reflecting on this thread can contribute to a fruitful conceptual framework and related ideas (the *epiphany* bit in the title) toward the unification and generalization of individual scientific findings in this domain. Moreover, it can translate those findings from the realm of pure science to the discussions of regulatory and normative tools

that could aid professionals engaged in the design and management of the built environment.

Psychophysics

Presumably, the provision of adequate indoor environmental conditions could be viewed as an engineering problem. In that case, it would be quite natural to look for the physical constituents of psychological reality. In this context, psychophysics has been a classical source of ideas in knowledge-based environmental design approaches. As early as in 1860s, Gustav Theodor Fechner was interested in the relationship between the psychologically relevant inner world and the physically grounded outer world (Fechner 1966). Psychophysics is primarily concerned with human capabilities to detect and discriminate stimuli and estimate their values (Grondin 2016). Of special relevance is the Weber's law, which suggests that the minimum necessary magnitude difference ($\Delta\phi$) between two stimuli to distinguish them is a function of their magnitude (ϕ):

$$\Delta\phi = K\phi$$

K, the Weber fraction, is assumed to be a constant, but it is valid for a limited range of sensory input. For instance, for low values, Weber law needs to be amended with an additive constant term, which is meant to capture the sensory noise impact.

A central concern in psychophysics pertains to the relationship between the magnitudes of physical stimuli and their perceived intensity (see Figure 1). Fechner suggested that this relationship is logarithmic. The so-called psychophysical law is intended to capture this relationship.

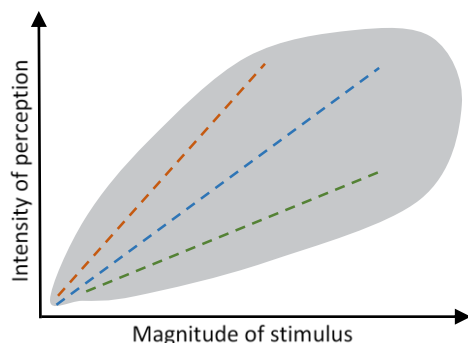


Figure 1: Schematic illustration of the relationship between the magnitude of physical stimuli and the strength of the subjective experience.

According to Stevens (1961), the relationship between the intensities of subjective sensations (S) and physical stimuli (ϕ) can be expressed in terms of a power function (Steven's power law):

$$S = K\phi^N$$

Here, K is a constant and the exponent N depends on the given sensory modality. N=1 implies a linear relationship, N<1 a logarithmic one, and N>1 an exponential one.

Stevens also distinguished between prothetic and metathetic sensory continua (Stevens 1975, Grondin 2016). Whereas the former represents an additive physiological process (e.g., increase in brightness), the latter involves a substitution (e.g., change of colour).

Human Ecology

Ecology may be defined as the scientific discipline that deals with the relationships between organisms and their surrounding world. Accordingly, human ecology may be simply defined as the ecology of the Homo sapiens. There are many traditions and associated approaches to human ecology. For the purpose of the present discussion, we focus on the "Vienna School of Human Ecology" and a couple of its useful conceptual instruments (Knötig 1992a, 1992b; Mahdavi 2016, 2015a, 1998a, 1998b, 1996a, 1996b, 1996c, Mahdavi and Kumar 1996).

Construction and operation of buildings may be viewed as an integral part of the totality of largely regulatory operations initiated by human beings as they interact with their surrounding world. Human ecology offers a useful way of thinking about these interactions via a number of concepts. Thereby, a central pair of concepts involves:

- i. the human beings' *ecological potency*;
- ii. the surrounding world's *ecological valency* (Knötig 1992a; Mahdavi 1996b).

Stated in simple terms, *ecological potency* refers to a dynamic human repertoire of capabilities and means of dealing (i.e., coping and interacting) with the surrounding world. On the other hand, *ecological valency* denotes the totality of that surrounding world's characteristics (resources, possibilities, opportunities, challenges, risks, hazards, pitfalls) as it relates

to, confronts, or accommodates the human ecological potency repertoire. Note that this latter concept (*ecological valency*) was essentially dealt with in (Uexküll 1920) and is also akin to – though not identical with – the Gibson's concept of *affordance* (Gibson 1977, 1979), which will be discussed later.

Given this conceptual framework, we can describe the main consideration in human ecology as the complex and dynamic relationships between the ecological potency of human beings and the ecological valency of their surrounding world. We can thus broadly characterize the entire building construction and operation endeavour in human ecological terms: Buildings are constructed and maintained with the (implicit or explicit) intention to favourably influence the relationship between people's ecological potency and the ecological valency of their surrounding world. Provision of desirable occupancy conditions, or in other words, maintaining a high degree of "habitability" may be thus seen as the main objective of building activity.

Evaluating the degree of the habitability of the built environment is another problem that can benefit from a second pair of human ecology concepts, which concerns the relationships between people and their surroundings. Thereby a high-level distinction is made between the *material-energetic* and *information-related* aspects of these relationships (Knötig 1992a; Mahdavi 2016, 1992, 1996a). The *material-energetic* aspect refers to the assumption that no entity, state, or process exists unless some amount of matter/energy is involved. The information-related aspect refers to the assumption that matter and energy have a certain distribution in space and time, which can be represented in terms of a structure (or a pattern). An information content can be correlated with this structure.

The relevance of this pair of concepts to the present discussion becomes clear if we ask ourselves how the habitability of the built environment is to be measured. An important component of this judgment lies in people's subjective experiences and opinions. We can argue that such subjective evaluation processes of the built environment involve both the material-energetic and the information-related

aspects of the relationships between inhabitants and the built environment.

A common approach to "operationalize" such evaluation processes in planning and operating involves the use of "psycho-physical" scales (see the previous psychophysics discussion). The idea is that exposure to various levels of physical (material-energetic) stimuli translate – in a more or less predictable way – into corresponding subjective experiences. For example, exposure to increasing levels of sound intensity are said to translate into an experience of increased loudness and associated stress (annoyance). But psychophysical scales have been shown to be debatable. It would be highly problematic to postulate a deterministic relationship between measurable environmental factors and occupants' subjective experiences.

People's evaluative responses may be easier to describe and predict in exposure situations dominated by the material-energetic aspect of the environmental relationships. In extreme cases of high-intensity exposure, the necessity for protective regulations is self-evident due to the obvious health hazards for the involved individuals (e.g., irreversible physical damage to the organism). It is, thus, not surprising that most efforts toward predicting the outcome of human evaluation processes have focused on the identification of a measurable material-energetic scale (such as sound pressure level) to which subjective judgments (such as the degree of annoyance) are postulated to correlate. However, the impact of internal information processing on the degree of expressed dissatisfaction associated with various energetic levels of exposure has been frequently and convincingly reported in previous studies (Mahdavi 2011a, 2011b, 1996a, 1996b). For example, in one experiment, two demographically similar groups of participants provided significantly different assessments of the same acoustical event (recorded white noise). Participants in the first group, who were told the recording was of a waterfall, judged it much more favourably than the second group, who was told the recording was of a factory. People's attitude toward the alleged source of an acoustical event clearly influenced their evaluation of the exposure, despite the absence of any objective difference in the nature of the event (Mahdavi 2011a). In another experiment (Schönpflug 1981), participants were exposed to

white noise of different intensity while performing certain tasks (time estimations). The participants who received positive feedback about their performance ranked the same acoustical exposure as less annoying than those who received negative feedback concerning their performance. But the feedback messages were manipulated and did not reflect the true performance. Hence, their effect on participants' subjective evaluation of the noise exposure situation could not be explained in terms of an acoustically induced impairment. Rather, the explanation had to do with the nature of the information processing that was triggered by the combined effect of acoustical exposure and negative feedback. The degree of annoyance due to noise was apparently higher, once it was identified as the reason for one's (alleged) failure.

Such experiments imply that subjective evaluations are not at all fully determined by energetic descriptors of the environmental exposure.

Ecological psychology

The interactions between living beings and their surroundings has been an important topic in perceptual cognitive, and environmental psychology. An influential line of inquiry in this area goes back to the psychologist Gibson in general and his notion of "affordance" in particular (Gibson 1977). According to Gibson, "affordances of the environment are what it offers the animal, what it provides or furnishes" (Gibson 1979, p. 127). Gibson's affordance is not dependent of a specific individual's recognition of it. Yet it is suggested to be identified by individuals according to their needs. Perception of affordances and initiation of actions are connected. As such, animals (specifically, humans) tend to intervene in their surroundings and modify their affordances, such that they better match their needs. The conceptual background of Gibson's work display similarities to earlier views formulated by Uexküll (1920). However, the latter does not postulate the existence of affordances independent of their representations ("Umwelt").

Affordance and related terms have been used in other fields such as human-computer-interaction and industrial design (Norman 2013). Hence, similar to the concepts of ecological potency and

valency (Knötig 1992a; Mahdavi 1996b), affordance may be also applied to the environmental and architectural domains. Thereby, building design decisions and actual interventions (including control actions) within indoor environments could be suggested to enhance the respective repertoire of affordances, or to bring about a better match between inhabitants' ecological potency and valency.

Biosemiotics

Semiotics is commonly associated with theory of signs and how they function. A tradition in biosemiotics refers back to Peirce's version of semiotics (Buchler 1955) and his general sign triad, which comprises a sign vehicle (physical expression of a sign), its object (i.e., what it points to), and the interpret (the agent that extract's the sign's meaning). Important for the present discussion is specifically the transformation of objects and events in the world into elements of "meaning" in animals' perspectival representations of their surroundings. This transformation is critical to the understanding of living organisms' behaviour. As Hoffmeyer (1993) suggests,

"... most of what happens between animals themselves or between animals and their environment is triggered by or carried by stimuli which, from a physico-chemical point of view, are negligible when set against the volume of matter and energy thus activated. To take an example: a dog weighing one hundred pounds suddenly dashes off at top speed. Now obviously there is a physical and chemical account for the dog's muscle contractions biochemically, that still does not truly explain this phenomenon. It would be truer to say that the dog has received a message, namely the scent of another dog. The other dog is, in fact, a message. Messages can initiate events which have no rational connection with the physical and chemical elements of which the message is comprised." (Hoffmeyer 1993, p. 46).

Entities acquire "meaning" in that they play a role in different organisms' "Umwelt". Living beings' interactions with objects in the world render them carriers of meaning in the respective subjective instances of "Umwelt" (Uexküll 1982).

The Umwelt of an organism can be said to involve a dynamic distillation of critical processes

and events in that organism's surrounding world in terms of an internal representation or a pattern constituted by signs, i.e., a part of a "horizontal" semiotic network or a semiosphere: "a population ... has to master a set of signs, of a visual, acoustic, olfactory, tactile, and chemical nature, by means of which it can control its survival in the semiosphere." (Hoffmeyer 1993, p. 59).

Homeostasis and cybernetics

Biological systems operate under highly dynamic conditions (both within and outside organisms). To maintain stable (homeostatic) conditions (equilibrium), regulatory processes are needed. Toward this end, multiple variables must be kept within specific ranges. Central to the thermal regime is the body energy balance and core temperature, but homeostasis pertains to many other variables, such as blood glucose, iron, copper, and calcium levels, blood oxygen content and arterial blood pressure, sodium and potassium concentrations. Homeostatic mechanisms control these variables so as to avoid and remedy departures from organisms' optimal states.

Homeostasis typically refers to regulatory processes in biological systems (Cannon 1926, 1932). The underlying logic, however, can be also realized in technological systems. Quasi-homeostatic control processes in technological systems (such as thermostats) are commonly addressed in cybernetics (Wiener 1948, Ashby 1956). However, cybernetics may be applicable also to cognitive, social, and informational (e.g., digital) systems. In cybernetics terms, a system's actions influence its environments and the resulting environmental change is reflected back to the system via feedback. In a loop-like, recurrent, and adaptive manner, cybernetic systems move from action to monitoring of changes, their evaluation in view of desirable outcomes, and actions again.

Neurophysiology and cognition

The kinds of cybernetic control mechanisms implemented in machines require no mental processes. Likewise, the myriad of homeostatic processes in living organisms are not necessarily accompanied by conscious cognitive phenomena. Even single-cell organisms display self-regulatory behaviour. But the relationship between regulatory physiological processes and

mental processes in biological systems endowed with awareness are of utmost interest in the discussions pertaining to animals' and humans' well-being. Ultimately, effective indoor environment control requires the knowledge of how inhabitants perceive their surroundings, how they evaluate the prevailing conditions, what drives them to instantiate a (conscious) regulatory action, and how they judge the successes of such action. Insights into these matters maybe gained from the research in the field of evolutionary neurobiology.

Living beings must maintain body chemistries in ranges critical to health and survival. To understand the related issues, the concept of "biological value" (Damasio 2010) can be highly illuminating. Values are best understood in the context of the organisms' desire to survive and the human brain's occupation with and prediction of behavioural patterns that benefit life (and thus should be rewarded) and those that impend life (and should be thus punished). This observation provides a context to view findings in neuroscience, which mention certain chemical molecules (such as dopamine, serotonin, oxytocin, vasopressin) in connection to the notion of biological value, due to their association with the states of reward and punishment.

According to Damasio (2010), natural selection – guided by the healthy survival of the organism as the paramount value – has brought about the homeostasis apparatus. Preferable homeostasis states are of course context-dependent, but extended departure from certain ranges compromise the viability of the organism. In case of humans, attribution of value somehow relates to generally maintaining the organism within a context-appropriate homeostatically adequate range and deploy regulatory measures such that operation is facilitated within a subset of this range that fosters well-being. Given the unceasing representation of the chemical state of the organism in the brain, departures from the valued homeostatic physiological state can be detected and, if necessary, encountered via triggering or incentivising compensatory actions. Thereby, the early incentive mechanisms (from the evolution history point of view) were not the result of conscious processes. Rather, they only later became known to organisms of sufficiently disposed mental constitution. As Damasio suggests, "In brains capable of representing

internal states in the form of maps, and potentially having minds and consciousness, the parameters associated with a homeostatic range correspond, at conscious levels of processing, to the *experiences* of pain and pleasure. Subsequently, in brains capable of language, those experiences can be assigned specific linguistic labels and called by their *names*—pleasure, well-being, discomfort, pain. ... What we have come to perceive as feelings of pain or pleasure, or as punishments or rewards, corresponds directly to integrated states of living tissue within an organism, as they succeed one another in the natural business of life management. The brain mapping of states in which the parameters of tissues depart significantly from the homeostatic range in a direction *not* conducive to survival is experienced with a quality we eventually called pain and punishment. Likewise, when tissues operated in the best part of the homeostatic range, the brain mapping of the related states is experienced with a quality we eventually named pleasure and reward." (Damasio 2010, p. 53-57, italics by the author).

REFLECTIONS

A tale of two threads

As stated already at the outset, the preceding treatment of ideas on perception and behaviour was not intended to be either comprehensive or exhaustive. Rather, the objective was to explore recurrent themes with potentially useful high-level explanatory character. Thereby, two interconnected common threads are of special interest. Roughly speaking, one thread can be said to have been the leitmotif in discussion of perception and the other prevalent in explanation of behaviour.

Physical and perceptual intensities

The previously discussed psychophysical scales that relate the strength of physical stimuli to the intensity of subjective perception have been understandably embraced in engineering and design application, including those concerned with the built environment: Assuming people's sensations can be predicted based on the measurement of energy levels and matter concentrations would provide a useful instrument for the configuration and evaluation of indoor environments. After all, it seems quite

obvious that higher/lower temperatures correspond to different thermal sensation levels (warm/cold), higher/lower sound pressure levels correspond to higher/lower levels of perceived loudness, and higher/lower luminance levels correspond to perceived brightness levels. Such associations explain the popularity of various kinds of scales that map measurable environmental stimuli onto physiological and psychological responses.

But matters are more complex. One symptom of such complexity is the multiplicity of the psychophysically motivated recommendations for desirable ranges of indoor environmental conditions. Such multiplicity can be observed both across different locations and at various times. It is important to consider that such diversity of recommendations may be inescapable, as it might be the natural consequence of a number of heterogeneous background factors.

A simple way to start the discussion of this complexity would be to recall the previously mentioned Steven's power law (Grondin 2016). The course of this function obviously depends on the value of the exponent ($N=1$ implies a linear function, $N<1$ a logarithmic, and $N>1$ an exponential one). Moreover, the exponent value is presumably different for different sensory modalities (e.g., 0.55 for smell, 0.6 for loudness, and 1.0 for temperature).

Aside from the cross-modality differentiation, it is also important to consider contingencies within a sensory modality. As an example, consider the process of adaptation in visual perception. People's subjective judgment of objects' brightness levels is not only a function of the stimuli's physical strength (i.e., in this case, the objects' luminance), but also the observers' state of adaptation. The visually relevant adjustment process to background light levels is not the only instance of adaptive processes. Another example is the suggested dependency of the "neutrality temperature" (or the inhabitants' preferred indoor temperature) on the outdoor temperature tendency.

A further consideration in the perceptual complexity discussion pertains to the differentiation between immediate perceptual correlates of physical stimuli and the higher-level association of values to such perceptions. In the

field of thermal comfort, for instance, varying temperatures may correlate with steps in the thermal sensation scale, but not necessarily with the considerably more complex value scale of thermal pleasantness. An indoor environmental exposure situation may be evaluated by inhabitants as more or less acceptable or more or less desirable not so much due to the intensity of associated sensations, but as the result of attribution of quality (value) to such sensations. For instance, a room may be perceived as pleasantly warm, uncomfortably hot, pleasantly cool, or uncomfortably cold. A musical performance at very high sound levels can nonetheless be experienced as highly stimulating/exciting, whereas, under different circumstances, a very quiet environment may be perceived as unsettling.

An additional obvious factor that makes it difficult to formulate straight-forward relationship between physical stimuli and psychological responses is as follows. People are rarely subjected to just one mode of sensory experience. Rather, in typical indoor environments, inhabitants are exposed to multiple modalities of physical influences. Whereas, faced with single-modality environmental exposure increase, people might display a likewise continuous increase in compensatory coping behaviour, multiple stressor modalities may result in a non-linear breakdown of such coping behaviour. In other words, scales for an isolated sensory mode may not be applicable in the presence of strong stimuli from other sensory channels. For example, a compensatory exertion effort may abruptly drop after an initial increase, if multiple environmental stimuli simultaneously rise in intensity (Höfert 1981).

Note that the presence of multi/modal sensory exposure is just one of a number of circumstances that can render psychophysically-based scales (and, as will be discussed later, behavioural models) fuzzy and consequently less effectual in practical applications. One such circumstance pertains to the inhabitant's attitude toward the source of stimuli. Another circumstance is related to the background information on available means of environmental control, sometimes referred to as the so-called "perceived control". Whereas the primary sensation associated with a stimulus may be largely determined by its physical strength,

secondary value attributions – together with the probability of discomfort and annoyance can be considerably influenced by: *i)* weather the inhabitant's attitude toward the source of stimuli is positive or negative, and *ii)* if the inhabitant believes the strength of the stimuli can be modulated. Rephrasing this latter point in human-ecological terms, one could suggest that inhabitants might encounter the same pattern of stimuli with a higher degree of tolerance if the exposure occurs in an environment with a higher level of perceived ecological valency. Consequently, positive attitudes toward the source of stimuli and perceived availability of stimuli strength modulation reduce the probability of annoyance and discomfort. The probability is more likely to increase in cases of negative associations with the source of stimuli and in cases where inhabitants cannot (or do not know how to) influence the strength of stimuli.

As stated earlier, applied psychophysically motivated scales associate the intensity of measurable indoor-environmental factors not only with primary subjective sensations, but also with state settings such as minimum and maximum values of relevant indoor environmental control variables (e.g., temperature, humidity, illuminance). But correlations have been also postulated between measurable dimensions of environmental exposure on the one hand and various aspects of people's performance and productivity on the other hand. Such correlations must be critically scrutinised as they exhibit a number of limitations. For instance, criteria for the definition and measurement of productivity are not uncontroversial. Moreover, most empirical correlational studies in this area are not only based on rather small populations, but also reduce the complexity of actual environments down to mostly mono-dimensional exposure scenarios.

Even so, such studies do not necessarily result in continuous functions relating environmental settings and performance levels. For instance, one effort to explore the effects of task and lighting attributes on people's visual performance via numerical verification tasks resulted in a model that has been referred to as the "plateau and escarpment of visual performance" (Boyce and Rea 1987). This model implies that people's visual performance stays at a fairly stable level over a wide range of task and lighting attributes,

but drops sharply after a certain point. Consequently, it may be rather futile to try to identify very specific values or narrow ranges for all kinds of environmental variables as optimal or ideal (Boyce 2013). As such, this should not come as a surprise to those familiar with the evolutionary grounding of the aforementioned homeostatic and adaptive features of human beings' ecological potency.

No matter how short, a listing of the sources of complexity in the relationship between stimuli's physical intensity and their suggested psychological correlates should not fail to include the most obvious one, namely the inhabitants' diversity. Using again the human-ecological terminology, the ecological potency can greatly vary from inhabitant to inhabitant. There are of course inter-individual differences in age, gender, cultural background, state of physical and mental health, as well as pertinent states of attitude and expectations. But even for a given individual, the ecological potency's composite configuration can and does frequently change over time. Consequently, whenever functions are devised to derive psychological correlates of physical factors, we must ask for whom, and under which spatial and temporal circumstances. It is thus no wonder that validity comparison of alternative psycho-physical models has been a persistent challenge: The range of uncertainties resulting from inter-individual diversity is often larger than differences in the aggregate predictions of rival models.

Underlying mechanisms of regulatory behaviour

We mentioned a second thread emerging from the preceding terse review of perceptual and behavioural theories. This thread can be perhaps succinctly captured through a kind of explanatory story concerning a certain class of humans' behavioural manifestations.

Human ecology and, in a somewhat comparable way, ecological psychology suggest that people explore the potential of their surrounding world (i.e., ecological valency) toward meeting their needs. The most fundamental priority (value) of an organism is obviously its survival. This in turn depends on the organism's capability (its ecological potency) to maintain its life-critical internal state in a proper range. How this is

actually achieved can be illustrated in part via control concepts from cybernetics and the nature of regulatory – mostly non-conscious – homeostatic processes, whose objective is to maintain living beings' critical internal physiological settings in the proper range. Finally, insights from biosemiotics and neurophysiology describe how, in organisms with high-level environmental mapping capability, reward and punishment mechanisms can instantiate conscious feelings of pain and pleasure (Damasio 2010). This can generate incentives for the living beings to move toward the homeostatic range beneficial to survival and well-being as such move is rewarded with feelings of comfort and pleasure (see Figure 2).

This explanatory story can be said to be relevant to key aspects of the thermal comfort discourse in the indoor environmental control community. Classical thermal comfort models typically focus on the necessity of maintaining human body's heat balance over the long run (see, for example, Fanger 1972). Independent variables meant to capture the surrounding environment's dynamics include air and radiant temperature as well as air flow and humidity. People's – typically activity-dependent – metabolic rates and clothing levels represent additional input variables for predictive models of thermal comfort. Extended departures from body states associated with heat balance are assumed to result in the perception of thermal discomfort and instantiation of compensatory (homeostatic) processes.

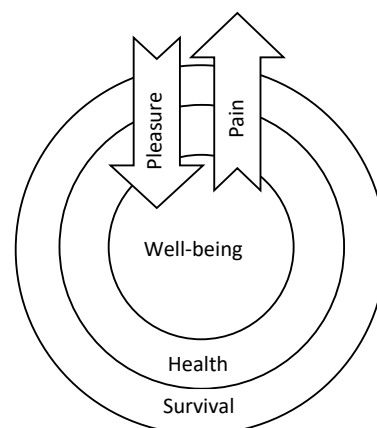


Figure 2: In organisms with high-level mapping capacity of internal and external states, homeostatic move toward preferable homeostatic states (in view of survival, health, and well-being) is rewarded with positive (pleasurable) sensations, whereas departure from life-critical homeostatic states is punished with negative (unpleasant or even painful) sensations.

However, decades of research and standardization in the thermal comfort domain cannot be said to have resulted in definitive instances of related theories and associated standards. Conventional thermal comfort models have been already criticized due to their insufficient consideration of comfort judgements' context-dependency (for instance with regard to outdoor climate). They have been also suggested to take little notice of inhabitants' potential for active engagement with the conditions in the surrounding world (Nicol et al. 2012). People have in principle "adaptive opportunities", i.e., the possibility to adjust their position, posture, activity, clothing, and various parameters of their surroundings. Amendments introduced by the adaptive theory, however, do not fully address the challenges faced by thermal comfort models. Some of these challenges are somewhat comparable to those faced by the previously discussed psychophysical models. These are briefly addressed in the following. Thereby, note that most of what is going to be said about the comfort model challenges applies also – often even more consequentially – to models of control-oriented behaviour.

As in many other instances, models that attempt to capture the nature of empirical reality are often forced to include an increasing large number of potentially influencing variables. Given the respective uncertainty of each added variable, potential predictive gains achieved by a more comprehensive representation of reality may be lost due to accumulation of uncertainties associated with additional independent variables. Even if we had at our disposal a multi-layered (physical, physiological, psychological, social) causal model of thermal comfort (or even control-oriented behaviour), we would be hardly in a position to obtain specific and dependable values for the many variables of such a model for every applicable instance. The effective range of uncertainty resulting from a model with numerous input variables might thus turn out to be considerably larger than differences amongst different versions of thermal comfort models, be those conventional or adaptive.

The differentiation between primary (theoretically value-neutral) sensations and secondary evaluative judgments applies of course also to the comfort discussion. Specifically, perception of thermal neutrality does not capture the experiential quality (e.g., pleasantness) of a

thermal environment. Interestingly, the previous discussion of neurophysiological processes suggest that experience of pleasure often follows a prior deviation of the organism from its "ideal" state, a deviation that could be the result of dynamic changes either in the environment or in the body.

Needless to say, inhabitants' evaluation of comfort and pleasantness typically occurs in a multi-dimensional exposure field, including not only hygrothermal factors, but also those pertaining to aspects of lighting, acoustics, air quality, etc. It is commonly assumed that comfort evaluations as well as dispositions to control-oriented behaviour in one domain are not independent of exposure parameters in other domains. But current theories and models do not capture the mechanisms and consequences of such interdependency neither in view of causal explanations nor in terms of computational algorithms.

Furthermore, value judgments concerning the quality of indoor climate as well as tendencies toward adaptive behaviour are arguably influenced by inhabitants' relevant views and attitudes. In office buildings, for instance, not only the extent of perceived control, but also views on the commitment and responsiveness of building management personal or psychologically relevant attitudes toward professional tasks and settings have been suggested to colour inhabitants' perceptual and evaluative processes. Thereby, display of tolerance toward occasional departure from comfort conditions (the "so-called forgiveness factor") due to inhabitants' social and environmental responsibility contemplations are just one instance (Leaman and Bordass 2007).

Naturally, comfort and behavioural models' applicability is also constrained by previously mentioned considerable diversity amongst the population of buildings' inhabitants. Specifically, when the detailed composition of future inhabitants of buildings is unknown or subject to frequent change, it is difficult to see how models could reliably predict the perceived indoor quality or the frequency of user-based interactions with the buildings' environmental control systems.

The classical responses to the above challenges for building design and operation have been of two kinds. One approach – specifically relevant to environments shared by multiple inhabitants –

has adopted a statistical approach, focusing on the maximization of fraction of the population, who one hopes finds the prevailing conditions acceptable. Another – technically more elaborate – approach aims at provision of individual or user-based control opportunities. Of course various combinations of these approaches are also possible, with a statistically-derived ambient state for larger zones and opportunities for individual controls at micro-zone level.

CONCLUDING REMARKS

There is a vast amount of theoretical and experimental research work and derivative codes and standards with regard to users' needs in view of accessibility, safety, health, comfort, and productivity. One naturally expects that a good fraction of this work is firmly grounded on comprehensive explanatory (e.g., causal) theories on the nature of inhabitants' perceptual, evaluative, and interactive encounters with indoor environments. Yet there appears to be a significant gap between the high-level intellectual logic of such theories and technical guidelines and engineering recommendations for design and operation buildings and their systems.

At a fundamental level, theories can provide useful insights as to the how and why of human agents' experiences and actions in buildings. For instance, we can appreciate general correlations between physically measurable intensities of isolated environmental stimuli and corresponding strength of subjective sensations. Likewise, understanding the homeostatic processes and the corollary (conscious) experiences of discomfort and pleasure helps to appreciate the importance of an indoor environment's potential experiential quality. It also sheds light on mechanisms that underlie people's adaptive and regulative interventions with regard to buildings' control elements, devices, and systems.

More specifically, reflections based on the aforementioned theories can provide illuminating answers for a number of persistent questions in the field:

- Why it is important that built environments offer a rich repertoire in terms of ecological valency, that is opportunities to accommodate various needs and requirements.

- How real and perceived affordances of the control elements, devices, and systems contribute to positive evaluations of indoor environments.
- Why passive (free-running) environmental control systems can be evaluated positively by users, even if they might not offer a narrow-range controllability of the relevant environmental factors.
- Why positively felt qualitative experiences such as thermal pleasantness are typically preceded by departure from the human body's state that is associated with thermal "neutrality".
- Why it has been difficult (if not impossible) to simultaneously maximize both coverage (i.e., general applicability) and accuracy (i.e., predictive reliability) of human comfort and behaviour models.

Regrettably, the operationalization of such high-level explanatory theories and models into specific engineering methods, tools, and guidelines is far from trivial. Specifically, the above general insights cannot be readily translated into exact predictive models of people's perception and behaviour. Some predictive models (e.g., those used for the operation of existing buildings) may be improved in precision for instance via empirically-based monitoring-supported calibration of the coefficients of the underlying mathematical formalisms to specific buildings (Mahdavi and Tahmasebi 2012, Taheri and Mahdavi 2014). But as soon as such fine-tuned and locally adjusted models are taken out of their original context, they are exposed to uncertainties associated with the diversity of building inhabitants' ecological potency. Moreover, models' output (the signal, as it were) is often detrimentally masked by the ignorance (i.e., noise) regarding the values of the models' multiple independent variables (Mahdavi 2015b).

This by no means denigrates the critical importance of fundamental research in phenomena and processes pertaining to people's perception and evaluation of built environments or control-oriented interactions with buildings' control systems. Nor do we suggest to undervalue the importance of engineering methods, tools, standards, and guidelines for building design and operation.

However, it is important to be aware of the challenges in both of these realms and especially the existing discontinuities between them.

As things are, it would be illusionary to suggest that existing standards can be seamlessly tracked back to indisputable foundational knowledge in human physiology, psychology, and sociology. Much in our assumptions about the requirements of indoor environments for human occupancy has arguably emerged as a result of "historical" contingencies, has gone through numerous changes in the past, and will surely continue to evolve. However, it should come across as more liberating than troubling if we accept to bid farewell to the idea of hard and fast building design and operation formulae as a direct derivative of an exact and rigorous science of human health, comfort, satisfaction, and productivity. Rather than creating chaos and arbitrariness, such liberation could encourage both planners and occupants to genuinely inform themselves with regard to the latest state of knowledge (in both engineering and human science domains) and, perhaps more importantly, to take active responsibility for their decisions both in terms of the quality of human habitat and its impact on the planet's well-being.

REFERENCES

- Ashby, W. R. 1956. An Introduction to Cybernetics, Chapman & Hall.
- Boyce, P. R. 2013. Illuminance Selection Based on Visual Performance—and other Fairy Stories, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 25:2, 41-49, DOI: 10.1080/00994480.1996.10748146
- Boyce, P. R., Rea, M. S. 1987. Plateau and escarpment: The shape of visual performance. *Proceedings of the CIE 21st Session*, Venice, Italy. Vienna, Austria: CIE.
- Buchler, J. 1955. *Philosophical writings of Peirce*. New York: Dover Publications.
- Cannon, W.B. 1932. *The Wisdom of the Body*. New York: W. W. Norton. pp. 177–201.
- Cannon, W. B. 1926. Physiological regulation of normal states: some tentative postulates concerning biological homeostatics". In A. Pettit. *A Charles Richet: ses amis, ses collègues, ses élèves*. Paris: Les Éditions Médicales. p. 91.
- Damasio, A. 2010. *Self comes to mind; constructing the conscious brain*. Vintage books. ISBN: 978-0-307-47495-7.
- Fanger, P.O. 1972. *Thermal Comfort*. McGraw-Hill Book Company. ISBN 0-07-019915-9.
- Fechner, W. 1966 (1860). *Elements of Psychophysics*. New York: Holt, Rinehart & Winston.
- Gibson, J. J. 1979. *The Ecological Approach to Visual Perception*. Houghton Mifflin Harcourt (HMH), Boston.
- Gibson, J. 1977. The Theory of Affordances. In *Perceiving, Acting, and Knowing*, Eds. Robert Shaw and John Bransford. ISBN 0-470-99014-7, 1977.
- Grondin, S. 2016. *Psychology of Perception*. Springer. ISBN 978-3-319-31789-2.
- Hoffmeyer, J. 1993. *Signs of meaning in the universe*. Indiana University Press. ISBN 0-253-33233-8.
- Höfert, W. 1981. Lärm und Blendung: zu einigen Effekten kombinierter Umgebungsstressoren. In Schick, A. (Ed.), *Akustik zwischen Physik und Psychologie*. Stuttgart (Klett-Cotta) (1981).
- Knötig, H. 1992a. Human Ecology - The exact science of the interrelationships between Homo sapiens and the outside world surrounding this living and thinking being. *The sixth meeting of the Society for Human Ecology "Human Ecology: Crossing Boundaries"*. Snowbird, Utah, USA.
- Knötig, H. 1992b. Some essentials of the Vienna School of Human Ecology. *Proceedings of the 1992 Birmingham Symposium; Austrian and British Efforts in Human Ecology*. *Archivum Oecologiae Hominiis*. Vienna, Austria.
- Leaman, A., Bordass, B. 2007. Are users more tolerant of 'green' buildings? *Building Research & Information*. (2007) 35(6), 662 – 673.
- Mahdavi, A. 2016. The human factor in sustainable architecture. *Low Energy Low Carbon Architecture: Recent Advances & Future Directions (Sustainable Energy Developments)*. Khaled A. Al-Sallal; Taylor & Francis, London, UK. ISBN: 978-1-138-02748-0, pp. 137 - 158.

- Mahdavi, A. 2015a. Human Ecology and Building Science: A Necessary Synthesis. Proceedings of the First International First International Symposium on Sustainable Human-Building Ecosystems, Pittsburgh, Pennsylvania, USA. ASCE (Ed.); American Society of Civil Engineers. ISBN: 978-0-7844-7968-1; pp. 1 - 17.
- Mahdavi, A. 2015b. Common fallacies in representation of occupants in building performance simulation (Keynote). BSA2015 - Building Simulation Applications 2015 - 2nd IBPSA-Italy Conference, Bozen, Italien. IBPSA Italy (Ed.); Free University of Bozen – Bolzano.
- Mahdavi, A. 2011a. The human dimension of building performance simulation. Keynote: *Building Simulation 2011* - IBPSA 2011, Sydney, Australia; (Soebarto V, Bennetts H, Bannister P, Thomas PC, Leach D.: Editors). ISBN: 978-0-646-56510-1 (2011a) pp. K16 - K33.
- Mahdavi, A. 2011b. People in building performance simulation. *Building performance simulation for design and operation (Hensen JLM and Lamberts R, editors)*. Spon Press. ISBN13: 978-0-415-47414-6, 2011b.
- Mahdavi, A. 1998a. Steps to a General Theory of Habitability. *Human Ecology Review*. Summer 1998, Volume 5, Number 1, pp. 23 - 30.
- Mahdavi, A. 1998b. The Human Ecology of the Built Environment. *Journal of Southeast Asian Architecture*. Vol.3 No. 1. September 1998. ISSN: 0128-9593, pp. 25 – 44.
- Mahdavi, A. 1996a. Approaches to Noise Control: A Human Ecological Perspective. *Proceedings of the NOISE-CON 96 (The 1996 National Conference on Noise Control Engineering)*. Bellevue, WA, USA. pp. 649 – 654, 1996a.
- Mahdavi, A. 1996b. Human Ecological Reflections on the Architecture of the "Well-tempered Environment". In *Proceedings of the 1996 International Symposium of CIB W67 (Energy and Mass Flows in the Life Cycle of Buildings)*. Vienna, Austria. (1996b) pp. 11 - 22.
- Mahdavi, A. 1996c. A Human Ecological View of "Traditional" Architecture. *Human Ecology Review (HER)*. Volume 3, Number 1 (1996c) pp. 108 - 114.
- Mahdavi, A. 1992. Acoustical Aspects of the Urban Environment. *Aris; Journal of the Carnegie Mellon Department of Architecture*. Volume 1 (1992) pp. 42 - 57.
- Mahdavi, A., Tahmasebi F. 2012. An optimization-based approach to recurrent calibration of building performance simulation models. *ECPM2012 eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction*, Reykjavik, Island. G. Gudnason, R. Scherer et al., (Ed.); ISBN: 978-0-415-62128-1; pp. 145 - 150.
- Mahdavi, A., Kumar, S. 1996. From Control Strategies to Entropy Considerations: Toward a Human Ecology of Thermal Environment. *Human Ecology Review (HER)*. Autumn 1996. Volume 3, Number 1, pp. 127 - 140.
- Nicol, F., Humphreys, M., Roaf, S. 2012. Adaptive Thermal Comfort; Principles and Practice. Routledge. ISBN: 978-0-415-69159-8.
- Norman, D. 2013. *The Design of Everyday Things*. ISBN-10: 0465050654.
- Schönpflug, W. 1981: Acht Gründe für die Lästigkeit von Schallen und die Lautheitsregel. In Schick, A. (Ed.), *Akustik zwischen Physik und Psychologie*. Stuttgart (Klett-Cotta).
- Stevens, S. S. 1961. The psychophysics of sensory functions. In Rosenblith, A. W. (Ed.) *Sensory communication*. MIT Press.
- Stevens, S. S. 1975. *Psychophysics: Introduction to its perceptual, neural and social prospects*. New York: Wiley.
- Taheri, M., Mahdavi, A. 2014. Optimization-based monitoring-supported calibration of a thermal performance simulation model. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 4, 2; pp. 261 - 271.
- Uexküll, J. 1920. *Kompositionslehre der Natur*. (Edited by Thure von Uexküll). Frankfurt am Main.
- Uexküll, J. 1982 (1940). *The Theory of Meaning*. *Semiotica* 42/1.
- Wiener, N. 1948. *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Cambridge: MIT Press.

DERIVATION AND REPRESENTATION OF THE ENERGETICALLY RELEVANT CONSEQUENCES OF OCCUPANTS' PRESENCE AND BEHAVIOUR IN BUILDINGS

A. Mahdavi¹, M. Taheri² and F. Tahmasebi¹

¹Department of Building Physics and Building Ecology, TU Wien, Vienna, Austria

²arbnco Ltd., Glasgow, United Kingdom

ABSTRACT

In the present contribution we assume that it is principally possible – for a given building in a given context – to identify specific behavioral traits with positive or negative implications for a typical energy-relevant key performance indicators (KPI). We then consider varying compositions of a population of buildings' inhabitant in terms of the relative presence of such behavioral traits. Subsequently, the consequences of these differing compositions for the simulated values of the relevant KPIs are explored. The results exemplify the extent to which the relative presence of different behavioral tendency in the population of a building's occupants can influence KPI values.

INTRODUCTION

In recent years, the topic of human behavior has become a prominent subject in the building performance community. Buildings shells' continuous thermal quality improvement results in a reduced role of building envelope in buildings' overall energy balance (Santin et al. 2009). Consideration of inhabitants' influence on buildings' energy use has motivated a number of efforts to integrate occupancy-related behavioral models in building simulation (Mahdavi 2011, Shipworth 2013, Andersen et al. 2007). Related discussions appear to be based on a tacit supposition that model input assumptions pertaining to the presence and actions of buildings' occupant exert a significant influence on the computed values of key performance indicators (KPI). However, there is arguably a lack of both reliable information regarding the extent of such influences and transparent procedures to obtain and display

those. In this context, the research community has been making efforts to study the existence and level of the inter-individual differences, i.e. diversity, in inhabitants' patterns of presence and actions in buildings, as a potential major source of the uncertainty (e.g. Taheri et al. 2017, Mahdavi and Tahmasebi 2015, O'Brien et al. 2016). Inhabitants have different sensitivities and preferences regarding comfort condition and may respond differently to the same environmental condition. It has been argued that inter-individual differences between occupants must be addressed in behavioral models. Multiple factors have been suggested to be relevant to diversity discussion, including physiological, psychological, and social (e.g., cultural) parameters (see, for example, Liao and Chang 2002, Pepper et al. 2011). Hence, it has been argued that the sophistication of occupancy-related models in view of the diversity issue must be increased.

In this paper, we explore the degree to which the consideration of diversity in occupants' behavioral tendencies can affect the results of simulation-based building performance queries. We assume that it is principally possible to identify specific behavioral traits with positive or negative implications for a typical energy-relevant KPI. Toward this end, a mid-rise office building model is selected as a case study. We then consider varying compositions of a population of the inhabitants of this building in terms of the relative presence of such behavioral traits. Subsequently, the consequences of these differing compositions for the simulated values of the relevant KPIs are explored. The results exemplify the extent to which the relative presence of different

behavioral tendency in the population of a building's occupants can influence KPI values. Moreover, formats are suggested toward effective visualization and communication of the relationship between occupancy-related assumptions and performance variables.

APPROACH

Modelling scenarios

In order to evaluate the influence of varying compositions of a population of buildings' inhabitants on the computed KPI values with the aid of performance simulation (EnergyPlus 2018), a thermal performance model of an office building was generated. The model is a five-story office building, including 100 offices, with height = 3 m, width = 4 m, length = 3 m, and a 40% window-to-wall ratio. Figure 1 illustrates the building geometry, visualized using OpenStudio plugin for SketchUp.

The office geometry model was augmented with required input data assumptions. For occupancy presence, light, and equipment power schedules, we used ASHRAE 90.1 profiles for office buildings (ASHRAE 2013). These profiles offer typical weekday, Saturday, and Sunday schedules (Figure 2). The building model was simulated for the location Vienna, Austria, and thus Vienna weather file from EnergyPlus was used. The building opaque and glazing elements were defined in a way to meet the applicable thermal standards. Table 1 summarizes the office modelling assumptions.

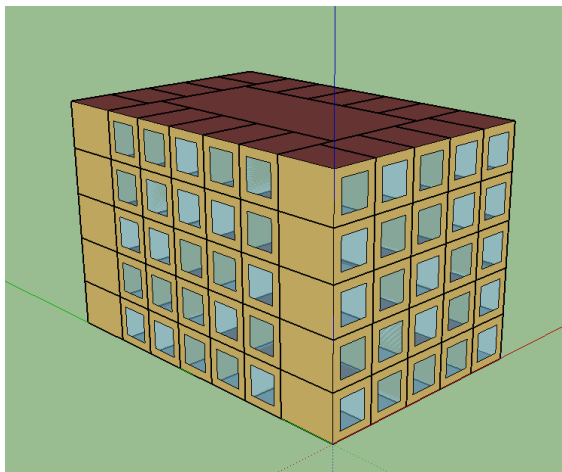


Figure 1: EnergyPlus model geometry for the case study building.

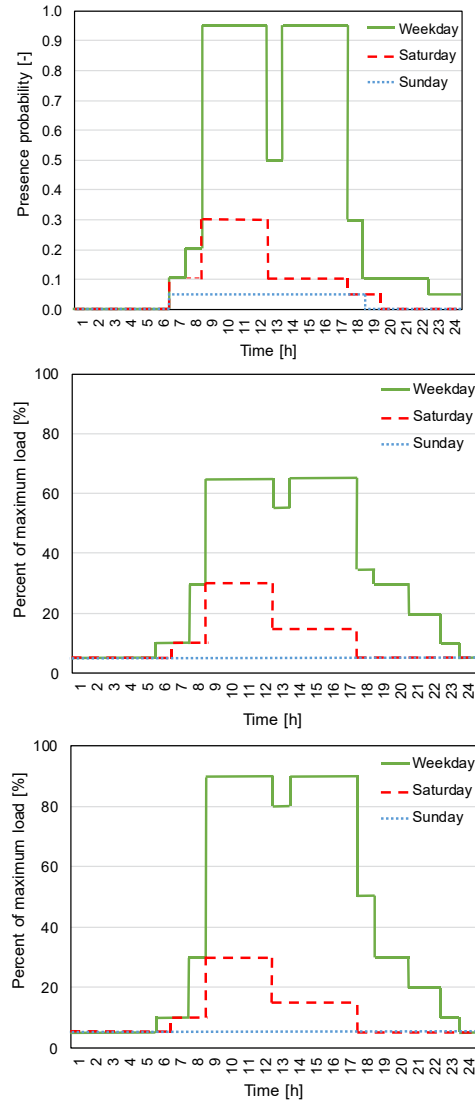


Figure 2: Schedules for presence (top), light (middle), and equipment power (bottom) according to ASHRAE 90.1 for weekdays, Saturdays, and Sundays.

Table 1: Office modelling assumptions

Modelling assumptions	Value
Number of offices	100
Net conditioned single office area [m ²]	12
Room height [m]	3
Average window to wall ratio [%]	40
Exterior walls U-value [W.m ⁻² .K ⁻¹]	0.23
Windows U-value [W.m ⁻² .K ⁻¹]	1.21
Number of occupants per office [-]	1
Maximum lighting power density [W.m ⁻²]	8.8
Maximum equipment power density [W.m ⁻²]	8.1

The HVAC, light, and shading set points were defined considering three groups of building occupants with different energetically relevant behaviors, resulting in three operational scenarios. These include:

- i) The first group of occupants is assumed to have higher expectations (i.e., a narrow range of acceptance) regarding indoor environmental conditions. This group, with expected higher energy consumption level, is tagged in this study as group "H".
- ii) The second group of the occupants is assumed to have moderate expectations and tolerance concerning indoor environmental conditions. This group, with expected medium energy use levels, are tagged as group "M". It may be suggested that commonly used standard occupancy and behavioral patterns are positioned between groups "H" and "M".
- iii) The third group of occupants is assumed to have low expectations and high tolerance for the change in indoor environmental conditions. This group, with expected low energy use level, is tagged in this study as group "L".

Table 2 summarizes the set-points assumptions for each of the above-mentioned operation levels. We defined various scenarios in which the office building is assumed to be occupied with different compositions of people from the three above mentioned groups. For comparison purposes, a "benchmark" scenario was defined, in which all offices in the building are occupied with type "H" inhabitants (i.e., 100% "H"). This scenario is expected to display the maximum heating and cooling loads.

Table 2: Assumptions with regard to HVAC, lighting and shading set-points for the three operation level scenarios

	HVAC [°C]		Light [lx]	Shade [W.m ⁻²]
	Heating	Cooling		
Low (L)	19	26	300	100
Medium (M)	21	24	500	200
High (H)	22	23	700	300








At the other end of the scale, a scenario is considered, whereby the office is assumed to be 100% occupied with type "L" inhabitants. Between these two extreme cases, a series of scenarios were generated including different compositions of occupants from the three operation levels "L", "M", and "H".

To study the implications of these scenarios for building performance simulation results, we considered annual heating/cooling demands per unit floor area, as well as peak heating/cooling loads per unit floor area.

RESULTS AND DISCUSSIONS

Table 3 illustrates the annual heating/cooling demand, as well as the peak heating/cooling load obtained from different scenarios for a selected number of scenarios, as illustrated via respective pie charts (red for "H", yellow for "M", and green for "L"). As expected, the 100% "H" and the 100% "L" scenarios result in the highest and lowest values respectively.

Table 3: Peak and annual heating and cooling demand for selected populations' compositions ●=H ●=M ●=L

Modelled Population	Annual Heating demand [kWh.m ⁻²]	Annual Cooling demand [kWh.m ⁻²]	Peak Heating Load [W.m ⁻²]	Peak Cooling Load [W.m ⁻²]
	51.6	6.9	99.0	36.7
	55.4	10.0	101.7	39.6
	57.6	12.2	104.0	40.6
	59.2	13.1	104.5	42.7
	61.4	15.1	106.6	43.7
	62.9	16.0	107.3	45.7
	63.8	17.5	108.9	44.9
	65.1	18.2	109.5	46.8
	67.4	20.3	111.6	48.0
	69.7	22.5	113.8	49.1

To better understand the impact of the above-mentioned input assumptions pertaining to the occupants' energetically relevant behaviors, the computed performance indicators in each case were compared to the benchmark. Figures 3 and 4 demonstrate the deviation of the annual heating and cooling demand of a selected number of different populations from the benchmark. As compared to the benchmark, annual heating and cooling demand predictions for various population composition scenarios displayed deviations of up to -26% (heating) and -70% (cooling). Deviations for peak heating and cooling loads (up to -13% and -25% from the benchmark respectively) are shown in Figures 5 and 6.

Figures 7 to 10 further demonstrate the extent to which the behaviorally relevant differences in population compositions can influence the KPI values. In these figures, the X-axis shows the ratio H/T, i.e., the number of offices with type "H" occupants divided by the total number of

offices. The Y-axis shows the deviation of the relevant KPI from the benchmark model. The three linear functions in each graph correspond to the following cases:

M denotes that all offices not occupied by "H" type occupants are occupied by "M" type occupants.

L=M denotes that all offices not occupied by "H" type occupants are equally occupied by "L" and "M" type occupants.

L denotes that all offices not occupied by "H" type occupants are occupied by "L" type occupants.

For instance, according to Figure 7, when H/T is 50%, model's annual heating demand deviation from the benchmark can vary between -5, -9 and -13%, depending on whether the rest of offices are occupied by "M", equal number of "L" and "M", or "L", respectively.

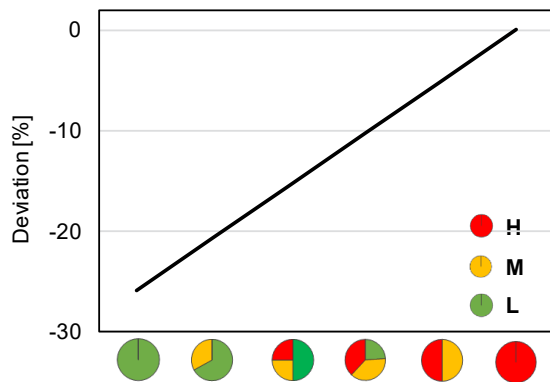


Figure 3: Deviation of the annual heating demand from the benchmark as a function of different population composition scenarios.

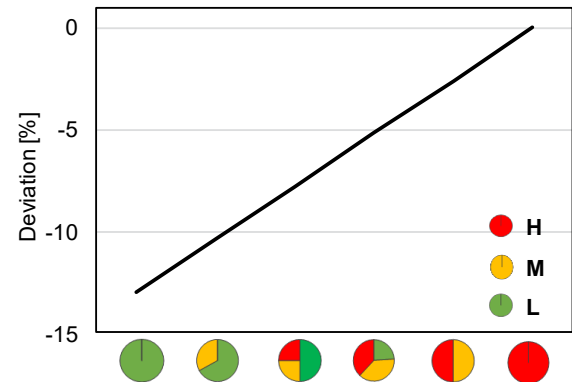


Figure 5: Deviation of the peak heating load from the benchmark as a function of different population composition scenarios.

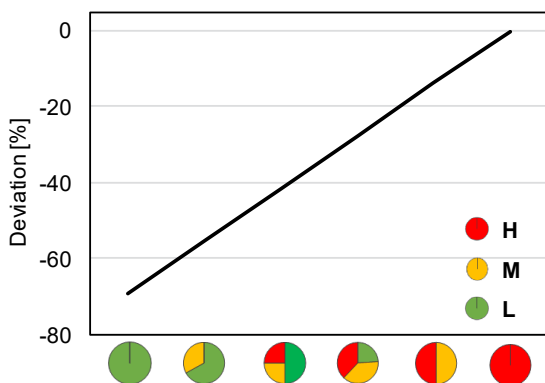


Figure 4: Deviation of the annual cooling demand from the benchmark as a function of different population composition scenarios.

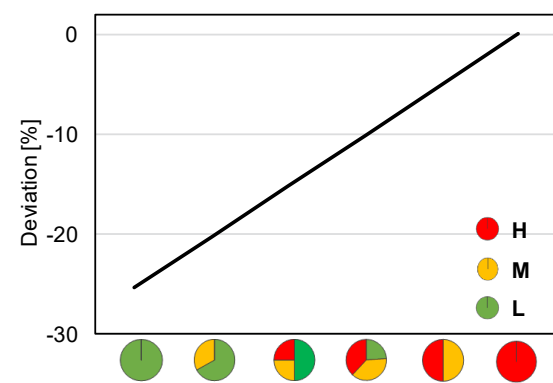


Figure 6: Deviation of the peak cooling load from the benchmark as a function of different population composition scenarios.

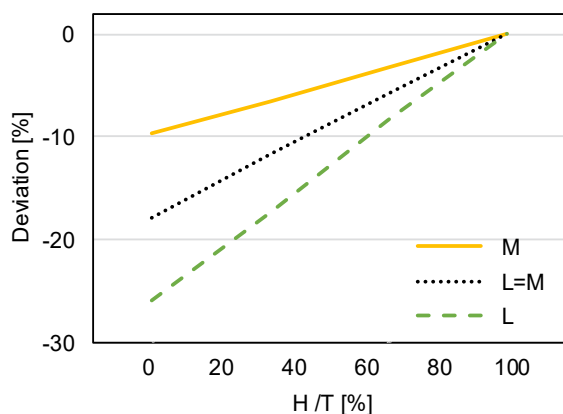


Figure 7: Deviation of the annual heating demand from the benchmark, depending on the ratio of H, M, and L in total population.

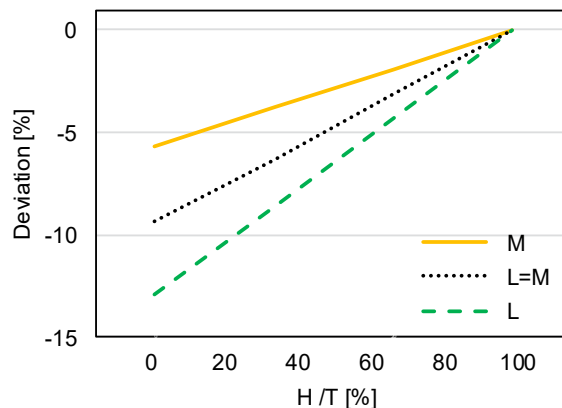


Figure 9: Deviation of the peak heating load from the benchmark, depending on the ratio of H, M, and L in total population.

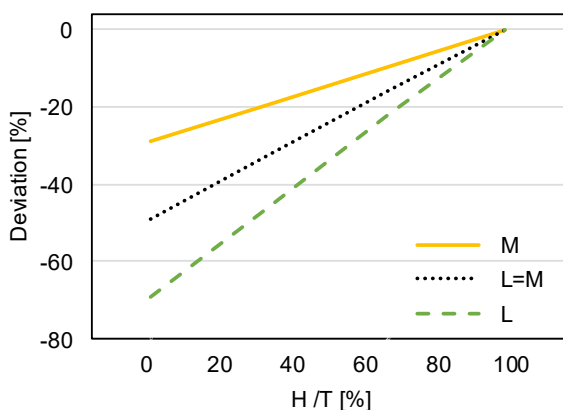


Figure 8: Deviation of the annual cooling demand from the benchmark, depending on the ratio of H, M, and L in total population.

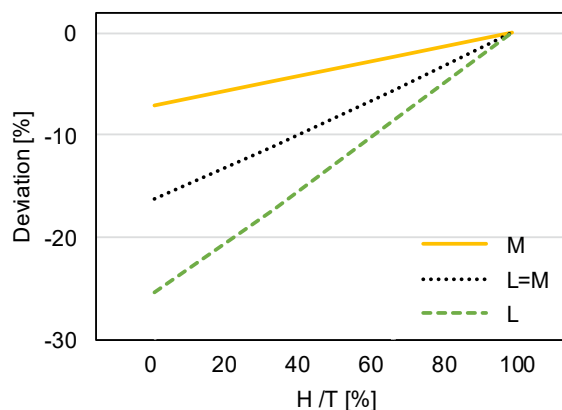


Figure 10: Deviation of the peak cooling load from the benchmark, depending on the ratio of H, M, and L in total population.

Furthermore, Figures 11 and 12 illustrate the lines of equal deviation of the annual heating and cooling demand from the benchmark, depending on the ratio of "H", and "M" to the total population.

Representations of this kind would provide the pertinent professionals with the possibility to estimate the influence of the composition of a building's populations (in view of energetically relevant characteristics) on simulated KPI values.

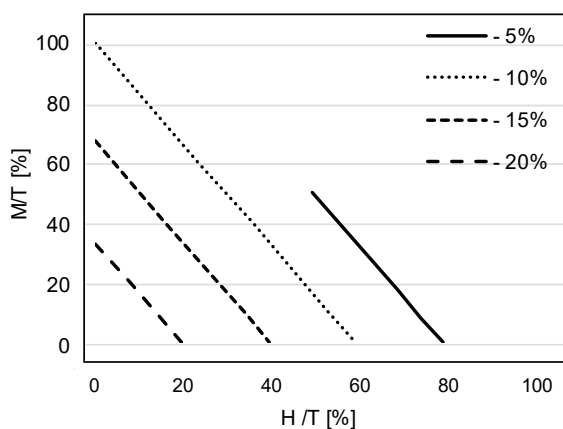


Figure 11: Lines of equal deviation (from -5% to -20%) of the annual heating demand from the benchmark, depending on the ratio of H, and M in total population.

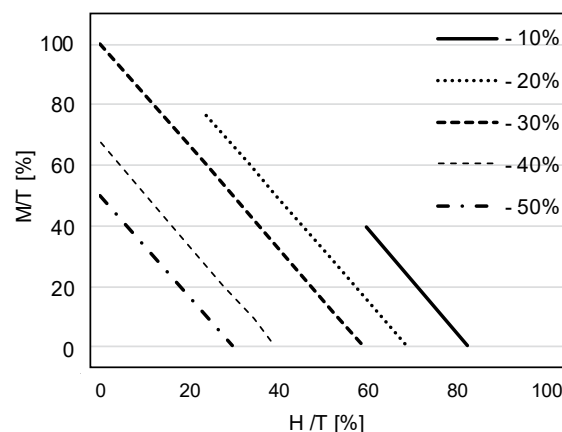


Figure 12: Lines of equal deviation (from -10% to -50%) of the annual cooling demand from the benchmark, depending on the ratio of H, and M in total population.

Note that different compositions of the population of buildings' inhabitants can result in same magnitude of relative KPI values (i.e., deviation of a KPI of a given composition from that of the benchmark). For instance, according to Figure 11, a population including 60% "H" and 40% "L" displays the same deviation of a 100% "M" population (-10% deviation of heating demand from the calculated benchmark value).

CONCLUSION

Following a case study approach, this paper explored the extent to which behaviorally relevant differences in a typical office building's population can influence simulated values of common energy-relevant KPIs (i.e., peak and annual heating and cooling demand). The case study obviously does not represent an exhaustive treatment, as it pertains to some very specific circumstances in terms of the selected building type, size, and climatic context. Likewise, the definition of the population's behaviorally differentiated constituent groups is highly simplified. Rather, the main objective of the contribution is to provide a compact and transparent framework for the pursuit of the following, practically relevant question:

To which extent can the differences in the composition of a building's population – in as much as they can be reflected in operationally effective parameter – influence the building's energy performance (as expressed via typical KPIs). Examples of such operational parameters include – but are not limited to – preferred/required heating and cooling set-point temperatures, task illuminance levels, as well as glare tolerance and solar gain thresholds. Hence, even in those cases where the future composition of a building's population is not exactly known, certain general ranges for performance implications of occupants' diversity may be derived.

As far as the very specific case study presented here is concerned, the results reveal potentially significant variations in the predicted KPI values once the diversity in occupants' energy-relevant behavior is considered. In our experience, the presented approach to and the suggested formats for data processing, aggregation, and visualization have the potential to provide effective means of assessing and

understanding the relationship between occupancy-related diversity assumptions in simulation models and the resulting values of key performance indicators.

ACKNOWLEDGEMENT

The research presented in this paper is supported in part within the framework of the "Innovative projekte" research-funding program of TU Wien.

REFERENCES

- Andersen, R.V., Olesen, B.W., Toftum, J. 2007. Simulation of the effect of occupant behavior on indoor climate and energy consumption. In Proceedings of Clima 2007, 9th REHVA World Congress: Wellbeing Indoors, Helsinki, Finland.
- ASHRAE 90.1. 2013. Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta.
- Energyplus. 2016. <https://energyplus.net/> Accessed November 15, 2016.
- Liao, H.C., Chang, T.F. 2002. Space-Heating and Water-Heating Energy Demands of the Aged in the US. *Energy Economics* 24, 267-284. DOI: 10.1016/S0140-9883(02)00014-2.
- Mahdavi, A. 2011. People in Building Performance Simulation. *Building Performance Simulation for Design and Operation*, edited by Hensen, J. and R. Lamberts, 56–83. New York: Taylor & Francis. ISBN: 9780415474146.
- Mahdavi, A., Tahmasebi, A. 2015. The Inter-individual Variance of the Defining Markers of Occupancy Patterns in Office Buildings: A Case Study. In Proceedings of BS2015, 14th International Conference of the International Building Performance Simulation Association, Hyderabad, India. ISBN: 978-93-5230-118-8.
- O'Brien, W., Gunay, H.B., Tahmasebi F., Mahdavi, A. 2016. A Preliminary Study of Representing the Inter-occupant Diversity in Occupant Modelling. *Journal of Building Performance Simulation*. DOI: 10.1080/19401493.2016.1261943.

- Peffer, T., Pritoni, M., Meier, A., Aragon, C., Perry, D. 2011. How People Use Thermostats in Homes: A Review. *Building and Environment* 46, 2529-2541. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.06.002.
- Santin, G.O., Itard, L., Visscher, H. 2009. The Effect of Occupancy and Building Characteristics on Energy Use for Space and Water Heating in Dutch Residential Stock. *Energy and Buildings* 41, 1223-1232. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.07.002.
- Shipworth, D. 2013. The Vernacular Architecture of Household Energy Models. *Perspectives on Science* 21(2), 250-266. DOI: 10.1162/POSC_a_00098.
- Taheri, M., Tahmasebi, F., Mahdavi, A. 2017. Consideration of Inhabitants' Diversity in Building Performance Simulation: Does It Matter? In Proceedings of BS2017, 15th International Conference of the International Building Performance Simulation Association, San Francisco, CA, USA. DOI: 10.26868/25222708.2017.042.

INTEGRATING A HUMAN THERMO-PHYSIOLOGY MODEL WITH A BUILDING SIMULATION TOOL FOR BETTER OCCUPANT REPRESENTATION.

M. Rida¹, N. Kelly¹ and A. Cowie¹

¹ Mechanical and Aerospace Engineering, University of Strathclyde, UK, Glasgow

ABSTRACT

A multi-segment thermo-physiology model was developed based on the AUB model (Salloum et al. 2007) and combined with the ESP-r building simulation tool and its integrated CFD. This enables explicit simulation of the dynamic local heat balance and thermal comfort of building occupants, within a well established building simulation environment.

At each simulation time step, the thermo-physiology model takes local environmental conditions, calculates occupant skin and core temperatures, and returns heat and moisture generation from the occupant.

The approach was demonstrated by two case studies, showing good agreement with experimental results and demonstrating effects on building performance.

1. INTRODUCTION

Simulation of energy performance in buildings often relies on simplistic underpinning assumptions with regards to heat gains from occupants and indoor conditions, with heat and moisture gains from occupants often been treated as a fixed profile, and indoor air being regarded as well mixed at a uniform temperature. Whilst this level of simplification can be useful when modelling whole building energy performance over large time scales, it has limitations particularly when analysing thermal comfort. For example, in the case of displacement ventilation, ASHRAE Standard 55 (2013) recommended that the temperature between the head and the foot of a standing person should not exceed 3 Kelvin. To assess such local comfort it is essential to represent occupants and their surroundings in more detail

compared to what is commonly applied by default in building simulation models.

Thermo-physiological models are able to predict the human thermal state from environmental boundary conditions. Most current thermo-physiological models are derived from the model of Stolwijk et al. (1971). This was the first multi-node thermoregulatory model, dividing the human body into 25 nodes (Rupp et al. 2015). To get an accurate prediction of thermal state accurate environmental data is required as input to the physiological model. Hence, it is convenient to integrate the thermo-physiology model with environmental modelling tools, such as building performance simulation (BPS) programs. With the addition of computational fluid dynamics (CFD), BPS programs can simulate the air flow and temperature patterns within occupied spaces. A CFD-coupled BPS program can provide the physiological model with local dynamic boundary conditions, and also explicitly represent the thermal state of the occupant in the simulation. In this way the complex interaction between the human body and its thermal environment can be characterised.

Numerous attempts of coupling a thermal manikin with CFD have been described. It was widely used in the automotive industry, modelling thermal comfort in a cabin (Dixit 2015). Gan (1995) published a study using a CFD model to predict room air distribution, with Fanger's comfort model equations incorporated in the CFD model. Sorensen et al. (2002) modelled in detail the shape of a seated manikin and used it in a CFD study to calculate the radiative heat transfer coefficient and the natural convection flow around the manikin. They compared simulated and experimental results, though a

constant skin temperature was used in the simulation. Murakami et al. (2000) used Gagge's two-node model (1971) as a thermo-physiological model in a CFD study to predict the heat released from a human body. The shape of the human body was represented using a curvilinear coordinate system. Murakami stated that even though the rectangular shape was very popular to represent the shape of a human body, they believed that the physical shape of the human body could have an impact on the indoor climate.

Nielsen et al. (2003) set a CFD benchmark exercise, to validate CFD models specifically for modelling air flow around an occupant. The experimental data of the benchmark was presented in Kato and Yang (2006). This benchmark has been used by multiple researchers (Srebric et al. 2008; Deevy et al. 2008; Cropper et al. 2010)

Srebric et al. (2008) studied the effects of three boundary condition elements in a CFD study; the contaminant source, the size of the body area, and the shape of the human body. They found that the fraction of convective to radiative heat flux affects the accuracy of predictions of the thermal environment around the occupant. Also, they found that using a simplified shape of human simulator will still give accurate results for the domain environment, but not when studying the local environment of the occupant, where the shape plays a major role in predicting air flow near the body. Srebric also noted that in a typical CFD approach, only the convective heat transfer is taken into account, which is insufficient where thermal radiation plays a major role of heat transfer from any heat sources. Cropper et al. (2010) published a paper on the methods used in coupling a thermo-physiology model with a commercial CFD program. In their approach they used shared files to exchange data between CFD and a thermo-physiology model. They used the Fiala model (2010), a multi-segmented human thermal model which is able to predict the response of the human body to changes in the environment, and coupled it with the ANSYS CFX commercial CFD solver.

In a more recent study Angelova et al. (2014), integrated a thermo-physiological model with the Fluent CFD software. They studied the effect of

clothing and the metabolic rate on the human body and the environment.

Many studies have linked a thermo-physiological model with a CFD simulation, some utilising advanced meshing tools and detailed manikin geometry. However, none of the research has studied the effect of such a linkage on building performance. Heat gains, as well as moisture and contaminant (e.g. CO₂) release from the occupant, are dynamic functions of the environment and the metabolic processes of the occupant. Changes in the occupant's thermal state will influence the environmental conditions of the room, potentially affecting the energy consumption of heating and ventilation systems as well as reflecting back on the occupant's thermal state. A multi-segmented thermo-physiology model explicitly simulates these processes, removing the need to represent occupants in building simulation with prescribed profiles.

By implementing a thermo-physiology model in a full BPS program, these impacts can be studied. It is important to use a multi-segmented model to predict local skin and core temperature, especially in cases of non-uniform radiant temperature.

ESP-r is a transient energy simulation system which is capable of modelling the energy and fluid flows within combined building and plant systems. The ESP-r simulation engine uses a robust numerical method to predict the building and plant energy and fluid flows. At each time-step energy and mass balance are applied for all volumes in the system, producing a differential matrix for the complete system (Clarke et al. 2007, Hand 2003).

In ESP-r a CFD domain can be associated with a thermal zone, replacing the well-mixed zone air assumption. The CFD functionality in ESP-r is strongly coupled with the building simulation, according to the conflation method developed by Beausoleil-Morrison (2000). This allows the CFD domain to intelligently configure itself according to the dynamic boundary conditions at each time step, supplied from the building domain. In turn, the CFD then passes convective fluxes at solid boundaries back to the building domain.

This paper briefly describes developments to integrate a multi-segment thermo-physiology model with ESP-r. The approach is tested with

two case studies; the displacement ventilation benchmark case of Nielsen et al. (2003) and a further case with natural ventilation.

2. METHODOLOGY

Thermo-physiology model

A multi-segmented thermo-physiology model was developed specifically for integration with ESP-r. The model is based on the AUB bioheat model developed by Salloum et al. (2006), and constitutes a passive and an active system. The passive system simulates the heat transfer between the body segments and the environment through convection, radiation, conduction and evaporation. The active system solves all physiological variations as the shivering, sweating and blood flow. The model is based on realistic anatomical data of the human body. The blood circulation system in the model takes the pulsatile blood flow into consideration, and calculates the perfusion flow rates in the core and skin nodes. It describes and simulates the arterial system by using the multi-branched model of the human arterial system of Avolio (Salloum et al. 2013). The model consists of 25 body segments, and each segment is represented by four concentric layers (nodes) core, skin, artery and vein. Superficial veins are considered at the limbs (Salloum et al. 2007, Karki et al. 2013).

Integration with ESP-r

Figure 1 represents the coupling method and the data exchange between the solvers at every time step.

In an ESP-r CFD domain blockages can be defined to represent solid objects which block air flow. These are used to construct a manikin representing a human body, with a separate blockage defined for the head, torso, and all four limbs (6 in total). The constraint of orthogonal gridding in ESP-r necessitates representation of the occupant body shape in a rectangular form. Convective heat loads for each body segment are evenly distributed over its surface area within the CFD domain. Radiative loads are treated as shortwave radiation impinging on the interior surfaces of the room in the building domain. The latent load and moisture release are implemented as a vapour source in the CFD cell in front of the face.

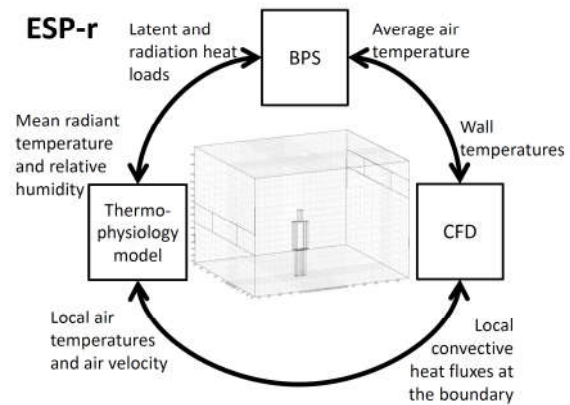


Figure 1: Coupling representation.

The user must define the number of occupants, and the gender, the metabolic rate and clothing of each in the corresponding zone. This replaces the prescription of occupant heat gains required previously, and uses the same schedule-based syntax. In this way users can prescribe the presence and activity of occupants varying through time.

Simulation parameters

The CFD in ESP-r uses a finite volume method. In both case studies, the adaptive conflation controller (ACC) developed by Beausoleil-Morrison (2000) was activated, which manages interactions between the building and CFD modelling domains. The defacto standard k-ε mode turbulence model was used in the simulations. Buoyancy was modelled using the Boussinesq approximation with a reference temperature of 24°C. The convergence criterion was a maximum residual value 10^{-3} .

Simulations were performed with 2 time steps per hour, on a computer with an Ubuntu operating system with 6 GB RAM and a 3.60 GHz CPU.

3. CASE STUDIES

Two simulation cases were considered. Firstly, for the purpose of validation the benchmark of a displacement ventilation case from Nielsen et al. (2003) was simulated and compared with experimental data gathered by Kato and Yang (2006) measuring the flow field around a manikin. Secondly, to demonstrate the transient coupling capability, a case with natural ventilation was simulated.

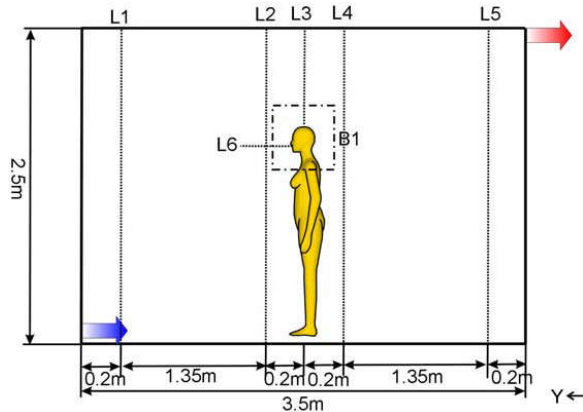
Displacement ventilation benchmark case

Figure 2: Sketch of the benchmark vertical measuring pole (Nielsen et al. 2003)

This case study sought to reproduce the benchmark described by Nielsen et al. (2003). The room has dimensions 3m width x 3.5m depth x 2.5m height, has an inlet in the bottom of the east wall with dimensions 0.2x0.4m and an outlet in the top of the opposite wall of 0.3x0.3m. The boundary conditions of air entering the room were 21.8°C inlet temperature and average velocity of 0.182m/s. The measurements of air velocity and temperature were made at various locations; four vertical poles were set, two in front of the manikin and two behind it. The temperature was measured at seven different heights while velocity was taken at six different heights. The velocity above the head was also monitored by using the particle image velocity (PIV). Figure 2 shows the vertical measuring pole position with dimension used in the benchmark, the supply and exhaust openings marked, and a manikin placed in the middle of the room. Figure 3 illustrates the computational domain of the benchmark in ESP-r, showing the inlet and outlet openings and the manikin in the middle of the room.

The benchmark set a sensible heat load from the manikin of 76W, though the radiant/convective fraction is not mentioned. Walls are considered adiabatic in the benchmark which could have some implication on results, as heat transfer from walls typically has a significant effect on room air flow.

The CFD domain grid consisted of a rectangular structured mesh with cell dimensions approximately 0.03m around the human body and about 0.1m in other regions of the room. As described in section 2, the body geometry was

represented by six cuboidal blockages representing the head, torso, and all four limbs. The total number of cells was 81,000.

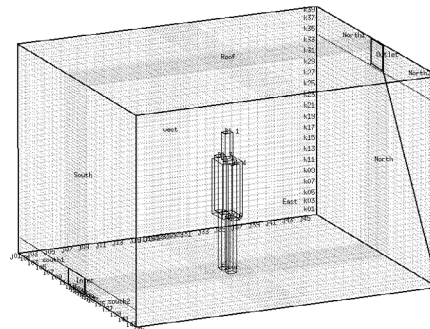


Figure 3: CFD domain in ESP-r

Table 1 shows the body part surface area used for this simulation.

Table 1 Manikin body surface area used in simulation

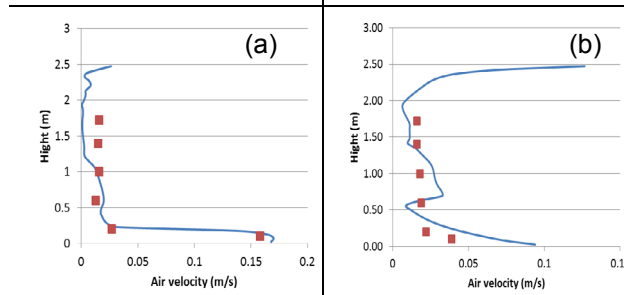
Body Part	Area in m ²
Head	0.1224
Trunk	0.5984
One Arm	0.2448
One Leg	0.306
Total	1.8224

Results

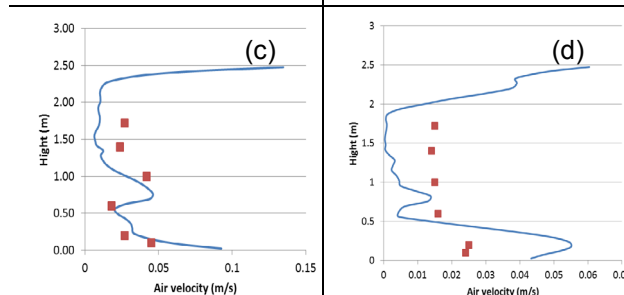
The description of the experimental data, published by Kato and Yang (2006), did not provide any accuracy or measurement error to be considered in our comparison. For this reason a qualitative comparison between the experimental and simulated results of both air velocity and temperature of the four poles has been done.

Figures 4 a, b, c and d shows the measured and simulated air velocity results for the different locations and heights. Figures 5 a, b, c and d shows the air temperature in front and behind the manikin for the different heights. In order to evaluate the accuracy of numerical results the root mean square (RMS) residuals were calculated for each pole, according to equation 1, where Y is the considered data air temperature or velocity and n is the number of data. Maximum RMS was 0.68 °C for temperature and 0.025 m/s for velocity, table 2 shows the temperature and velocity RMS values for each pole.

pole 1, velocity distribution | pole2, velocity distribution



pole 4, velocity distribution | pole 5, velocity distribution



Simulation —
 Experiment ■

Figures 4 a,b,c,d: Plots of the simulation vs. experimental results of velocity for poles 1,2,4,5 respectively.

Table 2 Temperature and velocity RMS values for each pole

RMS	Pole1	Pole2	Pole4	Pole5
Temperature	0.683	0.342	0.313	0.50
Velocity	0.025	0.016	0.012	0.018

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{exp,i} - Y_{sim,i})^2}{n}} \quad (1)$$

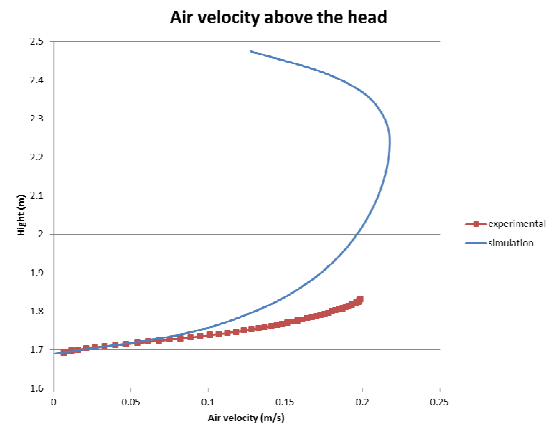
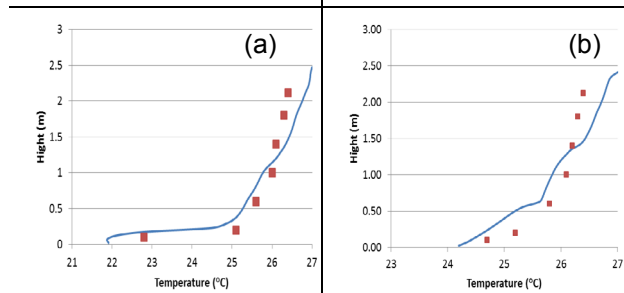
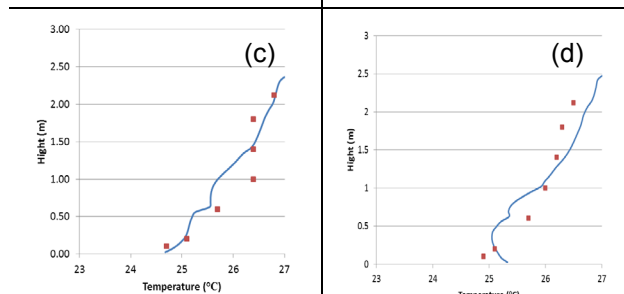


Figure 6: Simulated vs. experimental results of air velocity above the head.

pole 1, temperature distribution | pole2, temperature distribution



pole 4, temperature distribution | pole 5, temperature distribution



Simulation —
 Experiment ■

Figures 5 a,b,c,d: Plots of the simulation vs. experimental results of temperature for poles 1,2,4,5 respectively.

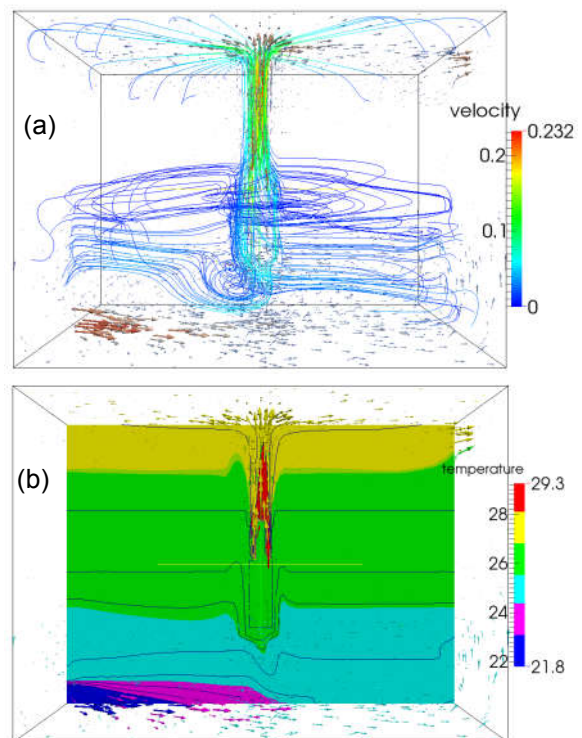


Figure 7 a,b: Air velocity and temperature distribution across the middle of y axis.

Figure 6 shows the differences in the air velocity above the head between the simulated and experimental results. Air velocity in the simulated results reached 0.2 m/s around 10 cm higher compared to the experimental results. This difference in the results could be because of the simplified rectangular shape of the head.

Figure 7a shows velocity stream lines and 7b the temperature distribution of a cross section in the middle of the Y axis, through the inlet, outlet and manikin.

Natural ventilation case

CFD domain geometry is shown in figure 8. The room model has dimensions 4.2m width x 3.6m depth x 3m height. It includes a large opening located high in the East wall exposed to the external environment, and another opening low in the West wall internal partition (attached to another zone). Weather data for a slightly warm day was chosen for this case study as it was considered acceptable for a natural ventilation case. The simulation period was an assumed office working day, from 08:00 in the morning until 19:00 evening. The gridding mesh consisted of 10,080 cells. The manikin was located in the middle of the room. Table 3 shows the weather data chosen for three hours of the simulation to show the variation.

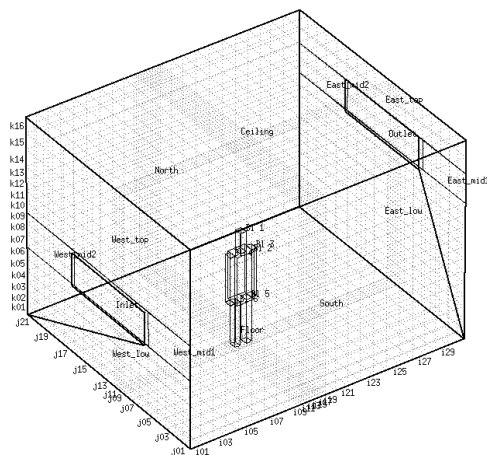


Figure 8: Representation of occupant inside a naturally ventilated domain.

The occupant was given an initial metabolic rate of 1.4 met (standing doing light industrial work), changing to 2.4 met between 12:00 and 13:00 and then back to 1.4 met until the end of the simulation day. This approach demonstrated the effect of variable metabolic rate during a transient simulation. Clothing level was chosen

as a summer clothes ensemble with insulation 0.45 clo (clothing layers covering thighs, chest and upper arms).

Table 3: Weather data for each hour of the simulation time for the simulation date.

Hour	Temperature	wind velocity m/s	wind direction	relative humidity
12	25	2.1	10	39
13	25.7	4.1	70	35
14	26.4	5.1	10	38

Results

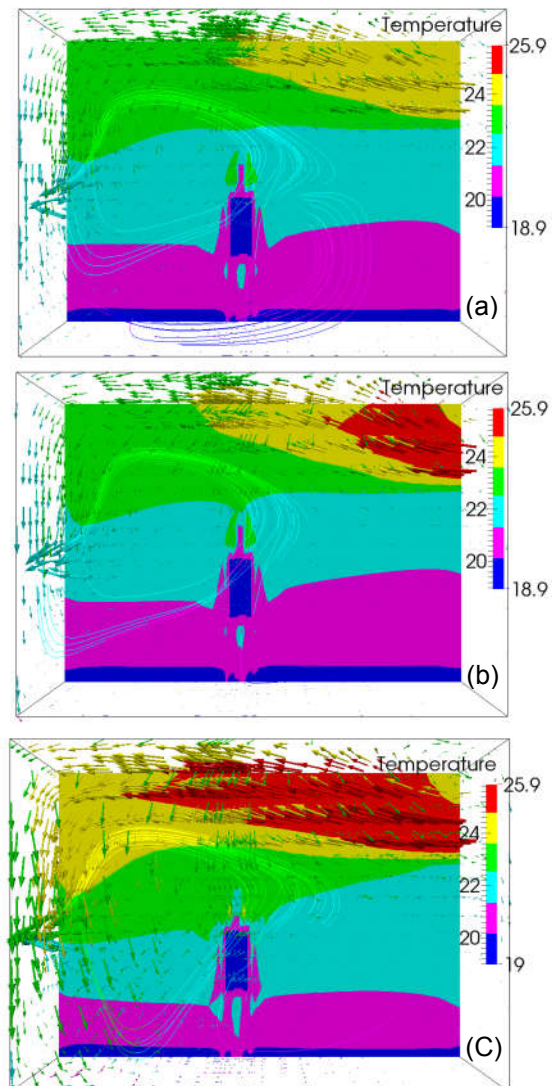


Figure 9 a, b, c: Temperature distribution around the manikin at a) 12:00 b) 13:00 c) 14:00

Figures 9 a, b and c gives results visualisations for temperature distribution at times 12:00 13:00 and 14:00 respectively. Temperature on a plane bisecting the occupant and the air flow openings, and arrow representations of the flow field (scaled by velocity), are shown. It can be seen how the air velocity change at the inlet opening corresponds to the weather data.

Figure 10 a shows the variation in heat loss from the dynamic occupant over the simulation period. Transient variation in sensible and latent loads can be clearly seen as a result of the varying metabolic rate. In addition figure 10 b shows the skin temperature of the occupant body parts and the overall temperature. From the graph we can see the variation of the skin temperature over the simulation time; these temperatures can be used as input for a thermal sensation and comfort model.

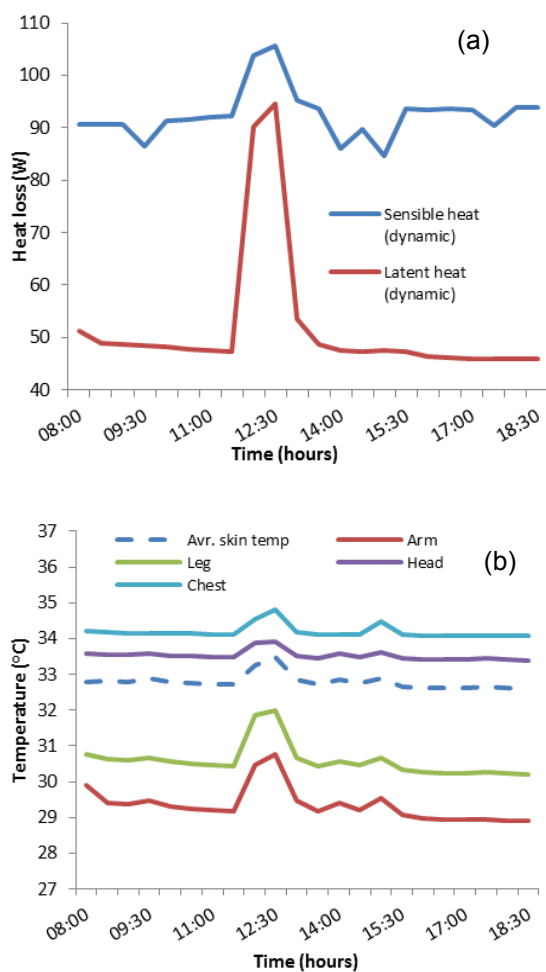


Figure 10 a,b: Variation of total sensible and latent heat during the simulation time; b) surface temperature of each body part.

Conclusions

In this study we have briefly presented the coupling method of a multi-segmented thermo-physiology model with ESP-r and its integrated CFD solver. The coupling method was validated using a benchmark study with displacement ventilation and our results were in a good agreement with the published data. The transient occupant representation of the coupling approach was also demonstrated in a natural ventilation case study.

The new functionality demonstrated in this paper enables improved modelling of occupants and their thermal interaction with the building in

ESP-r. This removes the need to prescribe profiles such as occupant heat gains, as this is modelled explicitly as a function of prescribed occupant activity and environmental conditions.

Further work on the coupling method and studies on thermal comfort adaptation for multiple manikins with different thermal behaviour in the same domain will be presented later. The approach can also be used to investigate how the thermo-physical model affects building model performance.

Reference

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) (2013) Standard 55 - Thermal environmental conditions for human occupancy (Atlanta, GA).

Angelova RA, et al.(20015) . CFD Based Study of Thermal Sensation of Occupants Using Thermophysiological Model. Part II: Effect of metabolic rate and clothing insulation on human-environmental interaction. *Int J Cloth Sci Tech* 27(1): 60-74.

Beausoleil-Morrison, I. (2000) The Adaptive Coupling of Heat and Air Flow Modelling within Dynamic Whole-Building Simulation, PhD thesis, University of Strathclyde, Glasgow.

Bourgeois D. et al. (2004) Adding sub-hourly occupancy prediction, occupancy-sensing control and manual environmental control to ESP-r, in Proceeding of Esim 2004, Vancouver, BC, 2004, pp. 119– 126

Bolineni S, van Treeck C, Stratbücker S (2014). Coupling strategy for transient simulation of

- human thermoregulation and CFD indoor airflow models. In: Proceedings of 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Hong Kong, China.
- Clarke J. A., Kelly N. J & Tang D. (2007) A Review of ESP-r's Flexible Solution Approach and its Application to Prospective Technical Domain Developments, *Advances in Building Energy Research*, 1:1, 227-247.
- Cropper PC, et al. (2010). Coupling a model of human thermoregulation with computational fluid dynamics for predicting human-environment interaction. *Journal of Building Performance Simulation*, 3: 233-243.
- Cook M, et al. (2013). Coupled CFD and thermal comfort modeling in cross-ventilated classrooms. In: Proceedings of ASHRAE Annual Conference, Denver, USA.
- Cropper P, et al. (2008). Exchange of simulation data between cfd programmes and a multisegmented human thermal comfort model. In: Proceedings of Air Conditioning and the Low Carbon Cooling Challenge, Windsor, UK.
- Fiala, D. et al. (2001) Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. *Int. J. Biometeorol.*, 45: 143-159
- Gagge AP et al.(1971) An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response. *ASHRAE Transactions.*;77:247-262.
- Gan, G. (1995) Evaluation of room air distribution systems using computational fluid dynamics, *Energ. Buildings*, 23, 83-93.
- Gao NP, Niu JL (2005). CFD study of the thermal environment around a human body: A review. *Journal of Indoor Built Environment*, 14: 5-16.
- Hand, J. (2003) *The ESP-Cookbook*. ESRU Publications: University of Strathclyde, Glasgow,
- Karaki W., Ghaddar N., Ghali K., Kuklane K., Holmer I., Vanggaard L., (2013) Human thermal response with improved AVA modeling of the digits, *Int. J. Therm. Sci.* 67 41e52.
- Murakami S, Kato S, Zeng J (1995) Development of a computational thermal manikin—CFD analysis of thermal environment around human body. In: Proceedings of Tsinghua HVAC'95, Beijing, China, Vol. 2, pp. 349-354.
- Nielsen PV, Murakami S, Kato S, Topp C, Yang JH. Benchmark tests for a computer simulated person. Project report. Denmark: Aalborg University, 2003. p. 7.
- Salloum M, Ghaddar N, Ghali K. (2007) A new transient bioheat model of the human body and its integration to clothing models. *International Journal of Thermal Sciences*;46(4):371e84.
- Sørensen D.N., Voigt L.K. (2003), Modeling flow and heat transfer around a seated human body by computational dynamics. *Building and Environment*, 38 pp. 753-762
- Srebric J, Vukovic V, He G, Yang X, (2008) CFD boundary conditions for contaminant dispersion, heat transfer and airflow simulations around human occupants in indoor environments, *Building and Environment* 43 (3) 294-303.

INTERACTIONS BETWEEN THERMAL AND VISUAL (DIS-)COMFORT AND RELATED ADAPTIVE ACTIONS THROUGH CLUSTER ANALYSES

M. Schweiker¹ and A. Wagner¹

¹Building Science Group, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany

ABSTRACT

The objectives of this study are to analyze interactions between thermal and visual influences on comfort and behaviors and to present a clustering method based on the results of mixed-effect regression analyses for simulation and control purposes. Results show a) interactions between thermal and visual influences on comfort and behavior, b) the advantage of this method in creating independent and distinct patterns related to thermal comfort, visual comfort, and occupant behavior, and c) that the relationship between clusters e.g. between clusters of thermal and visual comfort or between thermal comfort and heating behavior is not significant.

INTRODUCTION

Averaged models related to thermal comfort and occupant behavior are facing limitations in the context of building performance prediction and building operation. On the one hand, they are restricted in looking at unidimensional influences on behavioral actions, e.g. at the effect of indoor and outdoor thermal conditions on controls able to control thermal conditions (Haldi and Robinson, 2009), but not whether indoor visual conditions moderate such relationships.

In addition, researchers in the fields related to occupants' comfort and behavior recognized limitations in the application of averaged models for advanced building energy concepts. In order to show and model the diversity in both aspects, previous studies presented simplified and partly artificial classifications (e.g. active/passive

occupants (D'Oca et al., 2014) or energy frugal/indifferent (Hong et al., 2015)) or data-driven distributions of behavioral patterns (Haldi et al., 2016). At the same time, looking at the individual level is also beyond practical application.

The objectives of this paper are a) to look at interactions between thermal and visual influences on comfort and behaviors related to one of these aspects and b) to introduce a data-driven method to define specific patterns (clusters) of perceptive (comfort votes) and behavioral responses.

These objectives are addressed through four research questions.

- 1) To what extent moderate visual parameters of the physical environment interactions with the thermal environment and vice versa?
- 2) What are characteristics of individual clusters of comfort and behavior in relation to thermal and visual aspects of the indoor environment?
- 3) Is there a relationship between the clusters a person is assigned to with respect to thermal perception, visual perception, thermal behavior, and visual behavior?
- 4) Is there a relationship between individual factors (e.g. demographics and psychological traits) and the probability of membership in a cluster?

METHODS

Datasets used

Two data sets were used for the following analysis. Both data sets derive from experimental studies with human subjects in a field laboratory, which provides working conditions in a realistic office setting with controlled indoor environments and connection to the outdoors.

The study leading to the first dataset, in the following referred to as data set A, is described in detail in previous publications (Schweiker et al., 2012; Schweiker and Wagner, 2016). During this study, 36 subjects were asked to work three full working days of 8 hours each in the field laboratory. All subjects were of student age and reacted to a public call for participants. None of the participants was connected to the research team. Subjects had to bring their own work and were asked to fill in questionnaires in average every 90 minutes. During these experiments, they were allowed to adjust their clothing levels, open windows, adjust the external blinds, use the ceiling fan, and interact with the artificial lighting.

The three days differed in the number of persons sharing an office room – one day, subjects were alone, another day, two persons were sharing the room, and a third day, four persons were sharing the room. The order of conditions was balanced.

For this paper, only the data from days with single-person (referred to as A1) and two-person offices (A2) was considered.

The second dataset (dataset B) derives from an unpublished experiment looking at the interaction between visual and thermal influences on people's perception and behavior.

For the first year of this study, 24 subjects were asked to work in the field laboratory for 4 full working days during 4 seasons, i.e. in total 16 working days. Half of the subjects were 32 years or younger, the other half were 50 years or older. In addition, half of them were female. As for the first study, subjects reacted to a public call for participants.

During the 4 working days in each season, subjects experienced 6 different conditions (two

of them twice). These conditions varied in the degree of control subjects' had over thermal and visual aspects of the indoor environmental conditions. In all conditions, subjects were allowed to adjust their clothing levels. In three conditions, subjects were allowed to tilt the windows, adjust the blinds, and interact with artificial lighting. At the same time, the indoor thermal conditions were beyond their control and fixed in terms of the operative temperature to one of 20°C, 25°C, or 30°C. During the other three conditions, subjects were allowed to tilt or open the window, adjust the thermostat for heating or cooling. The indoor lighting level was beyond their control and fixed by means of automated blinds and artificial lighting in terms of the illuminance level to one of 300lx, 500lx, or 1,000lx.

For all experimental protocols, ethical clearance was obtained and all subjects gave their written informed consent prior to participating.

Analysis procedures

The analysis procedures consist of four steps. All steps were done using the statistical software package R (R Development Core Team, 2012) and the packages lmer (Bates et al., 2014) and nnet (Venables and Ripley, 2002).

In the first step – related to research question 1 – the data from study B was analyzed by means of mixed effect logistic regression analysis in order to reveal interactions between visual and thermal environmental parameters on their effect on subjects' behavioral actions. For this analysis, classical Bernoulli models related to the state of a control object were used. The dependent variables – the interactive opportunities – were the window state (open/close), the state of the thermostat (heating on/off – note that only heating was considered due to a negligible number of cooling interventions), and the state of artificial lighting (on/off). As independent fixed effects were considered the operative temperature, the outdoor air temperature, the indoor illuminance level, and the global solar radiation together with their interaction terms. All independent variables were normalized based on their means and standard deviations. The subject identifier was considered as independent random effect. For

this analysis, function glmer with family binomial and bobyqa optimizer was used.

For the second to fourth step – related to research question 2 – both datasets were considered.

In the second step, mixed effect regression analysis was used to estimate the regression parameters related to a variety of models as presented in Table 1. In each model, the subject identifier was considered as independent random effect. In contrast to common approaches, which are solely looking at the resulting model fit, we stored the resulting intercept and slope for each model and each subject.

Table 1: Dependent and independent variables considered for the mixed effect regression analysis.

Data	Dependent variable	Independent variable
A (A1/A2)	Thermal sensation (TS) Thermal preference (TP)	Predicted Mean Vote (PMV)
	Window opening Ceiling fan usage	PMV
B	TSV TPV	PMV
	Window opening Heating set point Cooling set point	Outdoor air temperature
	Visual sensation (VS) Visual preference (VP)	Indoor illuminance level
	Blinds usage Lighting usage	Outdoor illuminance level

In the third step, a cluster analysis (k-means) was applied on the stored values of regression parameters for intercept and slope for each subject. R function kmeans was used and the number of clusters was fixed to 4 due to the limited number of data points. This analysis leads to one cluster number for each subject and each dependent variable.

In the fourth step, multinomial logistic regression analysis was performed in order to investigate the influence of sex, age, and thermos-specific self-efficacy (specSE) on the membership in a particular cluster. According to Hawighorst, Schweiker, and Wagner (2016), “specSE describes peoples' expectations towards their

competences to execute desired operations improving their perception of the thermal environment successfully”. Consequently, the dependent variable in this analysis was the cluster number, while the independent variables were age, sex, and the specSE. R function multinom was used for this analysis.

RESULTS

Table 2 shows the normalization parameters for the four independent variables considered for the first analysis looking at moderating effects of visual and thermal conditions.

Table 2: Normalization parameters.

Data point	Mean value	Standard deviation
Indoor operative temperature (Tin) [°C]	25.2	3.06
Outdoor temperature (Tout) [°C]	15.5	8.12
Indoor illuminance (Ev) [°C]	1010	623
Global solar radiation (Iglob) [°C]	372	282

The mixed effect logistic regression analysis revealed that the independent variables and their interaction terms were highly significant at $p < 0.1$ with few exceptions. Due to the number of data points (192,343) this is not coming to a surprise. With effect sized being complex to be explored in multivariable models including interaction terms, the non-standardized effect sizes are presented graphically in Figures 1 and 2 for the analyzed heating and lighting behavior.

Figure 1 shows that the probability of heating switched on increases with decreasing outdoor temperatures. At the same time, there is a strong effect of visual parameters on the probability. With decreasing illuminance levels, the heating probability increases (blue line) and with decreasing global solar radiation, the probability decreases (green line). Thereby, the effect of indoor illuminance levels is higher than that of solar radiation.

In contrast, Figure 2 shows that the probability of lighting switched on does not depend strongly on thermal characteristics of the indoor and outdoor environment. In general, the probability of lighting being switched on is rather low, which can be explained by the working period (9:30 am to 4:30pm) and high percentage of glazing of the facility, so that most of the experimental

time, indoor illuminance levels were sufficient for working.

Comparing the effect of indoor operative temperature with that of the outdoor temperature, the latter one shows a bigger influence on the lighting probability, while the former hardly changes it.

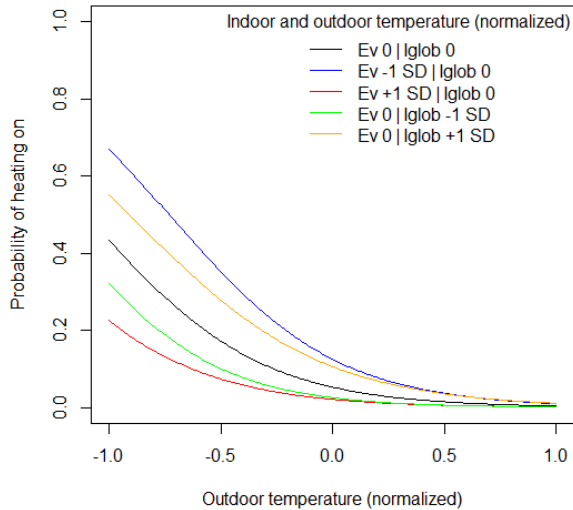


Figure 1: Probability of heating switched on in relation to the outdoor temperature, indoor illuminance levels (Ev), and global solar radiation (Iglob). For explanation of normalized values see Table 2.

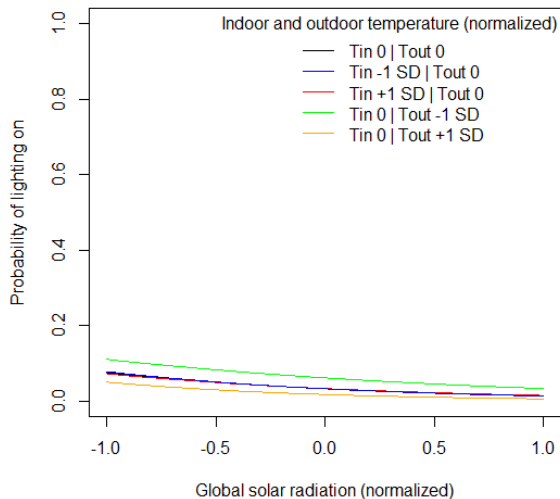


Figure 2: Probability of lighting switched on in relation to the global solar radiation, indoor operative temperature (Tin), and outdoor temperature (Tout). For explanation of normalized values see Table 2.

Figures 3 to 5 present exemplarily the outcome of the cluster analysis for the window opening behavior for dataset A1. The clusters identified based on the regression coefficient determined by mixed effect regression analysis shown in Figure 3 lead to distinct behavioral patterns as shown in Figure 4. These patterns differ in their

t_{50} -value (e.g. cluster 4 has a probability of 0.5 at a PMV of -0.75, while the one of cluster 2 is at a PMV of +.4) and their slope, i.e. the range of the independent variable leading to a switching behavior (e.g. small for cluster 2 and large for cluster 4).

Similar distinct patterns were also found for the other dependent variables related to occupant's behavior and comfort perception (see Figure 5), but cannot be shown here due to space limitations.

In general, the number of 4 clusters was found to be meaningful in order to extract distinct patterns. A higher number of clusters would be possible, but led to rather small differences between individual behavioral patterns.

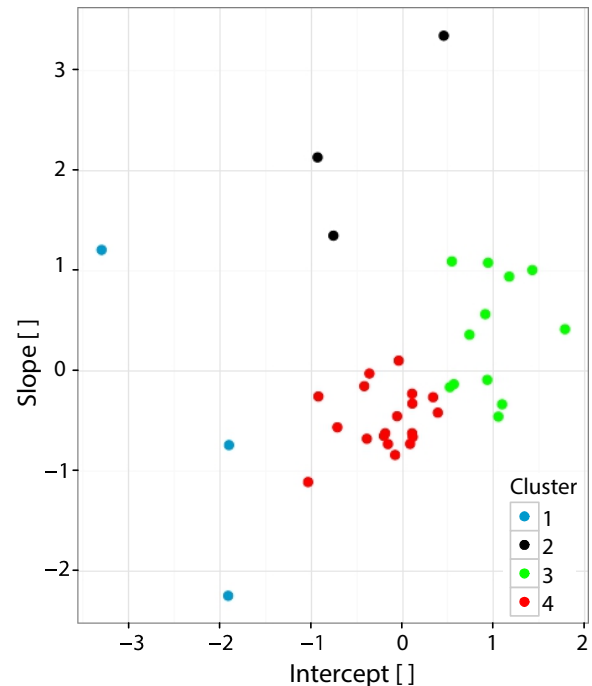


Figure 3: Representation of the results of cluster analysis. Points show normalized intercept and slope for each participant for the window opening behavior in dataset: A1. Colors show the assigned cluster.

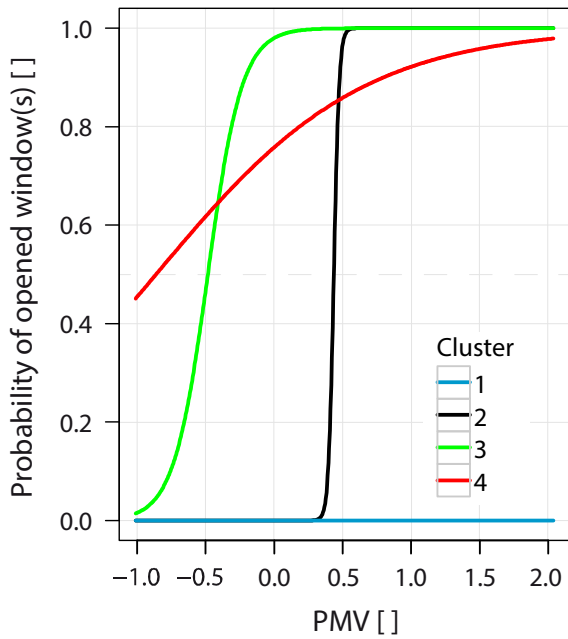


Figure 4: Resulting behavioral patterns based on cluster analysis of window opening behavior presented in Figure 3.

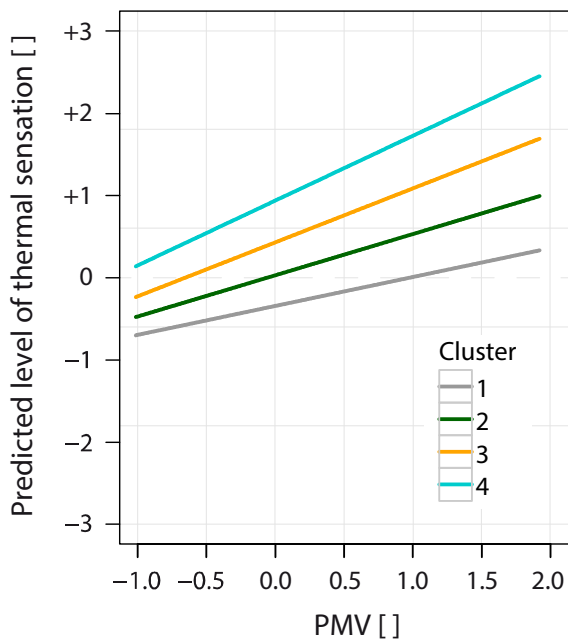


Figure 5: Predicted level of thermal sensation for each cluster based on dataset: A1.

Next, related to research question 3, we analyzed whether there is a relationship between the clusters a person is assigned to with respect to thermal perception, visual perception, thermal behavior, and visual behavior.

Figure 6 shows exemplarily the comparison of cluster a person is assigned to for thermal sensation and window opening behavior. The largest dot shows e.g. that a high number of persons assigned to cluster 4 in thermal sensation was assigned to cluster 3 for window

opening behavior. However, there is also a high number of persons assigned to cluster 4 of thermal sensation and cluster 2 for window opening behavior.

Such comparison was done for all possible combinations of clusters. Table 3 summarizes the outcome of this analysis grouped into four categories of comparisons. The first category compares two types of perceptions within the same domain of comfort, e.g. thermal sensation (TSV) with thermal preference (TPC). The second category compares perception between the visual and thermal domain of comfort. The third group are comparisons between perceptions and behaviors, while the fourth and last group compares two types of behaviors.

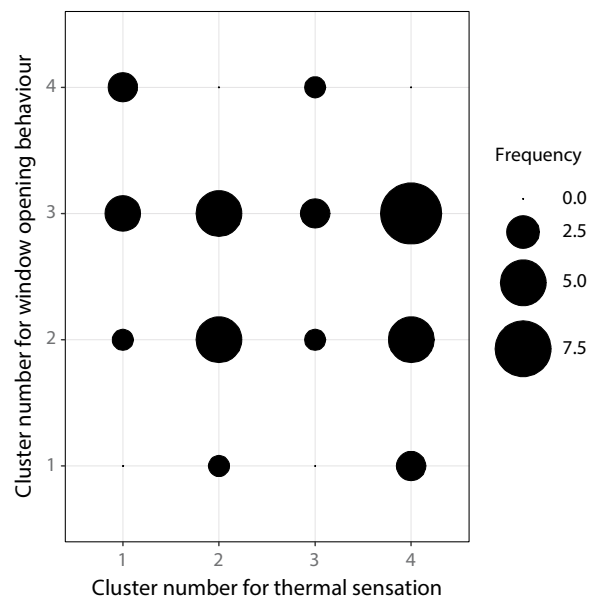


Figure 6: Comparison of agreement between cluster for thermal sensation and window opening behavior for individual persons based on dataset: A1.

Table 3: Congruence between assigned clusters

1) Sensation vs. preference <i>Example: TSV vs. TPV</i>	2) Perception A (thermal) vs. perception B (visual) <i>Example: TSV vs. VSV</i>
Observed fit [%]: 22 (11 – 34)*	Observed fit [%]: 34 (29 – 38)*
3) Perception vs. behavior <i>Example: TSV vs. window opening</i>	4) Behavior A vs. Behavior B <i>Example: Window opening vs. fan usage</i>
Observed fit [%]: 24 (12 – 37)	Observed fit [%]: 25 (20 – 29)*

In Table 3, for each group, the mean value for the percentage of persons being in the same cluster is shown together with the range.

A bit surprising, the observed fit is highest for the congruence between clusters of thermal and visual perception (group 2).

However, in general, the congruence is low (<50%), which questions the meaning of categorizing persons in general as active/passive or into other general categories. A meaningful approach would be to model a person in different behavioral patterns and comfort requirements.

The last aspect analyzed is related to demographic and personal factors leading to a higher probability of membership in a specific cluster.

Figures 7 and 8 present exemplary results of this analysis for the clusters shown in Figures 4 and 5, i.e. for window opening behavior (Figures 7 and 4) and thermal sensation (Figures 8 and 5).

As visible in Figure 7, there are significant differences in cluster membership between females and males and related to the value of specSE especially for clusters 2 and 4. The probability to belong to cluster 2 (characterized by opening the window at rather high values of PMV – see Figure 4), is higher for females and increases especially in females with a higher value of specSE, i.e. a higher confidence that ones action can change something in the thermal conditions. At the same time, the probability to belong to cluster 3 increases equally for females and males with lower specSE.

Figure 8 shows the relationship between the probability of membership in a specific cluster of thermal sensation and sex and specSE of a person. The probability to belong to cluster 4 (characterized by the lowest (closest to cold) thermal sensation given a specific PMV – see Figure 5) increases with a low value of specSE especially for females. At the same time, the probability to belong to cluster 1 (those stating the warmest sensations), increases slightly with increased specSE.

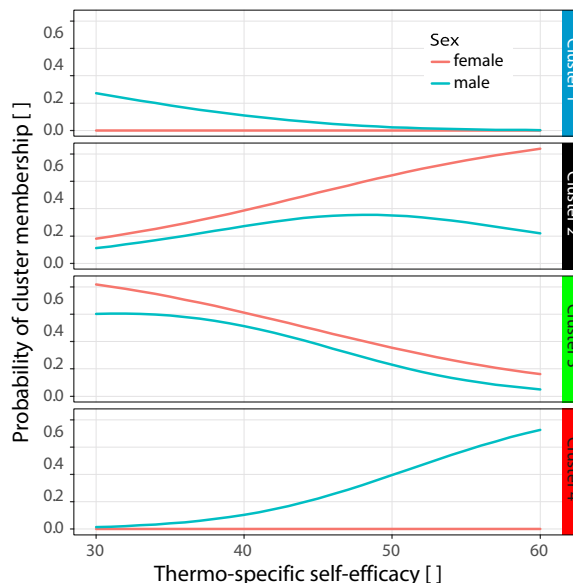


Figure 7: Probability of cluster membership for window opening behavior (see Figure 4 for characteristics of cluster) in relation to sex and specSE of subjects for dataset: A1.

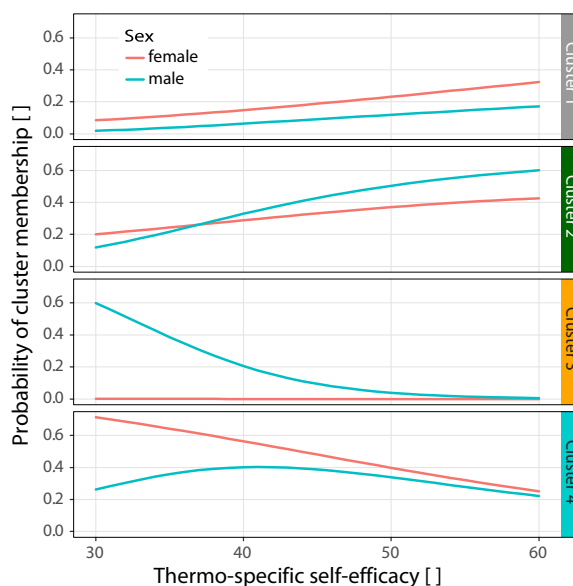


Figure 8: Probability of cluster membership for thermal sensation (see Figure 5 for characteristics of cluster) in relation to sex and specSE of subjects for dataset: A1.

CONCLUSION

This study shows that modelling approaches presented so far lack complexity with regard to three aspects.

First, the analysis presented above reveals that there is a strong effect of visual characteristics of the physical environment on behavioral patterns affecting the thermal indoor environment. At the same time, the effect of thermal characteristics has a negligible effect on behavioral patterns affecting the visual indoor environmental conditions.

Second, the average model of occupant behavior appears to be oversimplified and the method presented above looks promising in revealing meaningful and distinct behavioral patterns which differ not only in the magnitude of influences triggering a behavior (signified by differences in t_{50}), but also the strength of reaction given changes in the indoor environmental parameters.

Third, this paper showed a very weak relationship between clusters, which signifies that e.g. there is no such thing such as an always passive occupant, but that the activeness of an occupant and their comfort requirements differ between types of behaviors and perceptions. Thereby, the analysis method presented here allows extracting the frequency of specific clusters and related behavioral patterns, which can be easily implemented in advanced building procedures such as agent-based models by equipping a specific percentage of agents with a specific pattern based on empirical data.

In addition, we showed that there are individual factors such as sex or factors from the field of psychology related to the perceived level of control which have an influence on the probability of cluster membership.

Limitations are certainly given due to the small sample size and need to be overcome with future studies.

Future studies also need to look e.g. at multiple behaviors at once in order to analyze whether despite the results shown here, the definition of an active occupant is valid when considering the totality of a person's reaction to changes in the indoor and outdoor, thermal and visual environmental parameters.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was funded by the German Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi) with the project ID's: 0327241D, 03ET1035B, and 03ET1289B.

REFERENCES

Mitchell, J.W., Beckman, W.A. 1995. Instructions for IBPSA Manuscripts, SEL, University of Wisconsin, Madison USA.

Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. and Walker, S., 2014. Fitting Linear Mixed-Effects Models using lme4. *arXiv:1406.5823 [stat]*.

D'Oca, S., Fabi, V., Corgnati, S.P. and Andersen, R.K., 2014. Effect of thermostat and window opening occupant behavior models on energy use in homes. *Building Simulation*, [online] 7(6), pp.683–694. Available at: <<http://dx.doi.org/10.1007/s12273-014-0191-6>>.

Haldi, F., Calì, D., Andersen, R.K., Wesseling, M. and Müller, D., 2016. Modelling diversity in building occupant behaviour: a novel statistical approach. *Journal of Building Performance Simulation*, [online] pp.1–18. Available at: <<http://dx.doi.org/10.1080/19401493.2016.1269245>>.

Haldi, F. and Robinson, D., 2009. Interactions with window openings by office occupants. *Building and Environment*, 44(12), pp.2378–2395.

Hawighorst, M., Schweiker, M. and Wagner, A., 2016. Thermo-specific self-efficacy (specSE) in relation to perceived comfort and control. *Building and Environment*, 102, pp.193–206.

Hong, T., D'Oca, S., Turner, W.J.N. and Taylor-Lange, S.C., 2015. An ontology to represent energy-related occupant behavior in buildings. Part I: Introduction to the DNAs framework. *Building and Environment*, [online] 92, pp.764–777. Available at: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132315000761>>.

R Development Core Team, 2012. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. [online] Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available at: <<http://www.r-project.org>>.

Schweiker, M., Brasche, S., Bischof, W., Hawighorst, M., Voss, K. and Wagner, A., 2012. Development and validation of a methodology to challenge the adaptive comfort model. *Building and Environment*, 49(1), pp.336–347.

Schweiker, M. and Wagner, A., 2016. The effect of occupancy on perceived control, neutral temperature, and behavioral patterns. *Energy and Buildings*, 117, pp.246–259.

Venables, W.N. and Ripley, B.D., 2002. *Modern Applied Statistics with S*. Fourth ed. [online] New York: Springer. Available at: <<http://www.stats.ox.ac.uk/pub/MASS4>>.

EINSATZ VON ENTHALPIEÜBERTRAGERN IM MEHRGESCHOSSWOHNBAU IN KALTEN KLIMATEN

D. Siegele¹ und F. Ochs¹

¹Universität Innsbruck, AB Energieeffizientes Bauen, Innsbruck, Austria
Technikerstraße 13, AT-6020 Innsbruck, dietmar.siegele@uibk.ac.at

KURZFASSUNG

In dieser Simulationsstudie über Enthalpieübertrager im Mehrgeschosswohnbau wird gezeigt, dass die relative Luftfeuchtigkeit mit dem Einsatz dieser Technik deutlich angehoben werden kann. Dabei stehen detaillierte Messergebnisse aktueller marktverfügbarer Lüftungsgeräte aus unseren Labors zur Verfügung. Diese Messergebnisse erlauben auch einen neuen detaillierteren Modellansatz. Die Gesamteffizienz der Systeme mit Feuchterückgewinnung ist – bei gleichen Baugrößen – etwas geringer als mit Wärmeübertragern. Der Frostschutzbedarf ist aber im Gegenzug deutlich reduziert. Bei Standorten mit hohem Frostschutzbedarf kann dies auch zu einer positiven Gesamtenergiebilanz führen.

ABSTRACT

This simulation study about enthalpy transformers in multi-storey housing shows that the relative humidity can be significantly increased with the use of this technique. At the same time, detailed measurement results from our laboratories of ventilation units available on the market can be used. These measurements also allow a new detailed model approach. The overall efficiency of the system with enthalpy exchanger of the same sizes is slightly lower than with heat exchangers. The need for frost protection is, however, significantly reduced in return. For climatic regions with high energy demand for frost protection, this can also lead to a positive overall energy balance.

MOTIVATION

Als ein häufiger Kritikpunkt von kontrollierten Wohnraumlüftungen fällt immer wieder das Stich-

wort „trockene Luft“. Im Winter führt die kalte Außenluft in vielen Fällen tatsächlich zu einer Austrocknung der Raumluft. Meist wird dieses Problem im Falle von geringen Feuchtequellen (z.B. Wäsche wird nicht in der Wohnung zum Trocknen aufgehängt, sondern in einem Waschraum usw.) verschärft. Eine Reduktion des Luftwechsels auf ein hygienisches Minimum führt in einigen Fällen bereits zu einer Verbesserung oder Lösung des Problems. Jedoch kann es insbesondere in kalten Klimaten, wie den Alpenregionen oder in Skandinavien, weiterhin zu diesem Phänomen kommen.

Die Folgen von trockener Luft lassen sich primär in einem geringeren Komfort quantifizieren. Zu trockene Raumluft wird als kälter empfunden (He et al 2017) und die Folge ist eine höhere gewünschte Raumlufttemperatur. Im Gegenzug kann bei Vorliegen ausreichend hoher Raumluftfeuchte die Raumtemperatur gesenkt werden (Schnieders 2004). Als eine weitere Folge können aber auch Gesundheitsprobleme festgestellt werden. Detailliert wurde diese Problematik in Form einer Literaturrecherche von (Hahn 2007) aufgearbeitet. Als gesundheitlich unbedenklich wird häufig ein Wert von 30 % herangezogen. Eindeutige Studien mit einer ausreichend großen Stichprobe hierzu fehlen jedoch. Nach der EN 13779 ist für Nichtwohngebäude mit Klimatisierung ein unterer Grenzwert von 30 % einzuhalten. Für Wohngebäude existieren keine derartigen Grenzwerte.

Eine wissenschaftlich fundierte Festlegung einer quantitativen unteren Grenze für die relative Feuchte fällt entsprechend schwer. Nach Ansicht der Autoren sollte dennoch der Wert der relativen Feuchte selten unter 30 % fallen um die Komfortgrenzen einhalten zu können.

Durch den Einsatz von Enthalpieübertragern (Feuchterückgewinnung) können die Probleme von trockener Luft deutlich verringert werden. Als ein zusätzlicher Vorteil fällt wesentlich weniger Kondensat an als bei Wärmeübertragern. Dies erlaubt es den Bedarf der Frostschutzheizung zu reduzieren. Auch Probleme von Deckengeräten (deutlich reduzierte Effizienz bei Kondensatanfall und Kondensat läuft aus, wenn das Gehäuse nicht dicht schließt) lassen sich mit dem Einsatz von Enthalpieübertragern weitgehend lösen.

In (Schieders 2008) wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts bereits eine sehr ausführliche Simulationsstudie für ein Reihenhaus ausgearbeitet. Aufbauend auf diesen umfangreichen Erkenntnissen wurde in (Siegele 2018) eine Simulationsstudie für eine Wohnung für zwei verschiedene Standorte durchgeführt. Aufbauend auf dieser Studie werden in dieser Arbeit diverse Klimaten in Europa herangezogen. Verschiedene Auslegungsvolumenströme (Standard und Reduziert, wie in einigen Ländern zulässig) und eine Variation der Feuchtequellen wird vorgenommen. Die in den Simulationen angesetzten Parametern beruhen auf aktuellen Messdaten für ein am Markt verfügbares Gerät, welche im ersten Abschnitt der Ergebnisse präsentiert werden.

METHODIK

Simulationsobjekt

Im Rahmen des österreichischen FFG-Projekts SaLüH! werden kostengünstige Komponenten für die Sanierung für Lüftung und Heizung entwickelt. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde ein fiktives Mustergebäude entwickelt, welches einem repräsentativen Querschnitt der österreichischen Bausubstanz aus den 70-iger Jahren entsprechen soll. Abbildung 1 und Abbildung 2 zeigen den Grundriss und den Schnitt des Gebäudes. Die verwendete Energiebezugsfläche ist 70,8 m².

Das Gebäude wird fiktiv für den Klimastandort Innsbruck auf den sogenannten EnerPHit-Standard saniert. Das bedeutet, das Gebäude besitzt einen Heizwärmebedarf von 25 kWh/(m².a). Für die anderen Klimastandorte werden die Konstruktionsaufbauten beibehalten, d.h. je nach Klima ergeben sich unterschiedliche Ergebnisse für den Heizwärmebedarf.

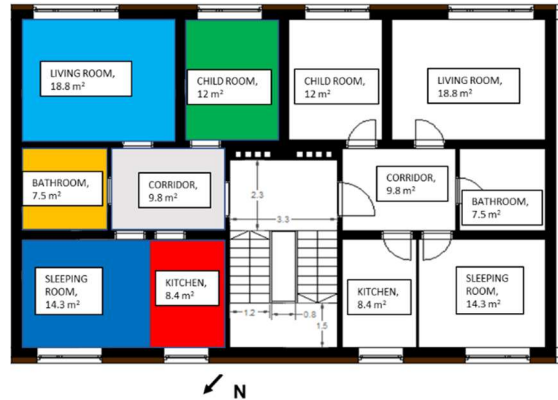


Abbildung 1: Grundriss des untersuchten Gebäudes mit der detailliert betrachteten Wohnung

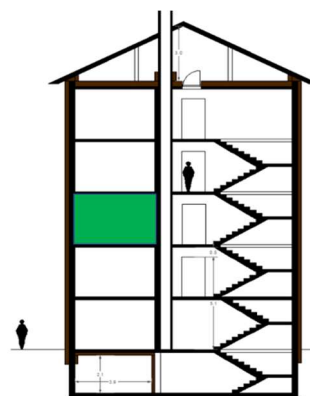


Abbildung 2: Schnitt des untersuchten Gebäudes mit der detailliert betrachteten Wohnung

Simulationsmodell und Modellierung

Als Simulationssoftware kommt das Programm MATLAB Simulink mit der Toolbox CARNOT (CARNOT 2017) zum Einsatz. Diese Toolbox wurde von der Universität Innsbruck in den letzten Jahren deutlich erweitert, insbesondere kommt ein detailliertes hygrothermisches Modell zur Simulation der Bauteile zum Einsatz (Siegele 2014). Die Simulationen wurden jeweils mit zwei Jahren Vorlaufzeit durchgeführt um Speichereinflüsse korrekt abzubilden.

Das in Abbildung 1 und 2 gezeigte Gebäude wurde vollständig in CARNOT abgebildet. Für die detaillierte Simulation wurde eine innenliegende Wohnung in sechs Zonen unterteilt und mit Belegungsprofilen versehen. Die Belegungsprofile orientieren sich an (Schnieders 2008), die Personenanzahl wurde aber immer bei drei belassen. Es ergeben sich damit Feuchtequellen von 230 g/h (Standardfall), 140 g/h (reduzierter Fall, kein Kochen) und 350 g/h (erhöhter Fall, tägliches Wäschetrocknen in der Wohnung).

Das Lüftungssystem wurde in Form eines modifizierten NTU-Ansatzes modelliert (Lui et al 2017).

$$NTU_T = \frac{U \cdot A}{\dot{m} \cdot c_p}$$

$$NTU_x = \frac{U_x \cdot A}{\dot{m}}$$

A ist die Fläche des Feuchteübertragers, \dot{m} der (balancierte) Massenstrom, c_p die Wärmespeicherkapazität (hier der feuchten Luft), U der effektive Wärmedurchgangskoeffizient und U_x der Feuchtedurchgangskoeffizient (Berechnungsverfahren dargestellt in (Ochs et al 2017)).

Der herkömmliche (häufig in Jahressimulationen verwendete) NTU-Modellansatz ist nur für Wärmeübertrager ohne Kondensatanfall korrekt. Sobald Kondensat entsteht, handelt es sich um einen Wärmeübertrager mit Phasenübergang, dessen Berechnung nicht trivial ist. Für Enthalpieübertrager ist der herkömmliche Ansatz höchstens näherungsweise korrekt, da die Feuchteübertragung aufgrund der Abhängigkeit des Feuchtedurchgangskoeffizienten von der relativen mittleren Feuchte ein nichtlinearer Prozess ist. Um eine Verbesserung des Modells zu erreichen, wurden für verschiedene Abluffeuchten verschiedene Werte von NTU berechnet (sogenannte Arbeitspunkte). Die Ableitung dieser Werte erfolgt direkt aus den Messergebnissen (vgl. Abschnitt Messungen).

Es ergeben sich somit

$$NTU_T = f(\varphi_{Abluft}, \dot{V})$$

$$NTU_x = f(\varphi_{Abluft}, \dot{V})$$

$$\vartheta_{Zuluft} = \frac{\vartheta_{Außenluft} + NTU_T \cdot \vartheta_{Abluft}}{1 + NTU_T}$$

$$x_{Zuluft} = \frac{x_{Außenluft} + NTU_x \cdot x_{Abluft}}{1 + NTU_x}$$

Wobei ϑ die jeweilige Temperatur, φ die relative Abluffeuchte und x die Abluffeuchte ist, wobei die Subskripte jeweils den Zustandspunkt des Lüftungsgeräts kennzeichnen.

Da die Raumtemperatur bei höheren Raumluftfeuchten reduziert werden kann, wurde ähnlich wie in (Schnieders 2008) eine adaptive Sollwert-Temperatur festgelegt. Die Sollwert-Temperatur bei 25 % r.F. beträgt 21 °C und wird bis max. 20,5 °C bei 50 % r.F. reduziert (vgl. Abbildung 3,

dabei ist die Wahl des *clothing* Faktors nur für den Absolutwert relevant, aber nicht für die Abhängigkeit von der relativen Feuchte). Die Berechnung erfolgt nach der EN ISO 7730.

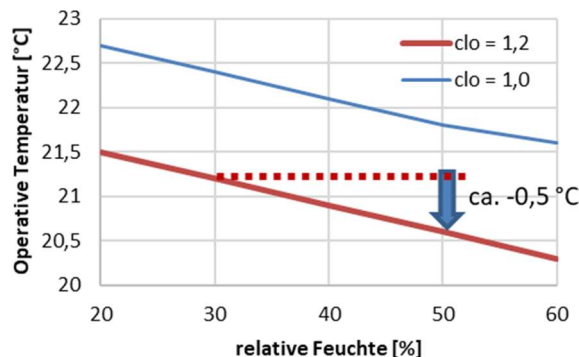


Abbildung 3: Potential zur Senkung der Soll-Temperatur bei einem konstanten PMV = 0, nach EN ISO 7730

Die Nachbarwohnungen besitzen ein gleiches Lüftungssystem. Die Soll-Temperatur ist jedoch immer ein Kelvin geringer als in der betrachteten Wohnung. Damit wird der Zustand eines unrealistischen adiabaten Falls verhindert und die Speichermassen werden korrekt bewertet.

Klimatensätze und Simulationsparameter

Als Klimatensätze wurden METEONORM Daten herangezogen. Dabei wurden die Standorte Innsbruck (AT), Bregenz (AT), Warth (AT), Gdansk (PL), London (GB), Lyon (F), Stockholm (SE) und Ludwigsburg (D) näher untersucht.

Es wurde drei verschiedene Volumenströme (80, 100 und 120 m³/h) und drei verschiedene Feuchtequellen (140, 230 und 325 g/h) simuliert. Als Personenbelegung wurden jeweils zwei Erwachsene und ein Kind angesetzt. Die erhöhte Feuchte entsteht beispielweise durch Wäsche aufhängen. Die Türen in der Wohnung wurden jeweils zu den Schlafzimmern und dem Bad als geschlossen betrachtet und zu Küche und Wohnzimmer als ständig geöffnet.

Messungen im Prüfstand

In unseren Prüfständen wurden im Rahmen des Projekts SaLüH! mehrere Lüftungsgeräte mit verschiedenen Auslegungsvolumenströmen und jeweils mit Wärmerückgewinnung (HRV) und Feuchterückgewinnung (ERV) vermessen. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse für das Lüftungsgerät KL170 der Firma KL Lufttechnik präsentiert.

ERGEBNISSE

Messungen: Wärmebereitstellungsgrad und Rückfeuchtezahl

In Abbildung 4 bzw. 5 sind der fortluftseitige Wärmebereitstellungsgrad (ohne Ventilatoren) und die Rückfeuchtezahl in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur und des Volumenstroms für das vermessene Lüftungsgerät dargestellt. Der Messfehler des Wärmebereitstellungsgrads beträgt jeweils weniger als absolut 1 %. Für die Rückfeuchtezahl beträgt der Messfehler in den relevanten Bereichen weniger als absolut 2 %.

Die Rückfeuchtezahl hängt stark von der mittleren relativen Feuchte im Feuchteübertrager ab. Dieser Aspekt wird hier nicht weiter diskutiert, die Eingangsdaten für die Simulation berücksichtigen diese Problematik mit dem modifizierten NTU Modell und weiteren, hier nicht dargestellten, Messergebnissen.

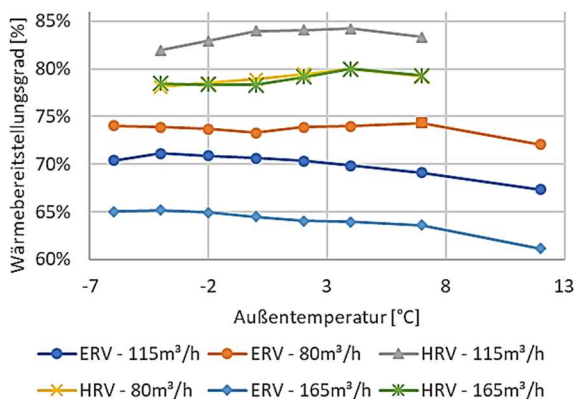


Abbildung 4: Wärmebereitstellungsgrad fortluftseitig gemessen (HRV: Wärmeübertrager, ERV: Feuchteübertrager)

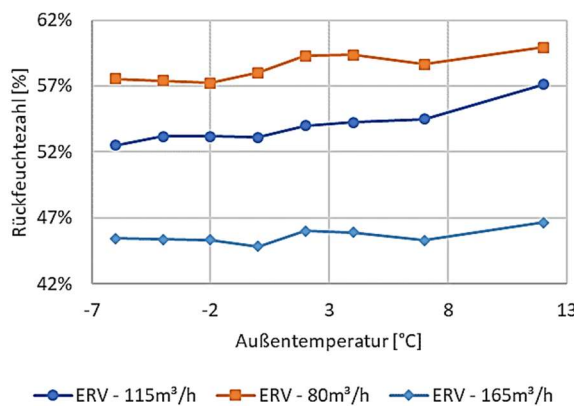


Abbildung 5: Rückfeuchtezahl fortluftseitig gemessen

Messungen: Frostschutz

Bereits in (Siegele 2018) konnte gezeigt werden, dass die Notwendigkeit den Frostschutz zu akti-

vieren von der anfallenden Kondensatmenge abhängt. Bei einem Wärmerückgewinner wird dies i.d.R. ab einer Außenlufttemperatur von -3 °C der Fall sein. Bei weniger Kondensatanfall (z.B. bei geringen Feuchtequellen) kann dieser Wert auch niedriger sein. Beim Einsatz eines Feuchterückgewinners ist der früheste Zeitpunkt bei -8 °C erreicht und kann in Abhängigkeit von der Abluftfeuchte noch deutlich geringer sein (vgl. Abbildung 6).

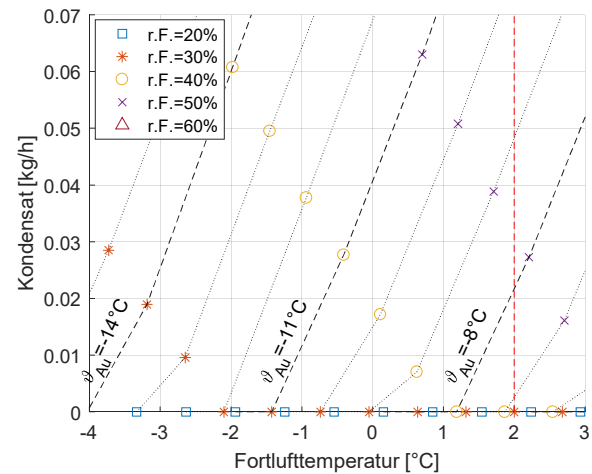


Abbildung 6: Kondensatanfall und damit Frostschutzgrenze für ERV

Simulation: Komfort

Der Hauptanwendungsfall von Feuchteübertragern (ERV) liegt derzeit in Mittel- und Nordeuropa in der Anhebung der relativen Luftfeuchtigkeit im Winter. In Abbildung 7 und 8 sind die Simulationsergebnisse für $120\text{ m}^3/\text{h}$ Zuluft und 230 g/h Feuchtequellen für verschiedene Standorte in Europa jeweils für HRV und ERV dargestellt.

Die Darstellung erfolgt jeweils in einem sogenannten Boxplot. Die mittlere rote Linie ist der Median der Simulationsdaten (immer jeweils nur die Winterperiode), d.h. 50 % der Zeit liegt der Wert darunter bzw. darüber. Die blauen Boxen geben jeweils an, dass diese Werte in 25 % der Zeit eingehalten werden und die strichlierten schwarzen Linien mit den Endmarkern jeweils weitere 25 % der Zeit. Die roten Punkte stellen Ausreißer da und werden als statistisch nicht signifikant beurteilt. Verursacht werden diese durch punktuelle Feuchtequellen (insbesondere in Küche und Bad). Nach unten sind keine statistischen Ausreißer vorhanden, da keine „plötzliche“ Entfeuchtung stattfindet.

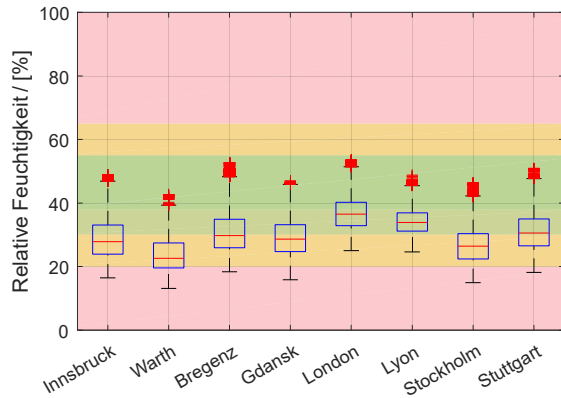


Abbildung 7: Relative Feuchte im Elternschlafzimmer (HRV, 120 m³/h, 230 g/h)

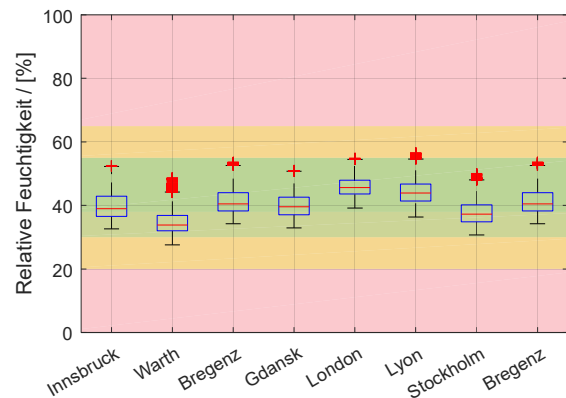


Abbildung 10: Relative Feuchte im Elternschlafzimmer (ERV, 100 m³/h, 140 g/h)

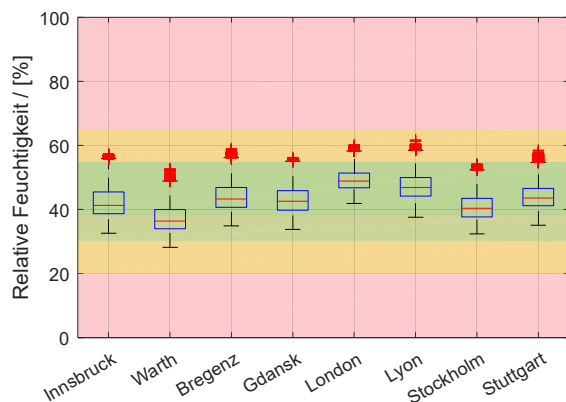


Abbildung 8: Relative Feuchte im Elternschlafzimmer (ERV, 120 m³/h, 230 g/h)

Es kann insbesondere im alpinen Bereich, aber auch in Nordeuropa eine sehr schlechte Situation beim Einsatz eines Wärmeübertragers beobachtet werden. Auch in London (wo langläufig von keiner Feuchteproblematik ausgegangen wird), liegen die Werte im Winter 20 % der Zeit unter der Behaglichkeitsgrenze.

Abbildung 9 und 10 zeigen ein weiteres Beispiel für einen reduzierten Luftwechsel von 100 m³/h und Feuchtequellen von nur 140 g/h.

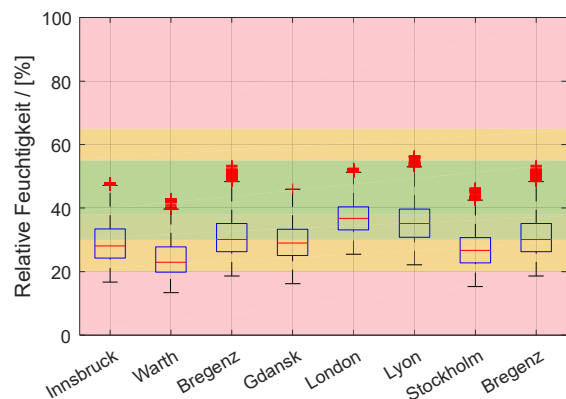


Abbildung 9: Relative Feuchte im Elternschlafzimmer (HRV, 100 m³/h, 140 g/h)

Das Ergebnis fällt auch hier erwartungsgemäß positiv für den Einsatz eines Feuchteübertragers aus. Lediglich am sehr kalten Standort Warth (AT) wird weiterhin 20 % der Zeit die Behaglichkeitsgrenze unterschritten. Bei einem höheren Anfall von Feuchte (vgl. Abbildung 8) wird auch hier die Behaglichkeitsgrenze kaum unterschritten.

Repräsentativ für den Klimastandort Innsbruck werden exemplarisch die detaillierten Ergebnisse für verschiedene Volumenströme und Feuchtequellen dargestellt und erläutert.

In Abbildung 11, 12 bzw. 13 sind die relativen Feuchten im Winter für den Wärmerückgewinner (HRV) für 120, 100 bzw. 80 m³/h Volumenstrom angeführt. Verwendet wurde jeweils eine Feuchtequelle von 230 g/h. Die farblichen Hintergründe sind für die unteren Bereiche aus dem Behaglichkeitsdiagramm von (Frank 1975) bei der jeweiligen Solltemperatur abgeleitet. So wird unter 20 % relativer Feuchte keine Behaglichkeitszone mehr definiert werden. Zwischen 20 und 30 % wurde ein Bereich definiert, der zwar „noch behaglich“ ist, aber aus schon diskutierten Gründen u.U. gesundheitsschädlich sein kann. Der Bereich zwischen 30 und 40 % ist „noch behaglich“ und Werte über 40 % werden als behaglich empfunden. Bei dauerhaften Werten von über 65 % muss im Winterfall an kalten Oberflächen erwartet Kondensat werden.

In allen Ergebnisabbildungen ist zu erkennen, dass die kritischen Zonen das Elternschlafzimmer und das Wohnzimmer sind. Bei 120 m³/h Zuluftvolumenstrom liegen beispielweise 25 % der Zeit die Werte im Elternschlafzimmer unter 24,0 % r.F. bzw. im Wohnzimmer unter

27,0 % r.F. Durch Reduktion des Zuluftvolumenstroms auf 80 m³/h kann dieser Wert lediglich auf 25,5 % r.F. bzw. 32,0 % r.F. erhöht werden, was immer noch deutlich zu gering ist. Das Bad besitzt eine vergleichsweise hohe Anzahl an oberen „Ausreißern“, welche durch die simulierten Duschvorgänge entstehen.

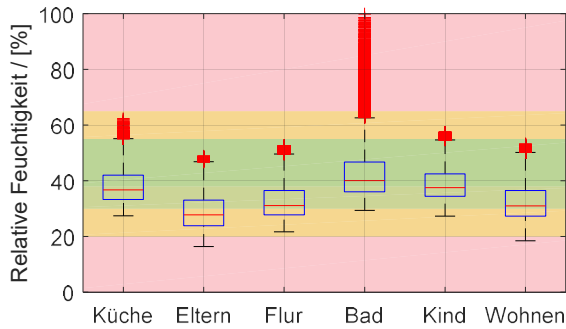


Abbildung 11: Relative Feuchte (Innsbruck, HRV, 120 m³/h, 230 g/h)

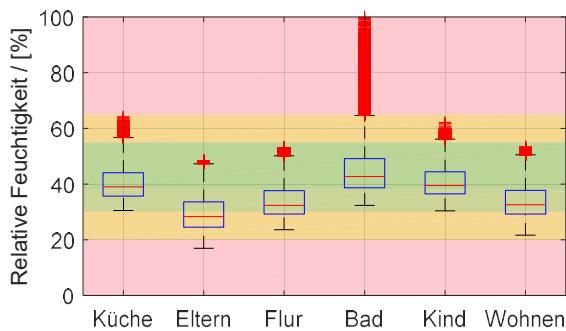


Abbildung 12: Relative Feuchte (Innsbruck, HRV, 100 m³/h, 230 g/h)

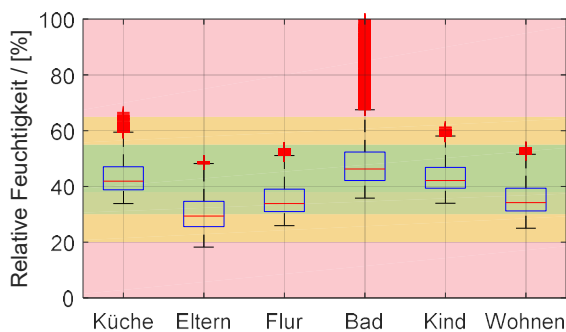


Abbildung 13: Relative Feuchte (Innsbruck, HRV, 80 m³/h, 230 g/h)

Die Auswirkungen dieser Reduktion sind zudem erheblich, wie Abbildung 14 und 15 darstellen. Mit einem Zuluftvolumenstrom von 100 m³/h (Abbildung 14) kann eine Raumluftqualität von IDA 2 (vgl. EN 13779) jederzeit eingehalten werden. Mit nur 80 m³/h (Abbildung 15) werden jedoch CO₂-Konzentrationen von über 1000 ppm in den Schlafzimmern häufiger. Mit einer (hier nicht simulierten) bedarfsgesteuerten Lüftung könnte diese Problematik entschärft werden, jedoch

würde sich die relative Feuchte weiterhin ähnlich zu Abbildung 13 verhalten.

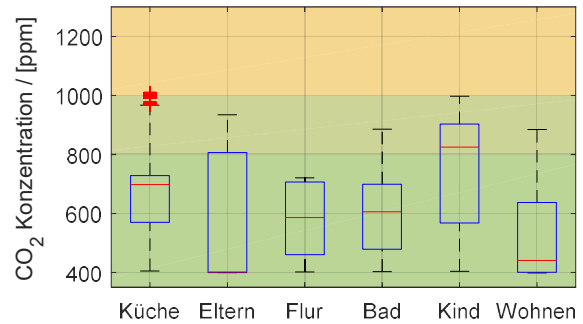


Abbildung 14: CO₂ (Innsbruck, HRV, 100 m³/h, 230 g/h)

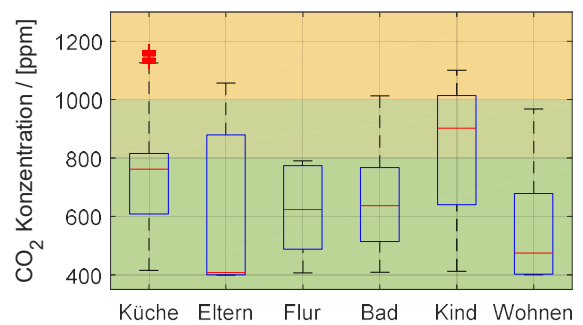


Abbildung 15: CO₂ (Innsbruck, HRV, 80 m³/h, 230 g/h)

In Abbildung 16 ist nun der Fall mit Feuchteübertrager (ERV) und 120 m³/h Zuluftvolumenstrom dargestellt. Es können in allen Räumen sehr gute Werte für die relative Feuchte erzielt werden bei einer gleichzeitig sehr hohen Raumluftqualität (die CO₂-Konzentration liegt nie über 900 ppm). Für das Elternschlafzimmer liegt die relative Luftfeuchtigkeit in 25 % der Zeit zwischen 32,5 und 38,5 % r.F., und für das Wohnzimmer zwischen 36,0 und 41,0 % r.F.

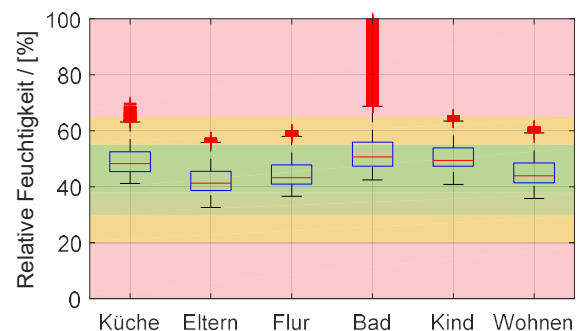


Abbildung 16: Relative Feuchte (Innsbruck, ERV, 120 m³/h, 230 g/h)

Allerdings kann in einigen Zeitpunkten eine zu hohe Feuchte beobachtet werden (Küche und Kinderzimmer), die bereits Schimmelwachstum ermöglichen könnten. Bei einer Reduktion des

Luftwechsels auf $100 \text{ m}^3/\text{h}$ ist eine Überschreitung der Feuchte sehr häufig der Fall. Im Rahmen dieser Studie wurde auf eine genaue Bewertung ob Schimmel auftritt verzichtet. Bei der realen Geräteauslegung kann eine solche Bewertung aus ökonomischer Sicht nicht durchgeführt werden. Deshalb müssen unserer Einschätzung nach Hersteller von Lüftungsgeräten jedenfalls die Raumlufffeuchte (auch beispielsweise in der Abluft) messen und den Volumenstrom im Bedarfsfall automatisch erhöhen, auch da nicht kalkulierte höhere Feuchtequellen auftreten können.

Simulation: Heizwärme- und Energiebedarf

Die geringere thermische Effizienz (vgl. Abbildung 4) eines ERV sollte zu einem erhöhten Heizwärmebedarf führen. Die mögliche Reduktion der Senkung der Soll-Temperatur (vgl. Abbildung 3), kann jedoch zu einer Verringerung desselben führen.

In Abbildung 17 sind die Ergebnisse des Heizwärmebedarfs der Wohnung dargestellt. In kalten Klimaten (hier Innsbruck, Bregenz, Warth, Gdansk und Stockholm) ist der Bedarf tatsächlich erhöht, jedoch nur um 2 % (bzw. um 5 % in Warth). An den vergleichsweise milden Standorten London und Lyon ist der Verbrauch nicht erhöht.

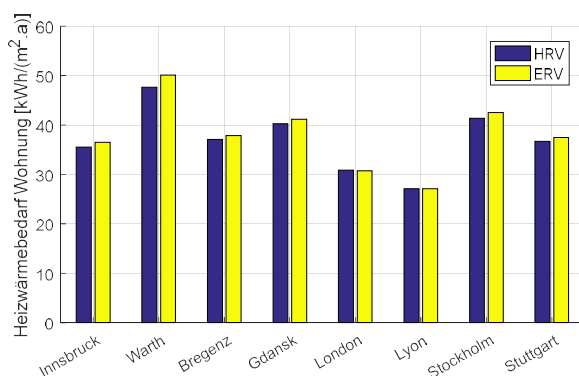


Abbildung 17: Heizwärmebedarf ($120 \text{ m}^3/\text{h}$, 230 g/h)

Hier nicht dargestellt sind die Ergebnisse des gesamten Gebäudes. Beim Heizwärmebedarf kann dort eine Reduktion eben dieses beim ERV beobachtet werden. Diese Ergebnisse erscheinen den Autoren nicht schlüssig und sind der Meinung, dass sich hier die Schwächen einer einfachen Zonierung der Nachbarwohnungen zeigen und dies noch näher betrachtet werden muss.

In Abbildung 18 ist der elektrische Energiebedarf der Lüftung dargestellt. Der Ventilatorstrombe-

darf ist für den Fall ERV geringer, da der Feuchteübertrager einen geringeren Druckabfall besitzt, als der Wärmeübertrager. In Klimaten mit Bedarf an Vorheizung für den Frostschutz kann der elektrische Energiebedarf deutlich reduziert werden. Derzeit wird untersucht, ob der Einsatz eines Frostschutzregisters überhaupt noch notwendig ist (wie z.B. in Warth) da, wie in Abbildung 6 gezeigt, der Kondensatanfall im Fall eines Feuchteübertragers auch von der Abluffeuchte abhängt.

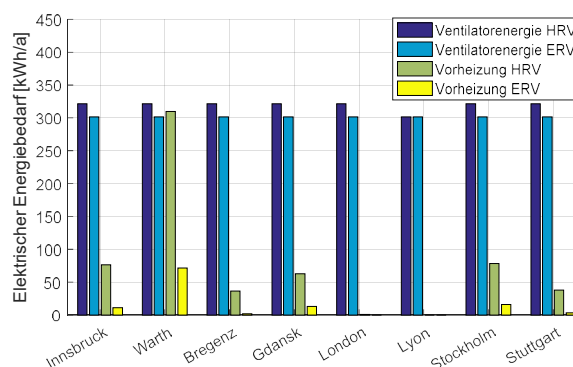


Abbildung 18: Elektrische Energiebedarf ($120 \text{ m}^3/\text{h}$, 230 g/h)

DISKUSSION

Die hier dargestellten Ergebnisse zeigen das Potential auf mit dem Einsatz eines ERV die relative Raumlufffeuchte im Winter deutlich anheben zu können. Selbst bei sehr geringen Feuchtequellen ist eine deutliche Erhöhung auch in sehr kalten Regionen festzustellen. Die letztlich erzielbare relative Luftfeuchtigkeit hängt aber erwartungsgemäß weiterhin von den vorhandenen Feuchtequellen ab. Interessant ist zudem, dass auch in als, sehr oft, feucht empfundenen Standorten (wie London) die Komfortgrenzen mit einem HRV nicht immer eingehalten werden können. Eine Reduktion des hygienischen Luftwechsels stellt im Vergleich zum ERV keine äquivalente Lösung dar.

Die Gefahr einer Überfeuchtung in Neubauten muss noch näher betrachtet werden. Jedenfalls müssen Geräte den Fall einer Überfeuchtung automatisch erkennen und verhindern können (z.B. durch Anordnung eines Feuchtesensors).

Der Energiebedarf für die Frostfreiheit kann in sehr kalten Regionen massiv reduziert werden, in mäßig kalten Regionen kann darauf u.U. gänzlich verzichtet werden. Auch hier ist die Messung der Abluffeuchte von Relevanz und für eine Optimierung der Frostschutzstrategie sollte diese sinngemäß eingesetzt werden.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der Einsatz von Enthalpieübertragern ermöglicht ein neues weites Einsatzspektrum für innovative Systeme. Deckenmontierte Geräte benötigen keinen Kondensatablauf mehr und das Problem eines „Überfluten“ des Wärmeübertragers kann effektiv gelöst werden. Die Zulufltheizung kann für mehr Einsatzgebiete interessant werden, da deutlich höhere Luftwechselzahlen angestrebt werden können, ohne das Gebäude auszutrocknen. Hauptanwendungszweck wird jedoch die Verbesserung des Komforts und der Luftqualität bleiben.

In weiteren Studien werden noch weitere Klimastandorte analysiert, um die Ergebnisse ortsspezifisch interpretieren zu können. Das Gebäude soll dann jeweils auf einen einheitlichen Standard renoviert werden (d.h. die Bauteile werden an die jeweiligen Standorte angepasst). Dies wird eine bessere Interpretation der tatsächlichen zusätzlichen Verluste durch den Enthalpieübertrager erlauben. Eine Untersuchung für verschiedene Effizienzen der Feuchterückgewinnung sollte durchgeführt werden, um Aussagen über ein Optimum an verschiedenen Standorten durchführen zu können.

Im Sommerfall kann der Einsatz einer Feuchterückgewinnung zu einem Entfeuchtungseffekt führen. Dies erfordert jedoch genauere Untersuchung in Zusammenhang mit Kühlung und anderen weltweiten Klimaten. Auch die verwendete Simulationsmethode (NTU-Berechnung in Arbeitspunkten) muss für diesen Anwendungszweck noch einmal kritisch hinterfragt werden, und u.U. erweitert werden.

DANKSAGUNG

Diese Arbeit ist ein Teil des Forschungsprojekts SaLüH! Sanierung von MFH mit kleinen Wohnungen - Kostengünstige technische Lösungsansätze für Lüftung, Heizung und Warmwasser (2015-18); Förderprogramm Stadt der Zukunft, FFG, Projektnr.: 850085. Das Lüftungsgerät wurde dankenswerterweise von der Firma KL Lufttechnik bereitgestellt.

LITERATUR

Schnieders, J.; Pfluger, R.; Feist, W.: Energetische Bewertung von Wohnungslüftungsgeräten mit Feuchterückgewinnung. Forschungsprojekt DBU. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2008.

Hahn, von N.: „Trockene Luft“ und ihre Auswirkungen auf die Gesundheit – Ergebnisse einer Literaturstudie, Innenraumluft 67, 2007.

He, M., Li, N., He, Y., He, D., Wang K.: Influences of Temperature and Humidity on Perceived Air Quality with Radiant Panel Workstation. Procedia Engineering, Volume 205, 2017.

ÖNORM EN 13779:2018 01 01, Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlssysteme

Siegele, D.; Ochs, F.: Modelling and Simulation of façade integrated active Components with Matlab/Simulink. In: van Treeck, C.; Müller, D.: BauSIM 2014: Human-centred building(s). IBPSA, 2014.

Lui, P.; Alonso M.J.; Mathisen; H.M.; Simonson, C.: Energy transfer and energy saving potentials of air-to-air membraneenergy exchanger for ventilation in cold climates, Energy and Buildings 135, 2017.

Ochs, F.; Hauer, M.; Bianchi, M. J.; Siegele D.: Indoor Air Quality, Thermal Comfort and Energy Performance of Membrane Energy Recovery Ventilation in Combination with an Exhaust Air Heat Pump, IBPSA Building Simulation 2017, San Francisco, 2017.

Schnieders, J.: Simulationen zur Effizienz der Wärmeübergabe. In: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 28, Wärmeübergabe- und Verteilverluste im Passivhaus, Passivhaus Institut, 2004.

Siegele, D.; Ochs, F.: Simulationsstudie über den Einsatz von Enthalpieübertragern in kalten Klimaten. In: Internationale Passivhaustagung 2018. München, 2018

ÖNORM EN ISO 7730: 2006 05 01: Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit

Frank, W.: Berichte aus der Bauforschung – Raumklima und Thermische Behaglichkeit. Berlin-München-Düsseldorf, Ernst & Sohn KG., 1975

STRUCTURED REPRESENTATION AND SHARING OF MONITORED OCCUPANCY-RELATED DATA FOR BUILDING PERFORMANCE SIMULATION APPLICATIONS

M. Taheri¹, F. Tahmasebi² and A. Mahdavi²

¹ arbnco Ltd., Glasgow, United Kingdom

² Department of Building Physics and Building Ecology, TU Wien, Vienna, Austria

ABSTRACT

Researchers require high quality detailed input data to apply computational approaches and develop reliable models. Toward this end, open access data is of essential importance. An important prerequisite of pervasive data sharing is the availability of a systematic ontology and standardized data formats. To address this need, we previously introduced an ontology for the representation and incorporation of multiple layers of occupancy-related data obtained via building monitoring. In the present contribution, we use this ontology as a starting point toward identification and illustration of a hierarchical data format, suitable for managing data collections of different sizes and complexity.

INTRODUCTION AND BACKGROUND

Occupant behavior is suggested to be one of the contributing factors to the uncertainties in simulation-based building performance predictions. In order to have a reliable basis for simulation of occupants' presence and control actions in building performance studies, a number of occupancy-related models have been introduced. Generating user-related behavioral models require, among other things, a good understanding and detailed information on the inhabitants and their actions, internal and external environmental conditions, control systems and devices, equipment, and energy flows in buildings. To enhance the reliability and applicability of occupant behavior models, high quality and detailed input data from large samples of different types of buildings in different contexts are required. Arguably, this demand has not been met satisfactorily.

Research teams across the world tend to work based on rather limited samples of data.

As well-structured data is key to support the building science research community, systematic efforts must be made to ensure that research data can be made publicly accessible. Unlike building science, some other disciplines, such as life sciences, have established procedures and platforms to facilitate archiving and sharing monitored data.

Generally, data sharing has various benefits, including, increasing efficiency regarding time and effort, facilitating new research, collaborative and interdisciplinary data processing, and assessing data quality. Scientific research in the recent years has become increasingly collaborative and interdisciplinary. Thereby, data sharing enables researchers to effectively examine the reliability of research results (Tenopir et al. 2011).

Even though the importance of open access data is undisputed, there is still a paucity of uniform standardized platforms where data can be openly shared and processed (Gault and Koers 2015). Efforts have been undertaken to provide such platforms for sharing scientific data and related material. Examples include Scientific Data (Springer Nature 2018) by Nature Publishing Group, Open Data pilot (Elsevier 2018a), as well as Data in Brief (Elsevier 2018b) by Elsevier.

To consistently support research via data sharing, "metadata" must be comprehensively collected and systematically stored, including all information regarding relevant experimental setup, collected data, as well as data cleaning

and pre-processing (Grewe et al. 2011). Ideally, metadata sets should be a machine readable. Shortcomings in this area are presumably due to the complexity of the process together with deficiencies in conceptual frameworks and software support systems (Zehl et al. 2016).

Another essential prerequisite of data sharing is the availability of a systematic ontology. For instance, in building monitoring and data collection campaigns, developers and users appear to operate without an explicit documented, systematic, detailed, and comprehensive ontology. Well-developed schemes, such as IFC standards (ISO 2013), are available for representation of building fabric (e.g., walls, roofs, technical elements, etc.). However, there is a lack of explicit schemes for representation of sensory information from buildings. In a previous effort, we have addressed this circumstance by introducing an ontology that specifically captures the multitude of dynamic state and performance data, and thus, goes beyond simple representations of individual sensors as technical artefacts (Mahdavi and Taheri 2017).

Standardized data formats represent another important requirement for pervasive data sharing. Different file formats have been developed and are commonly used to store data. These include, among others, Comma-Separated Values (CSV), Plain Text (txt), JavaScript Object Notation (JSON), Extensible Markup Language (XML), Hypertext Markup Language (HTML), Images, and Hierarchical Data Format (HDF). Choosing the right format ensures that data can be further reused and managed.

One of the most common structures used for data handling and exchange is "tabular". In this format, data is organized into rows and columns, listing serial values as separated and not linked entries. One example for a tabular file structure is CSV. Some CSV characteristics may be considered as disadvantageous for certain applications. For instance, all data on a CSV file have the same schema, CSV has difficulties representing nested information, and it does not really support data hierarchies. In fact, tabular datasets like CSV appear to be less practical for highly complex datasets. In such cases, formats such as XML that are intended to be human and machine-readable are used.

In XML, data is stored with a tree-like structure, and sub-trees describe the contents and schema. HDF was subsequently introduced by National Center for Supercomputing Applications (NCSA) as a scientific data format for high performance management of huge diverse scientific data (HDF 2017a). With a comprehensive set of libraries and management tools, HDF5 (HDF 2017b) is an open source data model and file format, which benefits from the support of large institutions, including NASA (National Aeronautics and Space Administration), NSF (National Science Foundation), and DOE (Department of Energy) (Castro et al. 2015).

The present contribution addresses the two above-mentioned prerequisites for effective data sharing, namely the availability of a systematic ontology and an adequate standardized data format. In a previous publication (Mahdavi and Taheri 2017), we introduced an ontology for the representation and incorporation of multiple layers of occupancy-related monitored building data. Building upon a brief review of the aforementioned ontology, the present paper describes preliminary efforts towards mapping various streams of monitored data to the unified data format HDF5. In addition, the relevance of this effort for the representation of inhabitants in building performance simulation is discussed.

AN ONTOLOGY FOR MONITORED DATA

There may not exist just one correct path to the construction of a well-formed schema for building monitoring. Nevertheless, the identification of basic data categories does appear to be a necessary and fundamental step in any related effort. Such categories cannot be proposed a priori. Thus, any proposed schema in this area should be independently tested in view of its applicability, robustness, and practicability. Based on prior efforts in this area (Mahdavi et al. 2005, Mahdavi 2011a, 2011b, Zach et al. 2012, Mahdavi et al. 2016), Mahdavi and Taheri (2017) suggested that the following six data categories could provide an effective classification framework to accommodate the multiplicity of empirical information obtainable from building monitoring systems. These are: (i) inhabitants, (ii) indoor environmental conditions, (iii) external environmental conditions, (iv) control systems and devices, (v) equipment, and (vi) energy flows.

Table 1: Data categories and subcategories of a building monitoring ontology (Mahdavi et al. 2018)

Categories	Occupants	Indoor conditions	External conditions	Control systems devices	Equipment	Energy
	Position	Hygro-thermal	Hygro-thermal	Heating/cooling	Appliances	Heating/cooling
	Control actions	Visual	Visual	Ventilation	Electrical	Ventilation
Subcategories	Attributes	Acoustical	Solar radiation	Lighting	Safety and security	Lighting
	Attitudes	Air quality	Acoustical	Shading	Transportation	Equipment
			Air quality			Generated energy

The initial data categories and applicable subcategories were further modified, which resulted in the structure presented in Table 1 (Mahdavi et al. 2018). In the above six categories, sensors, meters, and other data sources (e.g., simulation-powered virtual sensors and human agents) generate streams of information (values of corresponding variables) subject to monitoring, storage, and processing.

An important requirement of a suitable ontology for the monitored information is a clear definition of the nature of the monitored variables. Towards this end, we proposed that all monitored data could be captured in terms of the profile shown in Table 2 (Mahdavi and Taheri 2017). Given each data category and the respective subcategories, monitored variables are specified in terms of their values, associated sources, and actors.

THE HDF5 FORMAT

As NASA (2012) explains, one of the main features of HDF files is being self-describing. This has significant implications for handling scientific data, which makes the understanding of the structure and contents of a HDF file only dependent to the file itself. A HDF5 file can contain nearly any collection of data, such as scientific data arrays, tables, text annotations, graphical data, raster images, and documents (e.g. PDF, Excel) in a single file. The structure of HDF5 is similar to a file-system with groups, similar to Windows folders that start with a root group to which other groups or data objects are linked. The linking system feature in HDF5 allows for a hierarchical structure and formation of complex relationships.

Table 2: The structure of monitored data (Mahdavi and Taheri 2017)

Category	
Subcategory	
Monitored variable	
	Measured value
	Data type (Quantative/Nominal/Ranked/Boolean)
	Unit
Value	Point
	Plane
	Volume
	Topological reference
Temporal attribute	Time stamp
	Sampling interval
Actor	ID_a
Data source	Category (Sensor/Agent/Meter)
	ID_s
	Position
	Topological reference
Notes	

Moreover, HDF5 has no storage limitations (tested for up to 36 GB). In fact, the structure of HDF5 provides efficient storage of larger arrays and higher dimensional objects with an indexing option. This option enables, for instance, accessing a dataset without going through the entire file. HDF5 has been suggested to guarantee the handling of data in case of long term high time resolution monitoring projects (Cali et al. 2013). In recent years it has become the format of choice for organizing heterogeneous collections of complex and enormous datasets (NASA 2012).

ILLUSTRATIVE CASE STUDY

For the purpose of the present treatment, an existing office space is selected in a university building (TU Wien) in Vienna, Austria. The office, with an area of around 200 m², includes an open space with multiple workstations, and one single-occupancy office (see Figure 1 for a schematic illustration). Here lies the focus on the single-occupancy office marked in Figure 1.

Monitoring system

The above-mentioned single-occupancy office is equipped with a monitoring infrastructure, which captures various streams of high-resolution sensor data (e.g., thermal, visual, air quality, equipment states). Outdoor conditions are monitored via a weather station installed in close proximity of the building.

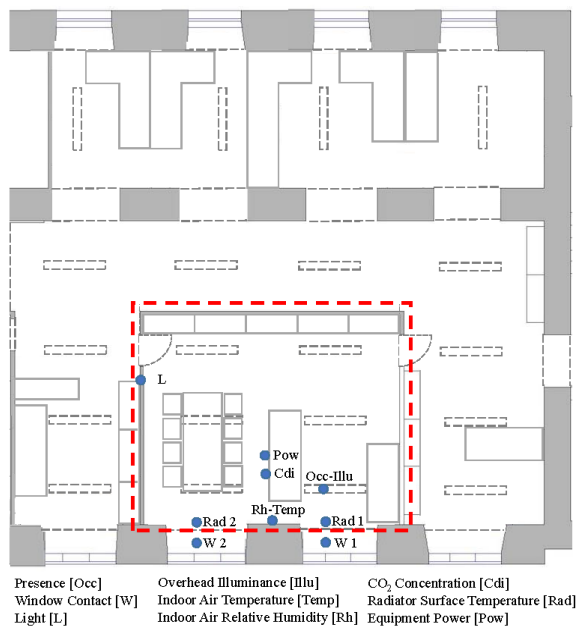


Figure 1: Schematic illustration of the office space.

This type of datasets represent examples of useful resources for the relevant research community, for instance, professionals interested in development and validation of occupancy-related models. Table 3 includes monitored data points (covering five out of the six categories of monitored data in Table 1) and Table 4 summarizes the sensor information. The locations of the installed indoor sensors are marked in Figure 1. The installed sensors are integrated in the online monitoring system of the Department of Building Physics and Building Ecology, TU Wien. The data is automatically stored in real time in a central database. For visualizations, data analysis, and export of the monitored data a graphical user interface was developed (Schuss et al. 2017). The original data is stored with CSV format. For the purpose of sharing the comprehensive monitored data with the relevant professional community, R scripts have been developed that converts the data stored in the csv-files into a single structured HDF5 file. For the purpose of the present study, monitored data from the year 2013 was used.

Table 3: Monitored variables

Category	Subcategory	Monitored variable
Occupants	Position	Presence
	Control actions	Window contact State of the light
Indoor conditions	Hygro- thermal conditions	Temperature Relative humidity
	Visual	Overhead illuminance
	Indoor air quality	CO ₂ Concentration
External conditions	Hygro- thermal conditions	Air temperature Air relative humidity Wind speed Wind direction Precipitation rate
	Visual	Illuminance
	Solar radiation	Global radiation
	Control system and devices	Heating/Cooling system
	Lighting system	State of the light
Equipment	Electrical	Power

Table 4: Deployed sensors/monitoring devices

Device	Range and accuracy of sensed parameters
Davis Vantage Pro2 Wireless Weather station	Temperature: -40 to +65°C ±0.5K Humidity: 0 to 100% ±3% Wind speed: 1 to 67m.s-1 ±1m.s-1 or ±5% Wind direction: 0 to 360° ±4°
Thermokon SR-MDS Solar	Occupancy/Motion: 0-1 Light level: 0 to 510 lx
Thermokon SRW01 Window contact	Status: 0-1
Pressac CO ₂ , Temperature and Humidity Sensor	Temperature: 0 to 51°C ±0.5K Humidity: 0 to 100% ±5% CO ₂ : 0 to 2550ppm ±125ppm
Wireless single-phase energy meter transmitter FWZ61-16A	Temperature at mounting location: -20°C up to +50°C. Storage temperature: 25°C up to +70°C.

IMPLEMENTATION MILESTONES

Long-term, high resolution, and comprehensive monitored physical parameters in this case study support the ongoing research projects in different ways, such as, generation and calibration of simulation models, optimization of building operation, and systematic performance evaluation. Moreover, monitored data can be used to advance the state of knowledge and the quality of computational representations of occupants' presence and actions in buildings. Representing the monitored data based on the ontology structure of Table 2 enables incorporation of data streams in computational applications. Table 5 provides an example of the monitored variable specifications in selected sub-categories of the main category "occupants", according to the structure of the aforementioned ontology.

R script was developed to convert the monitored data stored in the CSV-files into a structured HDF5 file. To read the created file, HDFView 2.9 was used. HDFView is a visual tool, which shows the file hierarchy in a tree structure format and enables exploring and editing of the files. A screenshot of the viewer including the monitored data categories and subcategories is shown in

Figure 2. The root group is called "Monitored_Data_TUWien", to which six main data categories of monitored data are linked.

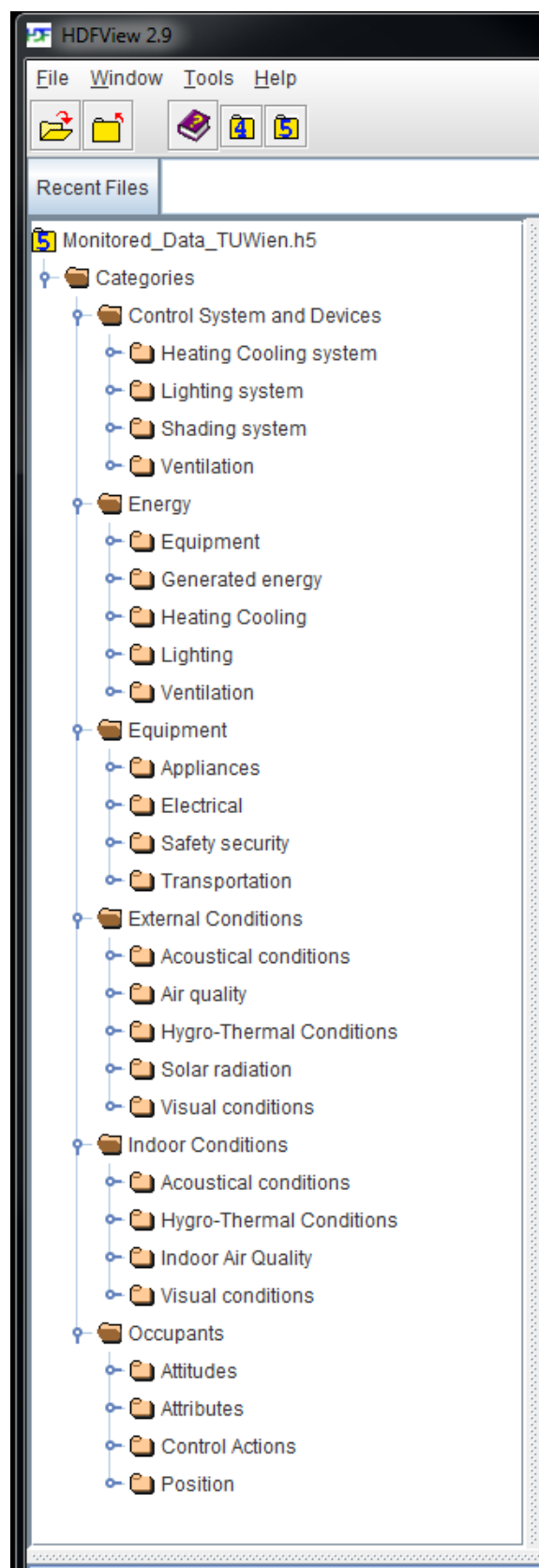


Figure 2: Screenshot from the data categories and subcategories in HDFView 2.9.

Table 5: Illustrative example of monitored variables specifications in category "occupants"

Category		Occupants				
Subcategory		Position		Control actions		
Name		Presence	Window contact	Light on/off_1	Light on/off_2	
Monitored variable	Measured	1	0	1	1	
	Data type	Boolean	Boolean	Boolean	Boolean	
	Unit	n/a	n/a	n/a	n/a	
	Value	Spatial attribute				
		Point	(4.0,0.5,2.0)	(1.0,0.0,3.0)	(0.0,4.0,0.9)	(0.0,4.0,0.9)
		Plane	n/a	n/a	n/a	n/a
		Volume	n/a	n/a	n/a	n/a
		Topological reference	Office_1	Office_1	Office_1	Office_1
	Temporal attribute	Time stamp	08.01.2013 10:30	08.01.2013 10:30	08.01.2013 10:30	08.01.2013 10:30
		Sampling interval	15 min	15 min	15 min	15 min
	Actor	ID_a	Occupant_1	Occupant_1	Occupant_1	Occupant_1
		Category	Sensor	Sensor	Sensor	Sensor
Data source	ID_s	Occ_01	Con_01	Light_01	Light_02	
	Position	(4.0,0.5,2.0)	(1.0,0.0,3.0)	(0.0,4.0,0.9)	(0.0,4.0,0.9)	
	Topological reference	Office_1	Office_1	Office_1	Office_1	
Notes						

Using HDF5, all data is passed along in one file. It is possible to access and conveniently navigate different components. Figure 3 illustrates an instance of a stored monitored variable. Here, the root group is "Monitored_Data_TUWien" and the respective sub-groups (i.e. "Category", "Indoor Conditions", "Hygro-Thermal Conditions", and "Monitored Variable1"), are linked to the main root group. According to the structure of the ontology, each "Monitored Variable" further contains the information pertaining to the name of the variable, value, respective actor and data source, as well as essential remarks or notes. Figure 3 illustrates the measured values of the monitored variable "Temperature".

CONCLUSION

This contribution explored the challenges pertaining to the availability of high quality and

detailed monitored data, which concerns scientists across multiple engineering disciplines. The study presented here underlined the importance of an infrastructure to ensure that research data is adequately structured and publicly accessible.

Starting from a brief description of an ontology for the representation and incorporation of occupancy-related monitored building data, the present contribution included an effort towards the specifications of a process, by which various streams of monitored data can be mapped onto a unified data format. For this purpose, we explored the potential of Hierarchical Data Format 5 (HDF5) and illustrated the suitability of this data format for the structured representation of monitored data.

Future research is required to develop standard evaluation methods and tools for visualization and analyze of the monitored data.

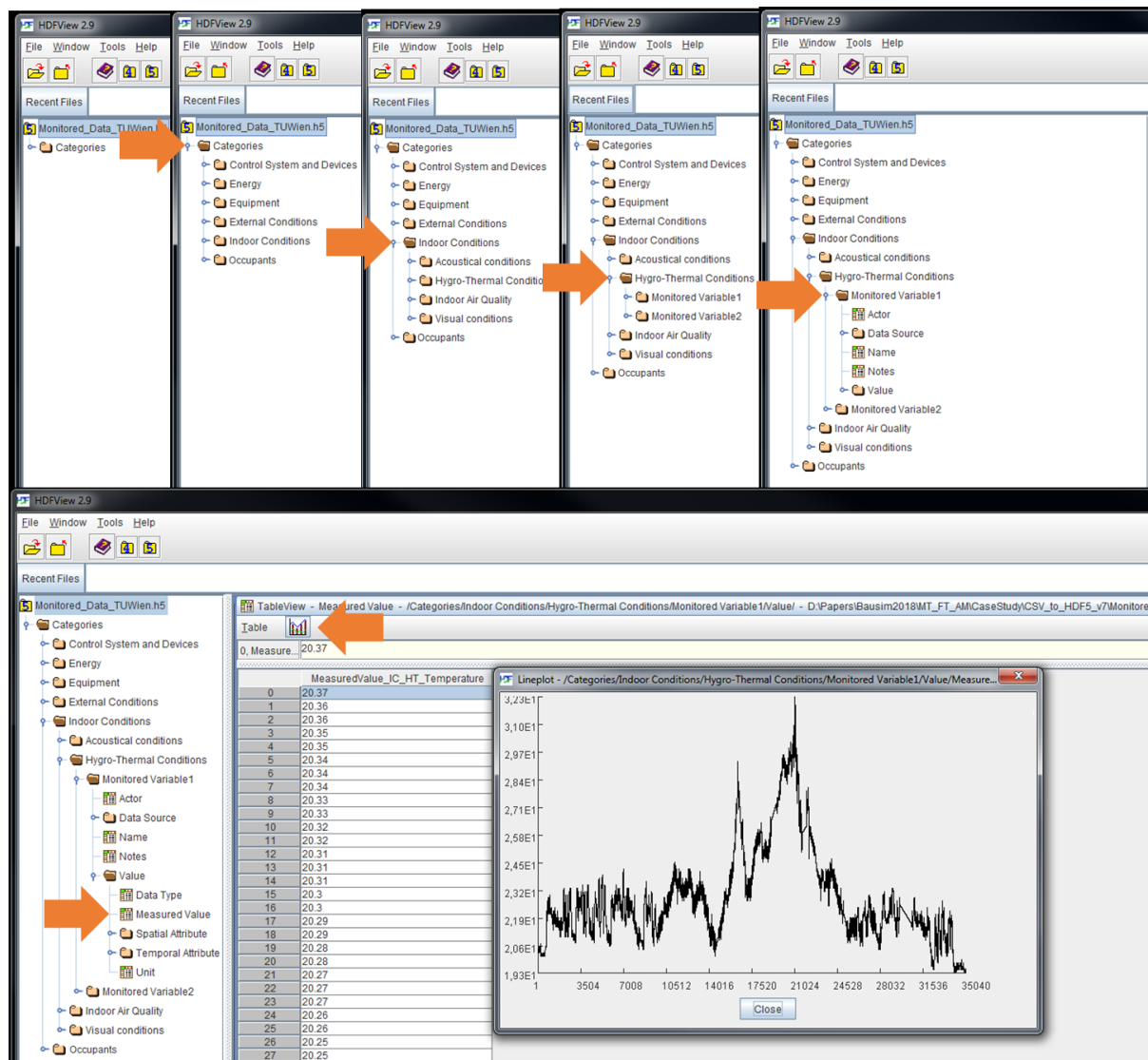


Figure 3: Screenshot from an example of the monitored data recorded on HDF5.

One of the key next steps in the data monitoring and data sharing process must target standardized visual communication routines. In practice, various data visualization and analysis methods have been developed and used. Different instances of software are available that help users to inspect and understand data. However, choosing an effective form of visualization while pursuing research questions is not trivial. Subpar data visualization limits the potential of in-depth data analysis. Hence important hidden patterns may remain undiscovered, leading to ineffectual communication and decision making.

The available HDFView, presented in Figure 3, provided a basic line chart visualization option for the monitored indoor temperature. In order to improve on this basic data representation option, Cali et al. (2013), for instance, developed their

own HDF5 viewer, which offers multiple plotting and analysis tools. All in all, our experience thus far suggests that pervasive monitoring, data sharing supported by common platforms, and intelligent visualization techniques can effectively contribute to building performance assessment, building operation, and design support tools development.

ACKNOWLEDGEMENT

The research presented in this paper is supported in part within the framework of the "Innovative Projekte" research-funding program of TU Wien. This research also benefited from the authors' participation in the ongoing efforts of the IEA-EBC Annex 66 (Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings) and the associated discussions.

REFERENCES

- Cali, D., Streblow, R., Mueller, D., Osterhage, T. 2013. Holistic Renovation and Monitoring of Residential Buildings. ECEEE 2013 summer study. Toulon/Hyères, France.
- Castro, A., Abadie, L., Makushok, Y., Ruizd, M., Sanz, D., Vega, J., Faig, J., Román-Pérez, G., Simrock, S., Makijarvi, P. 2015. Data Archiving System Implementation in ITER's CODAC Core System. Fusion Engineering and Design v. 96–97, pp. 751–755. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2015.06.076.
- Elsevier. 2018a. <https://www.elsevier.com/authors/author-services/research-data/open-data>.
- Elsevier. 2018b. <https://www.journals.elsevier.com/data-in-brief>.
- Gault, B., Koers, H. 2015. Supporting Data-sharing to Speed Up Innovation in Materials Science. Available on: <https://www.elsevier.com/connect/supporting-data-sharing-to-speed-up-innovation-in-materials-science>.
- Grewe, J., Wachtler, T., Benda, J. 2011. A Bottom-up Approach to Data Annotation in Neurophysiology. Frontiers in Neuroinformatics. Volume 5, Article 16. DOI: 10.3389/fninf.2011.00016.
- HDF. 2017a. <https://www.hdfgroup.org/about-us/>.
- HDF. 2017b. <http://www.hdfgroup.org/HDF5/>.
- ISO 16739:2013. 2013. Industry Foundation Classes (IFC) for Data Sharing in the Construction and Facility Management Industries. International Organization for Standardization. Last accessed 15.02.2018.
- Mahdavi, A. 2011. People in Building Performance Simulation. In Building Performance Simulation for Design and Operation, edited by Hensen, J. and R. Lamberts, New York, Taylor & Francis Group. ISBN-13: 978-0415474146.
- Mahdavi, A., Glawischnig, S., Schuss, M., Tahmasebi, F., and Heiderer, A. 2016. Structured Building Monitoring: Ontologies and Platform. Proceedings of ECPPM 2016: The 11th European Conference on Product and Process Modelling, Limassol, Cyprus.
- Mahdavi, A., Taheri, M. 2017. An Ontology For Building Monitoring. Journal of Building Performance Simulation, 10:5-6, 499-508. DOI:10.1080/19401493.2016.1243730
- Mahdavi, A., Taheri, M., Schuss, M., Tahmasebi, F., and Glawischnig, S. 2018. Structured Building Data Management: Ontologies, Queries, and Platforms. In book: Exploring Occupant Behavior in Buildings Publisher: Springer, Cham Editors: Andreas Wagner, William O'Brien, Bing Dong. DOI: 10.1007/978-3-319-61464-9_10.
- NASA. 2012. Hierarchical Data Format. <https://eosweb.larc.nasa.gov/HBDOCS/hdf.html>. Last accessed 24.02.2018.
- Schuss, M., Glawischnig, S., Mahdavi, A. 2017. Building Monitoring and Diagnostics: A Web-Based Approach. Applied Mechanics and Materials, 861 (2017), 556 - 563.
- Springer Nature. 2018. Macmillan Publishers Limited, part of Springer Nature. <https://www.nature.com/sdata/>.
- Tenopir, C., Allard, A., Douglass, K., Aydinoglu, A., Wu, L., Read, E., Manoff, M., Frame, M. 2011. Data Sharing by Scientists: Practices and Perceptions. PLoS ONE, Volume 6, Issue 6. DOI: 10.1371/journal.pone.0021101.
- Zach, R., Glawischnig, S., Hönisch, M., Appel, R., Mahdavi, A. 2012. MOST: An Open-Source, Vendor and Technology Independent Toolkit for Building Monitoring, Data Preprocessing, and Visualization. In: eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction. G. Gudnason, R. Scherer et al. (ed.), Taylor & Francis. ISBN: 978-0-415-62128-1.
- Zehl, L., Jaillet, F., Stoewer, A., Grewe, J., Sobolev, A., Wachtler, T., Brochier, TG., Riehle, A., Denker, M., Grün, S. 2016. Handling Metadata in a Neurophysiology Laboratory. Front Neuroinform. 2016; 10: 26. DOI: 10.3389/fninf.2016.

REVISITING THE IMPLICATIONS OF DIVERSITY REPRESENTATION IN WINDOW OPERATION MODELS FOR BUILDING SIMULATION

F. Tahmasebi^{1,2} and A. Mahdavi¹

¹Department of Building Physics and Building Ecology, TU Wien, Vienna, Austria

²UCL Institute for Environmental Design and Engineering, London, United Kingdom

ABSTRACT

To explore the potential advantages of supplying occupant behavior models with inter-occupant diversity information, this study models the occupants' operation of windows in a monitored open-plan office at aggregate and individual levels. Subsequently, a calibrated energy model of the office area incorporates the developed models and multiple streams of monitored data to evaluate the predictive performance of the models and their contribution to enhance the reliability of building performance assessments. According to the results, individual window operation models outperformed the aggregate model in capturing the peak and variation of window operation across occupants in the free-running season, which resulted in a better assessment of thermal comfort. However, the individual models yielded an overestimation of peak heating demand, as compared with the benchmark value based on the actual window operations in a single year.

INTRODUCTION

The building simulation community has increased its efforts to reduce the gap between predicted and actual building energy use through probabilistic representations of occupant behaviour in buildings (Schweiker 2017). However, several studies have demonstrated that the use of existing occupant behaviour models involves considerable uncertainties and does not necessarily lead to a more reliable building performance assessment (e.g., Tahmasebi & Mahdavi 2017; Gilani et al. 2017). Specifically, it is shown that without proper treatment of the diversity in occupants' behaviour, probabilistic occupancy-related

models fail to provide representative ranges of occupant behaviour possibilities as intended (O'Brien et al. 2017; Tahmasebi & Mahdavi 2016). To address this issue, different approaches for inclusion of diversity in occupant behaviour modelling efforts have been examined (Reinhart 2004; Mahdavi 2015; O'Brien et al. 2017; Haldi et al. 2017). However, it has been also suggested that for specific cases, such as large open-plan offices (Gilani et al. 2017), a detailed treatment of occupants' diversity may not be beneficial. Consequently, further studies in this area are needed, as the potential benefits of supplying probabilistic occupant behaviour models with inter-occupant diversity information are not conclusively established. In this context, the current contribution revisits the problem through a case study. Thereby, the study investigates if modelling the inter-occupant diversity in operation of windows contributes to a more reliable performance analysis of an open-plan office area.

METHOD

Overview

The present study uses long-term monitored data on indoor and outdoor environment and state of windows in an office area to model the occupants' operation of windows with and without integration of inter-occupant variations in this regard. Subsequently, using the monitored window operation data along with a calibrated building performance model of the office area, the study explores two essential questions with regard to the use of stochastic window operation models: To which extent do the predictions of window operation models that disregard the

behaviour diversity differ from the actual occupants' behaviour? To what degree does the consideration of occupants' behavioural diversity in building simulation contribute to better performance assessments?

Building data

The current study focuses on an office area with seven workstations in Vienna, Austria, where each occupant has access to one manually operable casement window (Figure 1). Six of these workstations are in an open-plan area. The building is not air-conditioned and it only uses a hydronic heating system to actively maintain thermal comfort in the cold season. In this office, the occupants' presence, state of windows and several environmental parameters (including indoor and outdoor air temperature) are monitored on a continuous basis. The study uses the monitored data from a calendar year (referred to as estimation period) to derive the window operation models. A separate set of data obtained from another calendar year (referred to as validation period) is used to evaluate the performance of the models.

Window operation models

To explore the research questions, the authors developed the following two types of window operation models based on the monitored data in the estimation period:

- Aggregate model (AGG), which was derived based on the data obtained from all occupants and windows;
- Individual models (W1-W7), which were derived based on the data obtained from each occupant and his/her associated window.

Each of the models consists of two logistic regression sub-models for estimation of window opening and closing probabilities. They provide the state transition probabilities for a Markov chain, based on which the states of windows are predicted for the validation period (for more details, see Tahmasebi & Mahdavi 2018). Table 1 provides the estimated coefficients for the individual and aggregate window opening and closing models. Figure 2 illustrates slices through the response surface of individual and aggregate models at an outdoor temperature of 20°C. Figure 3 depicts such slices at indoor temperatures of 20°C and 30°C.

Table 1: Estimated coefficients for logistic regression models of window opening and closing based on the individual windows (W1 – W7) and aggregate data.

Window model	Variables and terms	Opening coefficients	Closing coefficients
Individual W1	Intercept	-10.4233	16.6416
	θ_{in}	0.0905	-0.7013
	θ_{out}	0.2047	-0.5011
	Interaction	-0.0034	0.0186
Individual W2	Intercept	-12.2998	27.2410
	θ_{in}	0.3135	-1.1479
	θ_{out}	0.1075	-1.1022
	Interaction	-0.0032	0.0424
Individual W3	Intercept	-28.3577	7.9830
	θ_{in}	0.9783	-0.4323
	θ_{out}	0.9343	-0.3756
	Interaction	-0.0363	0.0144
Individual W4	Intercept	-31.2056	29.7625
	θ_{in}	1.0775	-1.3678
	θ_{out}	0.4713	-1.0668
	Interaction	-0.0195	0.0454
Individual W5	Intercept	-49.5078	15.5018
	θ_{in}	1.9324	-0.7982
	θ_{out}	1.5071	-0.6517
	Interaction	-0.0617	0.0283
Individual W6	Intercept	-22.4190	23.7542
	θ_{in}	0.8031	-1.0475
	θ_{out}	0.3130	-0.8246
	Interaction	-0.0123	0.0332
Individual W7	Intercept	-13.7355	25.3944
	θ_{in}	0.4225	-1.1495
	θ_{out}	0.0343	-0.9280
	Interaction	-0.0007	0.0374
Aggregate (AGG)	Intercept	-10.6882	23.9665
	θ_{in}	0.2187	-1.0969
	θ_{out}	0.2100	-0.9172
	Interaction	-0.0052	0.0376

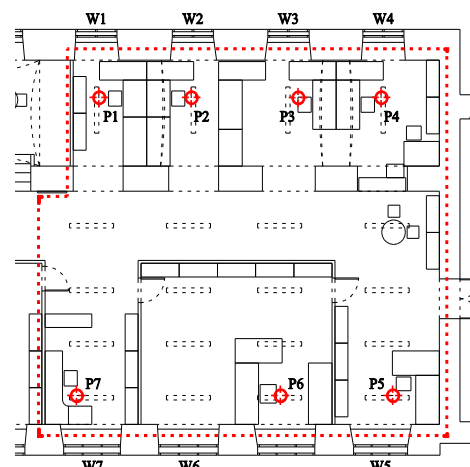


Figure 1: Schematic illustration of the office area, observed occupants and operable windows

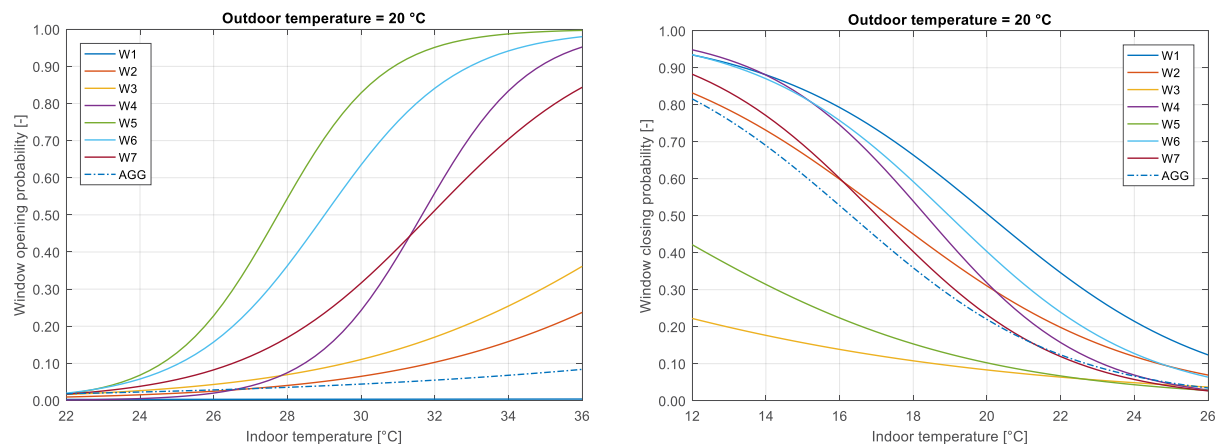


Figure 2: Slices through the response surface of individual and aggregate models for opening (left) and closing (right) of windows at an outdoor temperature of 20°C.

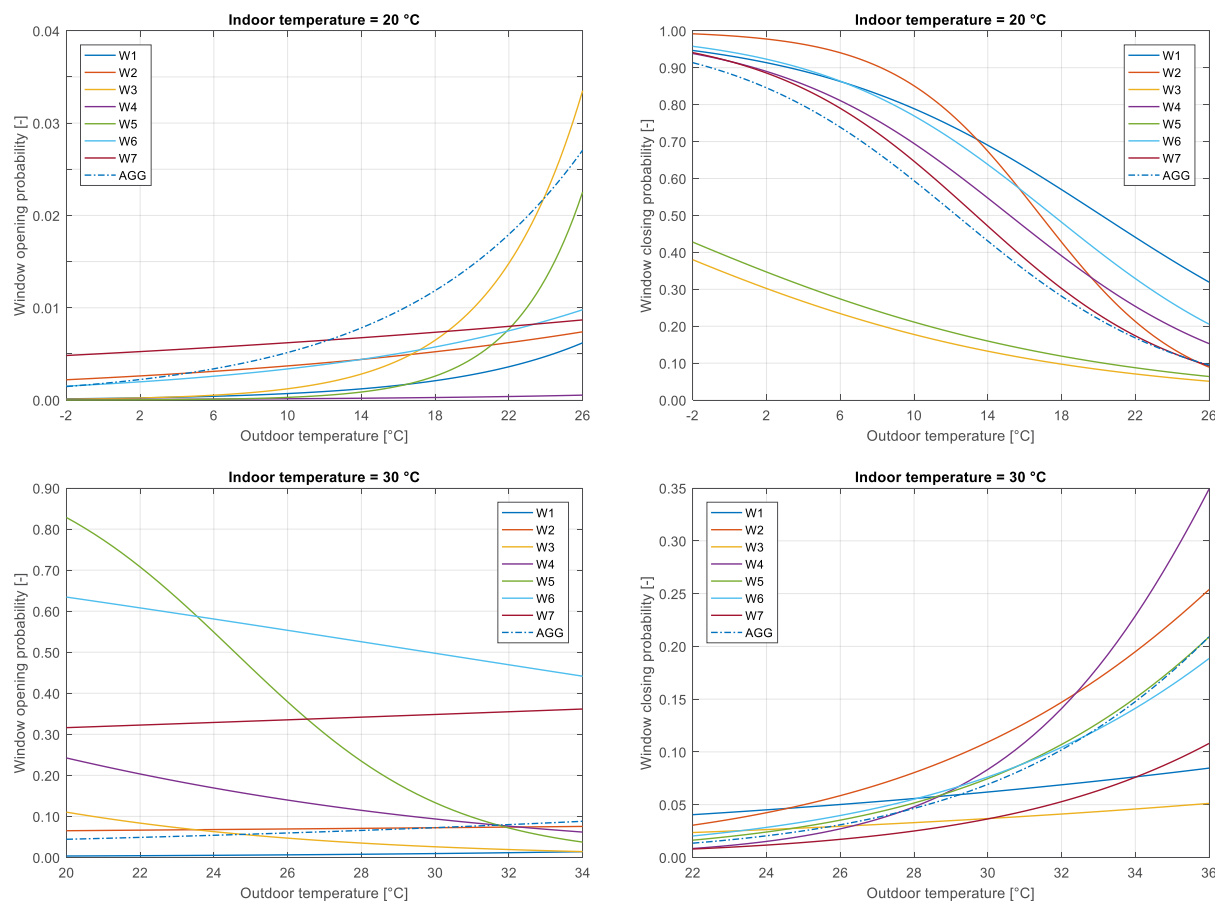


Figure 3: Slices through the response surface of individual and aggregate models for opening (left) and closing (right) of windows at indoor temperatures of 20°C (top) and 30°C (bottom).

Note that, in order to focus the investigation on the inter-occupant diversity representation, the current study adopted a rather simple approach to model window operation. Specifically, without conducting a comprehensive variable selection procedure, all the models only use indoor and outdoor temperatures as explanatory variables. However, the interaction term was added to the models to capture the effect of indoor

temperature depending on outdoor temperature and vice versa. To the authors' knowledge, interaction of indoor and outdoor temperature has not been incorporated before in window operation models. This is, however, especially important in the present study, as in a number of extremely hot summer days in Vienna, natural ventilation cannot serve as a cooling measure and may not be preferable by occupants. As it

can be seen in Figure 3, the developed models have captured this tendency: With an indoor temperature of 20°C and outdoor temperatures such as -2 to 26°C, the probability of opening window increases with the rise of outdoor temperature (Figure 3, top left plot). However, in extreme summer conditions (for example with an indoor temperature of 30°C), for a number of occupants, the probability of opening window is decreasing when the outdoor temperature rises (Figure 3, bottom left plot). A similar alternating pattern can be seen also in terms of estimated window closing probabilities (Figure 3, right plots).

Moreover, it should be noted that the models do not differentiate between different occupancy phases (such as arrival, intermediate and departure). However, given the operational circumstances in the studied building, windows are assumed to be closed upon occupants' last departures.

Diversity representation

The present contribution adopts an ideal approach to represent inter-occupant diversity in window operation. Thereby, each individual model is used to predict the occupant, based on whom the model is developed. This strategy was due in part to the small number of occupants in the study. Moreover, it was considered consistent with the study's main aim, namely to explore the potential advantages of integrating diversity in occupant behaviour models.

Office area calibrated simulation model

The office area was modelled in the building energy simulation tool EnergyPlus 8.8.0. In the zoning scheme, the open-plan south and north-oriented spaces were separated from the central corridor. However, using the network-based multi-zone airflow model of EnergyPlus, the airflows across the external windows and the connected spaces were simulated. The constant input parameters governing airflow simulation in the EnergyPlus model (namely open windows discharge coefficient and closed windows air mass flow coefficient) were set based on a previous model calibration effort (Tahmasebi & Mahdavi 2012).

The building calibrated simulation model served as a test bed for evaluation of window operation

models with consideration of models' feedback, i.e. the impact of models' output (window states) on models' input (indoor temperature). The calibrated building model also made it possible to determine the impact of window operation (and use of different window operation models) on the estimation of building performance indicators. To this end, the monitored data streams of occupants' presence and use of lights and equipment in the validation year were fed into the model. In addition, the aggregate and individual window operation models were successively integrated into the building model using EnergyPlus runtime language. The study also benefited from a benchmark building model, which contained the actual states of windows based on the monitored data obtained in the validation period. Moreover, the building model was exposed to the outdoor environmental conditions in the validation period, using a weather data file generated from on-site weather station measurements. The measured dataset included outdoor air temperature, air humidity, atmospheric pressure, global horizontal radiation, diffuse radiation, wind speed, and wind direction. Lastly, due to the stochastic nature of the window operation models, the building model was simulated 50 times to obtain representative ranges of outputs.

It should be also noted that, an ideal unlimited heating system is set in the model to maintain the indoor temperature of different zones according to the measured indoor temperatures in the validation period, and to estimate the space heating demands. However, since such a system fully counteracts the impact of window openings, the building model is not strictly applicable to evaluation of window operation models in heating season. Therefore, for the purpose of the current study, the predictive performance of window operation models is only considered in the free-running season (from April 22 to September 25).

Window operation evaluation metrics

The following metrics serve to evaluate the window operation models in view of interval-by-interval equivalence of the predicted and monitored window states:

- TPR (True Positive Rate), as the proportion of actual open states, which are correctly predicted.

- FPR (False Positive Rate), denoting the proportion of actual closed states, which are wrongly predicted.
- TNR (True Negative Rate), denoting the proportion of actual closed states, which are correctly predicted.
- FNR (False Negative Rate) as the proportion of actual open states, which are wrongly predicted closed.

In addition, three indicators examine the dynamics and overall aspects of the predicted window operations, as follows:

- Overall fraction of open state, as the total window opening time divided by the observation time.
- Mean number of actions per day averaged over the observation time.
- Median open state duration, to capture the durations for which windows are left open.

These indicators have been widely used in the studies pertaining to the evaluation of occupant behaviour models (e.g., Schweiker et al. 2010).

Building performance indicators

To capture the office area performance in heating and free-running seasons, the building energy model estimates the following indicators:

- Annual heating demand per floor area [kWh.m^{-2}], which gives the total heating energy required in a year to maintain temperature set-points.
- Peak heating demand per floor area [W.m^{-2}], which gives the maximum heating energy required in a 15-min interval to maintain temperature set-points.
- Time outside EN15251 comfort zone [%], which denotes the fraction of occupied time in the free-running season, in which operative temperature is outside EN15251 Category III limits.

RESULTS

Occupants' interactions with windows

Table 2 provides the metrics obtained from interval-by-interval comparison of predicted and monitored window states of the entire office area in the free-running validation period. Further

aspects of window operation predictions, namely, overall fraction of open state, number of opening action and open state durations, are summarized in Table 3. It provides the observed and predicted values of the metrics for individual occupants/windows in the free-running season, together with the mean and standard deviation of the metrics across occupants. Note that, the values of the metrics in Table 2 and Table 3 are obtained from averaging the models' predictions in 50 Monte Carlo runs. To better compare the models' performance in capturing the variations in occupants' interactions with windows, Figure 4 shows the coefficient of variation of the metrics (as the ratio of standard deviation to the mean) obtained from the observations and predictions made by the aggregate and individual models.

Building performance indicators

Table 4 gives the obtained building performance indicators, namely, annual and peak heating demands, and the percentage of occupied time outside EN15251 comfort limits. It includes the outputs of the benchmark model (with the monitored window operation data), along with the mean and standard deviation of the predictions provided by the building models equipped with the aggregate and individual window operation models. To put the models' performance in context, Table 4 also provides the results obtained from two simple window operation models. The first one assumes windows are open if indoor temperature is above 26°C . The second one assumes windows are always closed.

To better interpret the obtained results, Figure 5 illustrates the relative error of the estimated building performance indicators as compared to the benchmark model. Note that, due to the very large overestimation of discomfort by the model with closed windows, the output of this model is not included in Figure 5.

Table 2: Values of TPR, FPR, TNR, and FNR for aggregate and individual window operation models in the free-running validation period

Model(s)	TPR [%]	FPR [%]	TNR [%]	FNR [%]
Aggregate	29.2	4.3	95.7	70.8
Individuals	47.1	5.9	94.1	52.9

Table 3: Observed and predicted mean values of fraction of open state, openings per day, and median open state duration for individual values along with inter-occupant mean and standard deviation of the metrics

Window	Overall fraction of open state [%]			Opening actions per day [d ⁻¹]			Median open state duration [h]		
	Observed	Aggregate model	Individual models	Observed	Aggregate model	Individual models	Observed	Aggregate model	Individual models
W1	2.5	5.5	0.5	0.18	0.45	0.07	2.00	2.38	1.46
W2	7.8	6.5	4.8	0.46	0.48	0.50	3.75	2.57	1.62
W3	3.6	7.5	8.8	0.18	0.52	0.55	4.00	2.68	3.13
W4	10.8	6.8	7.3	0.48	0.54	0.52	4.75	2.31	2.56
W5	8.8	7.2	19.7	0.50	0.56	1.02	3.25	2.43	3.43
W6	9.3	5.0	11.7	0.50	0.43	1.04	2.75	1.99	1.52
W7	17.8	6.7	13.6	0.69	0.52	0.83	4.13	2.50	3.37
Mean	8.7	6.5	9.5	0.43	0.50	0.65	3.52	2.41	2.44
SD	4.7	0.9	5.8	0.17	0.04	0.32	0.86	0.21	0.83

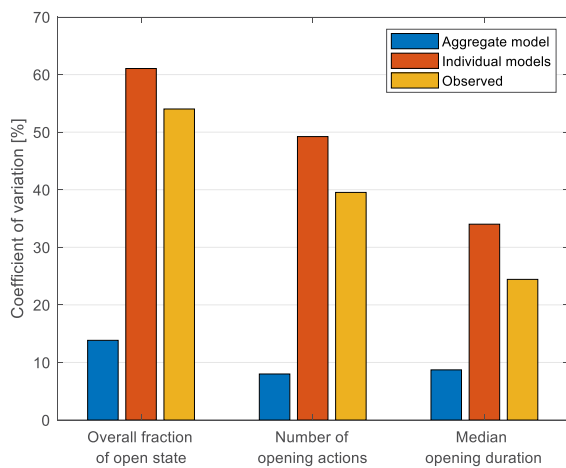


Figure 4: Coefficient of variation of the overall fraction of open state, number of opening actions, and median opening duration across occupants obtained from the observations, the aggregate and individual window operation models

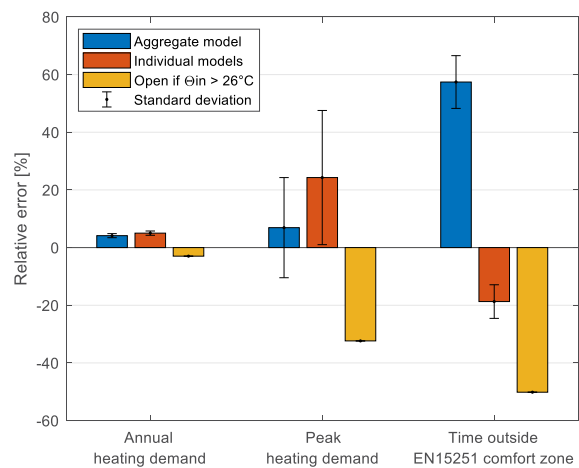


Figure 5: Relative error of the building performance indicators obtained from the building model with aggregate and individual window operation models as well as a simple rule-based model

Table 4: Building performance indicators obtained from the building models equipped with monitored window operation (benchmark), aggregate and individual window operation models, and two simple non-probabilistic models

Window operation model(s)	Annual heating demand [kWh.m ⁻²]	Peak heating demand [W.m ⁻²]	Time outside EN15251 comfort zone [%]
Benchmark	64.7	89.3	5.6
Aggregate	67.4 ± 0.5	95.5 ± 15.5	8.8 ± 0.5
Individuals	68.0 ± 0.5	111.0 ± 20.8	4.6 ± 0.3
Open if $\theta_{in} > 26$	62.8	60.4	2.8
Closed	62.4	45.5	25.0

DISCUSSION

Occupants' interactions with windows

The results provided in Table 2 indicate that individual window operation models outperform the aggregate model in correctly predicting open states (TPR of 47.1% versus 29.2%), whereas their false predictions of open states are only slightly more frequent than those of the aggregate model (FPR of 5.9% versus 4.3%). The individual models also generate fewer false predictions of closed states (FNR of 52.9% versus 70.8%). Their performance in correctly predicting the closed states is very close to that of the aggregate model. It should be noted that a subsequent publication by the authors further

explores the models' performance in discriminating the occurrence and non-occurrence of opening and closing actions (Tahmasebi & Mahdavi 2018).

Moreover, from the metrics provided for individual windows in Table 3, an interesting observation can be made concerning the overall fraction of open state: Even though each occupant's model is based on the data obtained from the same occupant in the estimation period, the individual models could not identify the occupant who kept the window open the longest. Based on observations, W7 shows the maximum overall fraction of open state with 17.8%. However, in case of the individual models' predictions, the maximum overall fraction of open state belongs to W5 with 19.7%. Nonetheless, and arguably more importantly, the individual models have outperformed the aggregate model in capturing the peak operation of individual windows. In fact, the aggregate model's lack of sensitivity to inter-occupant diversity leads to the prediction that no occupant keeps the windows open longer than 7.5% of the time in free-running season. This has implications for the assessment of thermal comfort, which will be discussed in the next section.

As it can be seen from the mean values provided in Table 3, individual models do not show a better performance in predicting the average tendencies in terms of number of opening actions and opening duration. In fact, they even show a larger error in the average number of actions across occupants. However, the combination of an overestimation of the number of openings and an underestimation of the opening duration has resulted in this case in a better estimation of the overall fraction of open state. As for capturing the variations in occupants' interactions with windows, Figure 4 shows that the aggregate model has not captured the diversity among occupants. The individual models, however, have reproduced the variation of the metrics values across occupants with a slight overestimation.

Building simulation results

From Table 4, it can be seen that the aggregate and individual window operation models provide close estimations of the annual heating demand. Similarly, the non-probabilistic models, which disregard the possibility of window opening in

heating season, provide reasonable estimates of annual heating demand. However, the non-probabilistic models fail to capture the peak heating demands resulting from occasional operation of windows in winter. In contrast, the aggregate and individual probabilistic models overestimate the peak values, which is more noticeable in case of individual models. Nonetheless, the benchmark peak heating demand (as one instance of possible annual peak demands in the building operation phase) is within one standard deviation of the mean predicted value of the aggregate model and very close to that of the individual models (Figure 5).

With regard to the estimation of thermal comfort in the free-running season (see Figure 5), the individual window operation models outperform the aggregate probabilistic model and the non-probabilistic ones. As mentioned before, even though the individual models could not identify the most 'active' window-operating occupant in the validation period, they have done well in capturing the peak and the variations in the fraction of open state among occupants (see Table 3 and Figure 4). This has served the building model with individual window operation models to better estimate the occupants' thermal comfort in the free-running season (see Table 4 and Figure 5).

Delving further into this finding, one can hypothesize that, in a free-running open-plan office area with multiple occupants and windows, when few occupants open the windows (and, for example, enable cross ventilation) the rest of the occupants may not bother to open the windows anymore (perhaps, amongst other things, to avoid draught problem). Therefore, firstly, the occupants who open the windows more frequently may be different from time to time (as is the case in the estimation and validation periods in the present study). Secondly, due to the smaller number of 'active' occupants, as compared with the 'passive' ones (perhaps because in such an open-plan office operation of few windows suffice to change the indoor conditions), such adaptive actions may not be captured in models relying on averaged observations.

In this case study, the aggregate stochastic window operation model did not include the influence of 'active' occupants and therefore overestimated thermal discomfort. In contrast,

the non-probabilistic model, which opens all the windows when indoor temperature exceeds 26°C, underestimated the thermal discomfort, due to an overestimation of air change rate (which may not be even preferable for occupants). The results of the study suggested that, in the present case, the integration of inter-occupant behaviour diversity in window operation models could enhance the reliability of simulation-based thermal comfort analysis of an open-plan office area.

CONCLUSION

The study presented in this paper was limited to seven occupants in a specific office space in Vienna, Austria. The window operation models were developed and tested based on the data obtained from the same building. The study also examined an ideal case in representation of inter-occupant diversity, as the models estimated for individual occupants were used to predict the same occupants' interactions with windows. Nonetheless, the results suggest that integrating inter-occupant diversity in window operation models may be beneficial in terms of:

- Discrimination between windows' open and closed states throughout a long-term simulation;
- Estimation of the peak and variations of window operation across occupants, which cannot be captured by models derived from aggregate data;
- Assessing thermal comfort in an open-plan space, in which each occupant's adaptive actions could influence indoor environmental conditions of the whole space and thus influence other occupants.

With regard to the estimation of annual heating demand, the study did not show a benefit in using the aggregate or individual probabilistic models. As for the assessment of peak heating demand, the aggregate model showed a reasonable performance. The integration of inter-occupant diversity led to an overestimation of peak heating demand, as compared to the benchmark value resulting from the actual window operations in a single year.

Note that, while the present study points to the importance of occupants' behavioural diversity information in window operation models for specific building performance queries, it does

not offer a generic and practical approach for the pervasive provision and systematic inclusion of such information in routine building performance simulation processes. Specifically, to provide effective simulation-based design support, occupant models would have to be based on statistically representative diversity information. As such information is currently unavailable, care should be taken in extrapolating from the results obtained from the few available empirical sources of data – such as what this study was based on.

REFERENCES

- Gilani, S., O'Brien, W., Gunay, B. 2018. Simulating occupants' impact on building energy performance at different spatial scales, *Building and Environment* 132, 327-337.
- Haldi, F., Cali, D., Andersen, R.K., Wesseling, M., Müller D. 2017. Modelling diversity in building occupant behaviour: a novel statistical approach, *Journal of Building Performance Simulation*, 10:5-6, 527-544.
- Mahdavi, A. 2015. The inter-individual variance of the defining markers of occupancy patterns in office buildings: a case study, *Proceedings of BS2015*, 2243-2247.
- O'Brien, W., H.B. Gunay, F. Tahmasebi, and A. Mahdavi. 2017. A preliminary study of representing the inter-occupant diversity in occupant modelling, *Journal of Building Performance Simulation*, 10:5-6, 509-526.
- Reinhart, C.F. 2004. Lightswitch-2002: a model for manual and automated control of electric lighting and blinds, *Solar Energy* 77(1) 15-28.
- Schweiker M., Haldi F., Shukuya M., Robinson D., 2012. Verification of stochastic models of window opening behavior for residential buildings, *Journal of Building Performance Simulation*, 5(1), 55-74.
- Schweiker, M. 2017. Understanding occupants' behaviour for energy efficiency in buildings, *Current Sustainable Renewable Energy Reports* (2017) 4:8-14.
- Tahmasebi, F., Mahdavi, A. 2012. Optimization-based simulation model calibration using sensitivity analysis, 7th Conference of IBPSA-CZ, Brno, Czech Republic.
- Tahmasebi, F., Mahdavi, A. 2016. An inquiry into the reliability of window operation models in building performance simulation, *Building and Environment* 105 (2016), 343–357.
- Tahmasebi, F., Mahdavi, A. 2017. The sensitivity of building performance simulation results to the choice of occupants' presence models: a case study. *Journal of Building Performance Simulation*, 10:5-6, 625-635.
- Tahmasebi, F., Mahdavi, A. 2018. On the utility of occupants' behavioural diversity information for building performance simulation: an exploratory case study, *Energy and Buildings* (2018), DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.07.042.

COMPARISON OF MEASURED AND SIMULATED FOOT SKIN BLOOD FLOW DURING LIGHT AND MEDIUM ACTIVITIES AND THE EFFECT ON FOOT SKIN TEMPERATURE PREDICTION

St. Veselá¹, B. RM Kingma^{1,2}, A. JH Frijns¹ and W. D van Marken Lichtenbelt³

¹Department of Mechanical Engineering, Eindhoven University of Technology, The Netherlands

²TNO, The Netherlands Organization for Applied Scientific Research, Unit Defense, Safety & Security, Soesterberg, The Netherlands

³Dept. of Nutrition and Movement Sciences, NUTRIM School of Nutrition and Translational Research in Metabolism of Maastricht University Medical Center+, The Netherlands

ABSTRACT

A major component of thermophysiological models is the local skin blood flow (SBF), which was mainly derived for low activity levels (0.8 – 1 *met*). Here, the foot SBF was measured in experiments during three activities (1 – 3.5 *met*). Additionally, the local skin temperatures ($T_{skin,i}$) were recorded. The experiments were simulated using the thermophysiological model ThermoSEM. The resulting measured foot SBF is 10-40 times higher than the simulated SBF. Also, $T_{skin,i}$ prediction is poor ($\Delta T_{max} = 8^{\circ}C$). Implementing the measured foot SBF in ThermoSEM, results in improved $T_{skin,i}$ by up to 6 °C. Hence, changes in local SBF during exercise should be included in thermophysiological models.

INTRODUCTION

With the development of energy efficient localized heating and cooling systems (Arens et al., 1991; Foda and Sirén, 2012; Melikov et al., 1994; Veselý and Zeiler, 2014), there is an increased demand for accurate modelling of local skin temperatures and local thermal sensation. Mean and local skin temperatures can be modelled with thermophysiological models such as UTCI-Fiala (Fiala et al., 1999, 2001, 2012), ThermoSEM (Kingma, 2012; Severens, 2008), Berkeley Comfort Model (Huizenga et al., 2001; Zhang et al., 2001) or Tanabe's model (Tanabe et al., 2002). To achieve a high accuracy for predicting local skin temperatures, the local heat balances in these models need to be precise. A

major component of these balances is the local skin blood flow (SBF). The two mostly used SBF models are Fiala's SBF model (Fiala et al., 2001) and the neurophysiological approach by Kingma et al. (2014). In Fiala's model the skin SBF is a function of the central stimuli for vasodilation and vasoconstriction which in turn are functions of the difference between the actual and the set point mean skin temperature (Fiala et al., 2001). The model by Kingma et al. (2014) formulates SBF regulation as a function of the fire rate of cold and warm sensitive neurons in the hypothalamus and at the peripheral skin sites. Both SBF models were derived and tested with human subject experiments in several environmental conditions, but only with very low activity levels (0.8 – 1 *met*). Light to medium activities, e.g. sitting or walking, were mostly not considered. Moreover, the (averaged) measured results were mainly compared to simulated results using body characteristics of an average (male) human subject. However, the assumed body composition does not necessarily coincide with the recruited human subjects. Studies by Havenith (2001) and Van Marken Lichtenbelt et al. (2004) show that the model prediction quality can be improved by considering individual body characteristics.

To evaluate the performance of the neurophysiological model for higher activity levels, human subject experiments were conducted where the SBF at the ankle was measured for twenty human subjects at base line (supine position) and during three activities (sitting, walking at 1 *km/h* and preferred walking

at 2.5 – 3.5 km/h). The measured SBF was then compared to the SBF as simulated in the current, individualized version of ThermoSEM which includes the neurophysiological approach to SBF prediction.

METHODS

Human subject experiments

The experiments took place at the Metabolic Research Unit of Maastricht University (MRUM) from February to August 2016. The study was approved by the medical ethical committee of Maastricht University Medical Centre+.

The air temperature and relative humidity of the climate chamber were recorded using iButton® data loggers (DS1923, Maxim Integrated, USA) at four heights (0.1 m, 0.6 m, 1.1 m, 1.7 m). The measured air temperature and relative humidity were 24°C ± 0.3°C and 30% ± 1%, respectively. Additionally, the air speed was recorded with a hot-wire thermal anemometer (FVA605TA10U, Ahlborn, Germany), and varied between 0.15 ms⁻¹ and 0.20 ms⁻¹.

A total of twenty subjects were recruited using the following criteria: Caucasian, generally healthy, age between 18 to 60 years, BMI of 20 – 25 kg/m². One subject had to be excluded because of malfunctioning measurement equipment. The characteristics of the resulting nineteen subjects are given in Table 1.

Table 1 Subjects' characteristics

Characteristics	Mean (±SD)
Age [yr]	28.7±10.0
Body mass [kg]	70.0±9.5
Height [m]	1.76±0.08
BMI [kg/m ²]	22.5±2.8
Body fat [%]	25.4±7.3

Always two subjects came to the MRUM for one measurement day, and performed the experimental protocol as shown in Table 2. Prior to the start of the experiments, the participants signed a letter of consent. Afterwards, they changed into the provided medium clothing ensemble, consisting of a t-shirt, sweater, sweatpants, socks and the participant's own

underwear and shoes. Also, the sensors for measuring skin temperatures and skin perfusion were attached to the subjects. The skin temperature was measured with iButton® data loggers (DS1922L, Maxim Integrated, USA) at 14 positions in accordance to ISO 9886: (2004). Skin perfusion was recorded at the ventral side of the ankle using Laser Doppler Flowmetry (LDF) (PF4000 & PF5000, Perimed AB, Sweden). During all activities of the experimental protocol, the energy expenditure of the subjects was logged by an indirect calorimetry system using a mask connected to an automated respiratory gas analyzer. After the preparations, the participants lay down on a stretcher for 30 minutes for baseline measurements. Then, the subjects had a small standardized breakfast (crackers, cheese and water), and either stayed in the medium or changed to a light clothing ensemble. The light clothing ensemble included a t-shirt, shorts, socks and the participant's underwear and shoes. The starting clothing ensemble was randomized for all pairs of subjects. The three following activity sessions were performed on a treadmill: 1. sitting on a chair, 2. walking at low speed (1 km/h) and 3. walking at preferred speed (2.5 – 3.5 km/h). Each activity lasted 23 minutes including a small break of approximately 3 minutes for additional measurements (not part of this paper's analysis). Hence, each activity was divided into two subsections, i.e. "1/2" for morning and "3/4" for afternoon activities. The third morning activity was followed by a lunch break of 45 minutes. The lunch was also standardized and consisted of crackers, cheese and water. Moreover, the participants changed into the second clothing combination. The lunch break was followed by the same three activities as in the morning, however, due to technical reasons, the sitting session was switched to the end. After the final activity, the sensors on the subjects were detached, and anthropometric data was collected. These data included the height, weight, and body composition via Bod Pod® (Life Measurement Inc., Concord CA, USA).

Table 2 Time line of experimental protocol

time [min]	activity	clothing
-20	Preparation	Change
0	Baseline	Medium clothing comb. + blanket
20	Break	Change
40	Sitting 1/2	Light or medium clothing combination
60		
80	Slow Walking 1/2	
100	Preferred Walking 1/2	
120	Lunch break	Change
140		Medium or light clothing combination
160	Slow Walking 3/4	
180		
200	Preferred Walking 3/4	
220	Sitting 3/4	Change
240	Break	
260	anthropometric	

Simulation in ThermoSEM

The thermophysiological simulation model Eindhoven Maastricht (ThermoSEM) was evolved from Fiala's thermoregulation model (Fiala, 1998; Fiala et al., 1999) with modifications by Severens (2008) and Kingma (2012). In ThermoSEM, the human body is divided into 19 body parts which are represented by 18 concentric cylinders and one concentric semi-sphere. Each part consists of multiple tissue layers, e.g. bone, muscle, fat or skin, with a specific geometry and characteristics. The standard geometry of ThermoSEM represents an average adult male (73.5 kg, 1.86 m² body surface area, 14% body fat percentage, and 87.1 W total basal metabolic heat). Since this default model does not correspond with the recruited subjects, the adaptable geometry by Van Marken Lichtenbelt et al. (2007) and Severens (2008) was implemented. These studies introduce three scaling factors for the length and radii of all body parts, which are then optimized to match the individual body mass and fat percentage. For this study, the differences in fat distribution between males and females were also considered by adjusting the scaling of the fat layer of specific body parts to fit a typical male and a typical female subject as described in

(Wölki, 2017; Wölki and van Treeck, 2013). For SBF calculations, the neurophysiological approach to calculate SBF by Kingma et al. (2014) is implemented in ThermoSEM.

ThermoSEM also requires an input file for the activity level at each time step t . The average activity during baseline measurements is defined as 0.8 met. The activity at each time point t is then the ratio of the energy expenditure at the time point t and the average energy expenditure during the baseline measurement times 0.8.

Using the measured activity levels, environmental conditions and individual body characteristics, the experimental protocol was simulated in ThermoSEM continuously for all nineteen participants covering the start of baseline measurements to the end of the second sitting session. For further analysis, these simulations are titled "original simulation". As a second step, the measured SBF was prescribed in ThermoSEM. Since the LDF does not provide absolute measurements of SBF, the data could not directly be used in ThermoSEM. However, the individual perfusion responses can be imported by normalizing the data based on the average value during baseline measurement. In ThermoSEM, the normalized data is then converted into absolute values by multiplying the data with the averaged, simulated perfusion during the baseline session. Then, the simulation with the prescribed, measured SBF is carried out for all nineteen subjects, and is referred to as "adjusted simulation".

Data analysis

The measured activity levels and SBF are summarized for each session using Whisker-Box-Plots with outliers. An outlier is defined as a data point lying outside of 1.5 times the interquartile range and are displayed with an '+'. Furthermore, the mean values are marked with an 'x'.

For the comparison of measured and simulated skin temperatures, only the difference of these two values, the skin temperature differences (ΔT_{skin}), are displayed. Hence, positive values mean that the simulation is underestimating the local skin temperature, and negative values

mean that the simulation is overestimating the local skin temperature.

RESULTS

Human subject experiments

The resulting measured activity levels and further on, the measured foot SBF of the human subject experiments are used in ThermoSEM for local skin temperature prediction. Hence, the quality of the measured data is shortly evaluated using Whisker-Box-Plots.

The activity level for all six sessions is depicted in Figure 1. As expected, the mean activity level raises from sitting (0.94 met) to slow walking (1.8 met) to preferred walking (2.5 met). There is practically no difference between the equivalent sessions in the morning or in the afternoon. The highest variance in the data can be seen for the preferred walking speed, which is due to the different settings of the subjects.

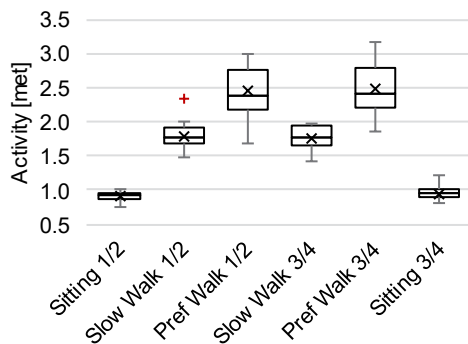


Figure 1 Whisker-Box-Plot for the activity of nineteen subjects with outliers (+)

Figure 2 shows the results for the normalized, measured foot SBF. The mean normalized, measured SBF of all nineteen subjects increases with increasing activity from 1.1 for sitting to 13.6 for slow walking and 20.3 for preferred walking. Again, there is no practical difference between equivalent morning and afternoon sessions. However, the variance for the walking sessions is larger than for the sitting sessions and outliers are present. Since the outliers belong to different subjects for different sessions, no subject was excluded from the data for further analysis.

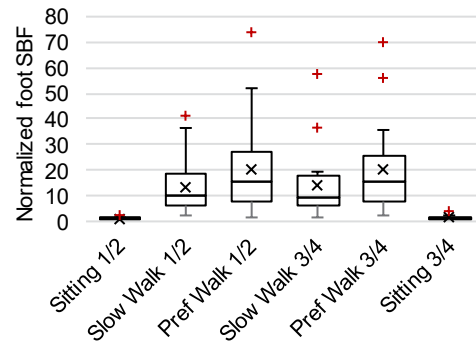


Figure 2 Whisker-Box-Plot for normalized, measured foot SBF of nineteen subjects with outliers (+)

Simulated foot SBF

The experimental protocol was simulated for all nineteen individuals using ThermoSEM and the subjects' measured body composition and activity level. Figure 3 shows the Whisker-Box-Plots for the normalized, simulated SBF for this original simulation. The mean normalized, simulated SBF is relatively constant for all sessions (0.4-0.5). This means that the increased activity level has no influence on the SBF prediction in the original simulation. In fact, the simulated values are about half of the measured ones for the sitting sessions, and even 27 to 40 times lower for the walking sessions. Also, the variance of the normalized, simulated SBF is mostly the same for all sessions and covers the values from almost 0 to 0.8. For the slow walking session 3/4, the median and quartiles are slightly raised, which is probably due to the preceding lunch break. This long break might have caused a slightly different thermal state for some simulated subjects than after the short sitting session at the beginning.

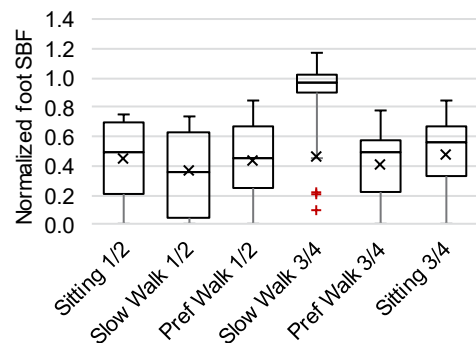
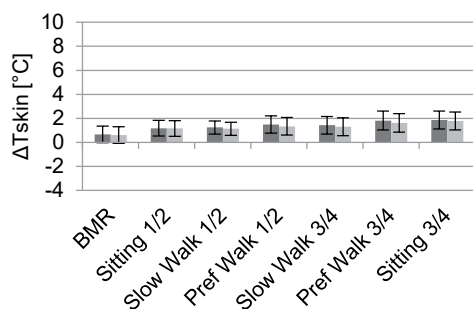


Figure 3 Whisker-Box-Plot for normalized, simulated foot SBF of nineteen subjects with outliers (+)

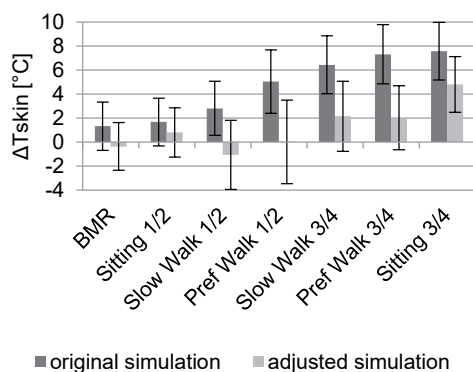
Effect on local foot skin temperature

Figure 4 compares the average ΔT_{skin} and its standard deviation of the measured and simulated mean and foot skin temperatures for the simulation using the originally simulated SBF and the simulation using the prescribed measured SBF for all experimental sessions. For the original simulation, the average, mean ΔT_{skin} is just below 2°C for all sessions, but increases slightly for later sessions (Figure 4a). Furthermore, the standard deviation is small with a value around 0.7°C. In contrast, ΔT_{skin} at the foot increases largely for later experimental sessions and reaches up to 7.5°C with an average standard deviation of 2.3°C (Figure 4b). Implementing the measured SBF in ThermoSEM, results in a small change for the mean ΔT_{skin} , but significantly lowers ΔT_{skin} for the foot. However, the standard deviation is again large at 2.6°C on average and 3.5°C for the preferred walking session 1/2. This means that the reduction in simulated foot skin temperature may lead to an increase in the absolute ΔT_{skin} for some individuals.

a) mean skin temperature difference



b) foot skin temperature difference



■ original simulation ■ adjusted simulation

Figure 4 Local skin temperature difference between the measured and simulated local skin temperatures for the original and adjusted simulation

DISCUSSION

The results show that by adjusting the foot SBF in ThermoSEM to the measured values, the foot skin temperature prediction can be improved for activities such as sitting or walking. Consequently, this means that the neurophysiological model needs to be improved to include activity levels above 1 met. It is suggested to include a thermoregulation term with the activity level as a parameter. However, to improve the whole model, also the SBF of other body parts needs to be evaluated for increases activity levels. It can be suspected that SBF for body parts such as legs, arms and hand are largely effected, because they are part of the movement process.

For future studies on this topic, the experimental protocol might be improved. For example, the variation in the measured foot SBF is very large (Figure 2). To some extent, the variations might be due to the range of participants' characteristics. Another possibility is that the LDF probe on the ankle became looser during the walking session. Because of the walking movement, the probe is exposed to higher forces than for measurements at seated or lying postures, and the fixation tape might not hold the probe in place properly. This issue might be improved by using a second probe on the other foot, better tape and repetitions of the same session with adjusting the probe in between. Moreover, the mean and foot skin temperature difference in Figure 4 increases for later sessions. One reason might be that the sessions are too short and heat balance is achieved between the subjects and their surroundings. Another reason for the large variations in foot skin temperature could be that the thermal properties of some shoes of the participants do not match the measured (average) thermal properties which are included in the thermophysiological model's input parameters. Standardized foot wear might be a solution to this issue, but might be too costly because of the large number of shoe sizes.

CONCLUSION

The local heat balances of human thermophysiological models need to be accurate in order to predict local skin temperature with a high level of certainty. This study shows that the neurophysiological local skin blood flow model needs improvements for activity levels above 1 met. The enhanced models can then be used for optimizing the built environment, especially where individual needs have to be considered.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors like to thank the participants of this study for their time and cooperation. A special thank also to the technical and scientific staff of Maastricht University that made this study possible.

REFERENCES

- Arens, E., Bauman, F., Johnston, L.P. and Zhang, H. (1991) Testing of Localized Ventilation Systems in a New Controlled Environment Chamber, *Indoor Air*, **1**, 263–281.
- EN-ISO 9886: (2004) Ergonomics - evaluation of thermal strain by physiological measurements., International Standards Organization.
- Fiala, D. (1998) Dynamic Simulation of Human Heat Transfer and Thermal Comfort, Dissertation, Leicester: De Montfort University.
- Fiala, D., Lomas, K.J. and Stohrer, M. (1999) A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system., *J. Appl. Physiol.*, **87**, 1957–1972.
- Fiala, D., Lomas, K.J. and Stohrer, M. (2001) Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions, *Int. J. Biometeorol.*, **45**, 143–159.
- Fiala, D., Havenith, G., Bröde, P., Kampmann, B. and Jendritzky, G. (2012) UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation, *Int. J. Biometeorol.*, **56**, 429–441.
- Foda, E. and Sirén, K. (2012) Design strategy for maximizing the energy-efficiency of a localized floor-heating system using a thermal manikin with human thermoregulatory control, *Energy Build.*, **51**, 111–121.
- Havenith, G. (2001) Individualized model of human thermoregulation for the simulation of heat stress response Individualized model of human thermoregulation for the simulation of heat stress response, *J. Appl. Physiol.*, **90**, 1943–1954.
- Huizenga, C., Zhang, H. and Arens, E. (2001) A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments, *Build. Environ.*, **36**, 691–699.
- Kingma, B.R.M. (2012) Human thermoregulation: a synergy between physiology and mathematical modelling, Dissertation, Maastricht University.
- Kingma, B.R.M., Vosselman, M.J., Frijns, A.J.H., Van Steenhoven, A. a. and van Marken Lichtenbelt, W.D. (2014) Incorporating neurophysiological concepts in mathematical thermoregulation models, *Int. J. Biometeorol.*, **58**, 87–99.
- Melikov, A.K., Arakelian, R.S., Halkjaer, L. and Fanger, P.O. (1994) Spot cooling. Part 2: Recommendations for design of spot-cooling systems, *ASHRAE Trans.*, **100**, 500–510.
- Severens, N.M.W. (2008) Modelling Hypothermia in Patients Undergoing Surgery, Dissertation, Eindhoven University of Technology.
- Tanabe, S.I., Kobayashi, K., Nakano, J., Ozeki, Y. and Konishi, M. (2002) Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD), *Energy Build.*, **34**, 637–646.
- van Marken Lichtenbelt, W.D., Frijns, A.J.H., Fiala, D., Janssen, F.E.M., van Ooijen, A.M.J. and Van Steenhoven, A.A. (2004) Effect of individual characteristics on a mathematical model of human thermoregulation, *J. Therm. Biol.*, **29**, 577–581.
- van Marken Lichtenbelt, W.D., Frijns, A.J.H., Van Ooijen, M.J., Fiala, D., Kester, A.M. and Van Steenhoven, A. a. (2007) Validation of an individualised model of human thermoregulation for predicting responses to cold air, *Int. J. Biometeorol.*, **51**, 169–179.
- Veselý, M. and Zeiler, W. (2014) Personalized conditioning and its impact on thermal

V. INTEGRIERTE GEBÄUDE- UND ENERGIE- KONZEPTE

ERHÖHUNG DES ANTEILS ERNEUERBARER WÄRME VON BESTANDSQUARTIEREN MITTELS MEHRLEITERWÄRMENETZEN

M. Bachmann¹, S. Brandt¹, B. Saeb Gilani¹ und M. Kriegel¹

¹Technische Universität Berlin, Hermann-Rietschel-Institut, Marchstraße 4, 10587 Berlin, Deutschland

KURZFASSUNG

Das vorliegende Paper präsentiert eine Untersuchung zur Realisierbarkeit eines Mehrleiter-Wärmenetzes anhand eines Beispielgebietes. Zur Überprüfung der Machbarkeit des Konzeptes und Detailanalyse einzelner Komponenten wird ein dynamisches Simulationsmodell unter Verwendung der Modellierungssprache Modelica erstellt. Als Untersuchungsgegenstand wird ein Bestandsquartier in Berlin in einem Ist-Szenario und einem Zukunft-Szenario betrachtet. Die Machbarkeit des neu entwickelten Wärmenetzkonzeptes konnte anhand der Netzsimulation nachgewiesen werden. Als Quellen erneuerbarer Wärme wurden Solarthermie, Erdsonden- und Abwasserwärmepumpen betrachtet. Nicht-erneuerbare Wärme wird über Erdgas-BHKWs und Erdgaskessel bereitgestellt. Im Ist-Szenario wurde ein Anteil erneuerbarer Wärme von 39 % erreicht. Dieser Anteil konnte im Zukunftsszenario auf 48 % erhöht werden.

EINLEITUNG

Mit einem Anteil von rund 27,4 % am Bruttostromverbrauch im Jahr 2014 sind erneuerbare Energien mittlerweile zu einer der wichtigsten Stromquellen geworden. Im Wärmemarkt bestehen dagegen noch Potenziale und Bedarf zum verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien. Im Jahr 2012 lag der Anteil der Wärme aus erneuerbaren Energiequellen in Wärmenetzen bei nur etwa 11,3 %. Der größte Anteil der regenerativ erzeugten Wärme entfällt dabei auf die Nutzung biogener Abfälle und Biomasse. Der direkten Nutzung von Umweltenergien und Niedertemperaturabwärme wird im Gegensatz dazu nur geringe Bedeutung beigemessen. (BMWi, 2015)

Heutige konventionell betriebene Wärmenetze nutzen häufig nur ein Temperaturniveau, den Vorlauf, um Verbraucher mit Wärme zu versorgen. Die Vorlauftemperaturen dieser Netze sind in der Regel hoch und liegen zwischen 90-130 °C. Um den Anteil erneuerbarer Wärme in Wärmenetze zu erhöhen, bietet sich die Nutzung bisher nur wenig genutzter regenerativer Wärmequellen, wie Umweltenergien, Solarthermie und Niedertemperaturabwärme an. Aufgrund vergleichsweise hoher Netztemperaturen des Wärmenetzes wird jedoch die Integration dieser Quellen erschwert. Ein Absenken des Temperaturniveaus des Vorlaufs ist in der Regel durch die Verbraucherart mit der höchsten Temperaturanforderung im Versorgungsgebiet begrenzt. Dies führt insbesondere in Bestandsquartieren zu einer begrenzten Integrierbarkeit von Niedertemperaturwärmequellen.

Daher wurde im Rahmen des Forschungsprojektes ein neuartiges Mehrleiter-Wärmenetz entwickelt, mit dessen Hilfe vor allem regenerative Wärmequellen auf niedrigem Temperaturniveau für die Wärmeversorgung genutzt werden können. Das entwickelte Netzkonzept reagiert vollständig flexibel hinsichtlich Bereitstellung und Entnahme von Wärme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus. Um die Machbarkeit dieses Netzkonzeptes zu untersuchen, werden Netzsimulationen durchgeführt. Darüber hinaus werden Erzeugermixe betrachtet, mit denen ein möglichst hoher Anteil regenerativ erzeugter Wärme in das Netz eingespeist und genutzt werden kann.

UNTERSUCHUNGSGEBIET

Die Entwicklung eines Mehrleiter-Wärmenetzes erfolgt anhand eines Beispielgebietes in Berlin-Pankow. Dieses ist als Mischgebiet mit Gebäudebestand charakterisiert und anhand einer Gebietsübersicht in Abbildung 1 dargestellt. Insgesamt sind 61 Einfamilienhäuser (EFH), 32 Mehrfamilienhäuser (MFH), eine Schule und ein Einkaufszentrum vorhanden. Dieses Untersuchungsgebiet wird in zwei unterschiedlichen Entwicklungsszenarien betrachtet, einem Ist- und einem Zukunft-Szenario.

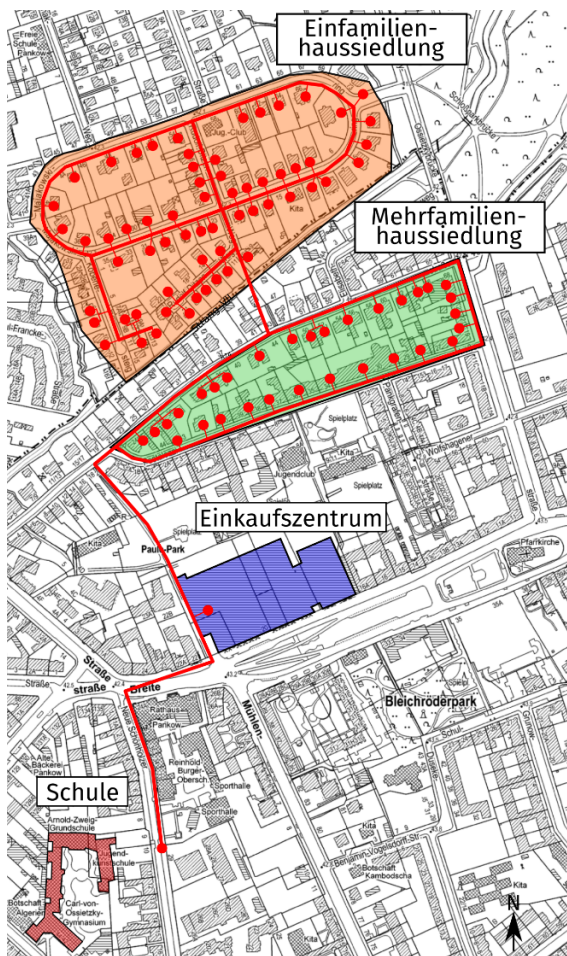


Abbildung 1: Untersuchungsgebiet, rote Kreise: Anschlusspunkte, rote Linie: Trassenverlauf; Quelle: Geoportal Berlin

Für die Betrachtung eines Versorgungskonzeptes dieses Quartiers werden Bedarfsprofile mit den dazugehörigen Temperaturanforderungen erstellt. Dazu wird die vorhandene Gebäudestruktur in 14 Typgebäude unterteilt. Die Wärmelastprofile und Trinkwarmwasserverbräuche dieser Typgebäude werden über Gebäudesimulationen erstellt, die an die DIN V 18599 angelehnt ist. Die erstellten Lastprofile der Typgebäude werden skaliert und auf alle im Netz

vorhandenen Gebäude übertragen. Für das Ist-Szenario ergibt sich ein Wärmebedarf von 17,1 GWh. Den vorhandenen Typgebäuden werden typische Systemtemperaturen zugeordnet, sodass insgesamt sechs Verbraucherarten mit unterschiedlichen Systemtemperaturen betrachtet werden. Der Trinkwarmwasserbedarf wird als separate Verbraucherart aufgeführt. Eine Übersicht der vorhandenen Verbraucherarten des Ist-Szenarios ist Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Energetische Eigenschaften von Typgebäuden (Ist-Szenario)

Bezeichnung Verbraucherart	Flächenanteil	Systemtemperaturen
90/70 °C	9,1 %	90/70/20 °C
75/65 °C	21,4 %	75/65/20 °C
70/55 °C	19,3 %	70/55/20 °C
60/45 °C	38,5 %	60/45/20 °C
45/35 °C	11,7 %	45/35/20 °C
TWW	100 %	> 60 °C

Das Zukunft-Szenario wird von dem Ist-Szenario abgeleitet. Es wird von einer Sanierungsrate von 1 %/a und einer Neubaurate von 0,2 %/a über einem Zeitraum von 35 Jahren ausgegangen. Des Weiteren wird die Annahme getroffen, dass alle Gebäude mit Systemtemperaturen 90/70/20 °C saniert werden und nach der Sanierung reduzierte Systemtemperaturen aufweisen. Dabei werden diesen Gebäuden zu 2/3 Systemtemperaturen von 60/45/20 °C und zu 1/3 Systemtemperaturen von 45/35/20 °C zugeteilt. Der Trinkwarmwasserbedarf (TWW-Bedarf) bleibt im Zukunft-Szenario unverändert. Der Wärmebedarf im Zukunft-Szenario beträgt 14,3 GWh/a. In Abbildung 2 ist eine Übersicht der Heizlastaufteilung der einzelnen Verbraucherarten für das Ist- und das Zukunft-Szenario dargestellt.

KONZEPT MEHRLEITERWÄRMENETZ

In einem Mehrleiterwärmenetz existieren im Gegensatz zu konventionell betriebenen Wärmenetzen mehrere nutzbare Temperaturniveaus. Dadurch können unterschiedliche Verbraucherarten mit Wärme auf angepassten Temperaturniveaus versorgt werden, wodurch die mittlere Netztemperatur herabgesetzt werden kann. Dies erleichtert die Integration von Niedertemperaturwärmequellen, wodurch der

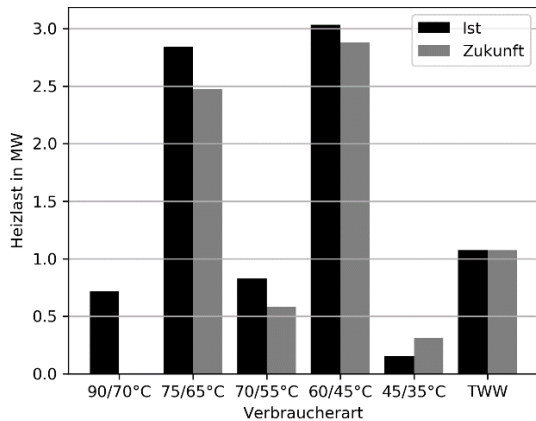


Abbildung 2: Heizlastverteilung nach Verbraucherart für das Ist- und Zukunft-Szenario

Anteil an regenerativ erzeugter Wärme erhöht werden kann. Dies erleichtert die Integration von Niedertemperaturwärmequellen, wodurch der Anteil an regenerativ erzeugter Wärme erhöht werden kann. Ausgehend von diesen Überlegungen können folgende Anforderungen an ein Mehrleiternetz abgeleitet werden:

1. Mehrleiterkonfiguration
2. Dezentrale Erzeugerstruktur
3. Flexibel hinsichtlich Bereitstellung und Entnahme von Wärmeströmen
4. Ausnutzung von Speicherkapazitäten, um volatile Wärmequellen bestmöglich ausnutzen zu können

Aus diesen Anforderungen wird ein neuartiger hydraulischer Ansatz entwickelt, der in Abbildung 3 für ein Dreileiternetz skizziert ist. Das Temperatur- und Druckniveau ist im oberen Leiter L1 am größten und nimmt hin zum niedrigsten Leiter L3 ab. Generell können in einem solchen Netz folgende drei Akteure unterschieden werden: Verbraucher (Ver), regelbare Erzeuger (reg. Erz) und nicht-regelbare Erzeuger (n. reg. Erz). Regelbare Erzeuger können die in das Netz einzuspeisende Leistung in einem definierten Bereich regulieren. Typische Vertreter sind Gaskessel oder wärmegeführte BHKWs. Nicht-regelbare Erzeuger hingegen stellen eine Wärmeleistung zur Verfügung, die nicht von außen reguliert werden kann. Als typische Vertreter dieser Erzeugerart können Solarthermieanlagen genannt werden.

Die genannten Akteure werden in der Netzkonfiguration kaskadierend zwischen zwei benachbarten Leitern angeordnet. Der Netzanschluss von Akteuren wird als statisch angenommen, d.h. der Anschluss eines Akteurs an das Wärmenetz

bleibt während des Betriebs unverändert. Wird die Position eines Akteurs im Wärmenetz beschrieben, so erfolgt dies durch Nennung des Leiterpaares zwischen dem sich der Akteur befindet. Verbraucher die zwischen L1 und L2 angeordnet sind, werden demnach L1L2-Verbraucher genannt.

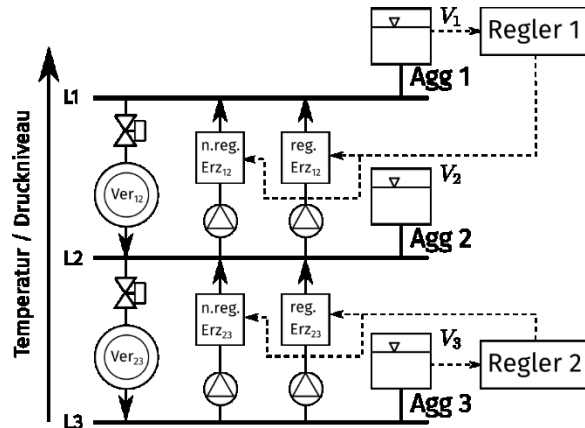


Abbildung 3: Hydraulisches Netzkonzept

Aufgrund der Druckkonfiguration nutzen Verbraucher passive Regelventile und Erzeuger aktiv betriebene Netzpumpen zur Leistungsregulierung. Da in einem solchen Netz eine Vielzahl unterschiedlicher Erzeuger existiert, ist eine hydraulische Entkopplung der einzelnen Leiter notwendig. Dies wird über Ausgleichsgefäße (Agg) mit variablem Füllungsvolumen realisiert. Diese erlauben eine zeitliche Entkopplung von Verbrauch und Erzeugung und fügen dem Netz eine zusätzliche Speicherkapazität hinzu. Eine Füllstandskontrolle ermöglicht es die Leistung der Erzeuger zentral zu regeln. Das Ziel der Erzeugerregelung besteht darin den Füllstand der im Netz vorhandenen Ausgleichsgefäße auf einem gleichbleibenden Niveau zu halten oder durch Änderung der Füllstände Speichereffekte auszunutzen.

Die Erzeugerstruktur ist in der Regel durch eine Vielzahl von Erzeugeranlagen charakterisiert. Diese werden bei steigender Wärmeanforderung in Abhängigkeit der individuellen Effizienz der Wärmeerzeuger sukzessive dem Netz hinzugefügt. Die Aufteilung der gesamten Erzeugerleistung im Netz erfolgt dabei unter folgenden Prämissen:

- Effiziente vor ineffizienten Erzeugern
- Volllast vor Teilast

NETZSTRUKTUR

Ausgehend von der in Abbildung 2 aufgeführten Verbraucherstruktur des Versorgungsgebietes kann eine Netzstruktur abgeleitet werden. Hierzu werden Verbraucherarten, mit ähnlichen Temperaturanforderungen zusammengefasst und über ein gemeinsames Temperaturniveau mit Wärme versorgt. Im Ist-Szenario werden die Verbraucherarten 90/70 °C und TWW gemeinsam aus dem Leiter L1 versorgt. Die Verbraucherarten 75/65 °C und 70/55 °C werden gemeinsam aus dem Leiter L2 versorgt. Damit ergeben sich insgesamt vier Temperaturniveaus, die von dem Wärmenetz im Ist-Szenario zu versorgen sind. Darüber hinaus ist ein weiterer Leiter für den Rücklauf der Verbraucherart mit der geringsten Temperaturanforderung notwendig. Somit ergibt sich für das Ist-Szenario ein Wärmenetz mit insgesamt fünf Leitern.

Für das Zukunfts-Szenario ist die Verbraucherart 90/70 °C nicht mehr vorhanden, sodass die Verbraucherarten 75/65 °C, 70/55 °C und TWW gemeinsam aus L1 versorgt werden können. Demnach ergibt sich ein Wärmenetz mit insgesamt vier Leitern. Eine Übersicht der Verbraucherzuordnung zu den einzelnen Leitern kann Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Zuordnung von Verbraucherarten und Leitern

Szenario	Leiter 1	Leiter 2	Leiter 3	Leiter 4
Ist	90/70 °C TWW	75/65 °C 70/55 °C	60/45 °C	45/35 °C
Zukunft	75/65 °C 70/55 °C TWW	60/45 °C	45/35 °C	-

BETRIEBSWEISE

Die Regulierung der Übertragungsleistung eines Mehrleiternetzes erfolgt über die Kombi-Regelung. Hierbei wird die über das Netz übertragene Leistung durch Variation der Netztemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur angepasst. Der Vorteil dieser Betriebsweise liegt darin, dass die Netztemperaturen nur so hoch, wie tatsächlich notwendig sind. Dadurch wird die Integration von Niedertemperaturwärme erleichtert. Die Temperaturfahrkurve des Netzes wird so angepasst, dass die Verbraucherart mit der höchsten Temperaturanforderung eines Leiters mit einer ausreichenden Leistung versorgt werden kann. Grädigkeiten in Wärmeüberträgern und

Wärmeverluste im Netz werden durch eine Übertemperatur ausgeglichen. Für das vorliegende Untersuchungsszenario wird eine Übertemperatur von 5 K verwendet.

Eine Übersicht der Netztemperaturen in Abhängigkeit der Außentemperatur für das Ist-Szenario kann der Abbildung 4 entnommen werden.

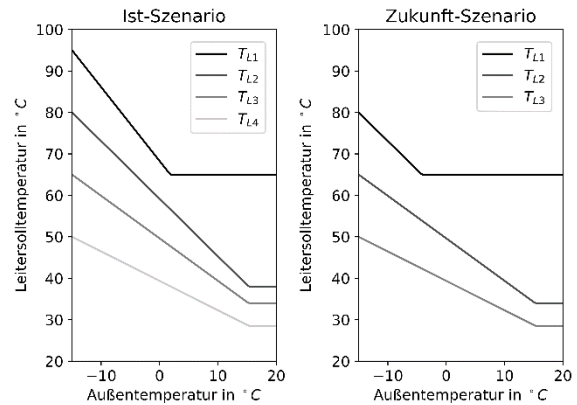


Abbildung 4: Netztemperaturen in Abhängigkeit der Außentemperatur, Ist-Szenario

ERZEUGERKONFIGURATION

Entscheidend für den Bedarf an Primärenergie und den Ausstoß an klimaschädlichen Gasen, stellt die Erzeugerkonfiguration dar. Diese beschreibt die vorhandenen Erzeuger, die Wärme in das Mehrleiternetz einspeisen. Für die beiden hier betrachteten Szenarien wird eine Erzeugerkonfiguration betrachtet, die mit dem Ziel erstellt wurde, einen möglichst hohen Anteil von Wärme aus erneuerbaren Quellen zu nutzen. Dabei werden folgende Erzeuger betrachtet: Sole-Wasser-Wärmepumpen (SW-WP), Abwasser-Wärmepumpen (AW-WP), Erdgas-BHKW (BHKW), Brennwertgaskessel (GK-BW), Heizwertgaskessel (GK-HW) und Solarthermie (ST).

ST stellt nicht-regelbare Erzeuger dar. Alle weiteren Erzeugerarten können als regelbare Erzeuger charakterisiert werden. Bei der Zuordnung der einzelnen Erzeugerarten wird auf die Temperaturabhängigkeit des Wirkungsgrades geachtet. Demnach werden Wärmepumpen und GK-BW eher für Nieder-, GK-HW und BHKWs eher für Hochtemperaturanwendungen eingesetzt. Eine Übersicht der Erzeugerkonfigurationen mit Angabe des Netzanschlusses kann Abbildung 5 entnommen werden.

Im Ist-Szenario wird sowohl im Leiterpaar L1L2 als auch L2L3 jeweils ein BHKW zur Grundlastdeckung eingesetzt. Zur Spitzenlastdeckung von

L1L2 werden Heizwertgaskessel genutzt. Die Mittel- und Spitzenlast von L2L3 wird über Brennwertgaskessel bereitgestellt. Das Leiterpaar L3L4 wird in der Grundlast von zwei Abwasserwärmepumpen versorgt. Diese nutzen als Wärmequelle Abwärme von Siedlungsabwässern im Untersuchungsgebiet aus. Die Mittellast wird von neun dezentral angeordneten Sole-Wasser-Wärmepumpen bereitgestellt. Zur Spitzenlastdeckung des Leiterpaares L3L4 dient ein Brennwertgaskessel. Das Leiterpaar L4L5 nutzt zur Grundlastdeckung eine Sole-Wasser-Wärmepumpe, die Mittel- und Spitzenlast wird von einem Brennwertgaskessel bereitgestellt.

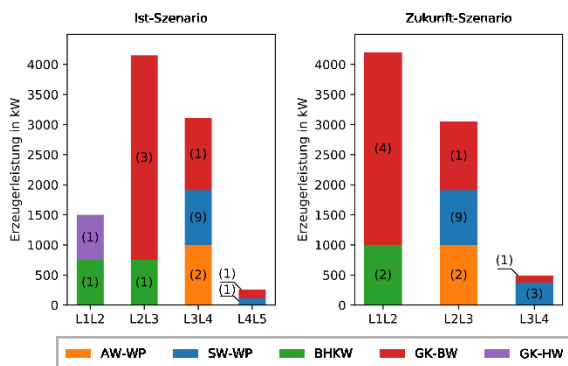


Abbildung 5: Erzeugerkonfigurationen, Zahlen in Klammern = Anzahl Anlagen

Im Zukunft-Szenario existieren aufgrund der geänderten Netzstruktur drei Leiterpaare. Das Leiterpaar L1L2 wird in der Grundlast über zwei BHKWs und in der Mittel- und Spitzenlast über Brennwertgaskessel versorgt. Die Versorgung von Leiterpaar L2L3 entspricht annähernd der Versorgung von Leiterpaar L3L4 im Ist-Szenario. Das Leiterpaar L3L4 wird in der Grund- und Mittellast von Sole-Wasser-Wärmepumpen versorgt. Die Spitzenlast wird durch einen Brennwertgaskessel bereitgestellt.

Neben der in Abbildung 5 dargestellten Aufteilung regelbarer Erzeuger, existieren in beiden Szenarien noch Solarthermieanlagen mit einer Aperturfläche von 4000 m². Als Volumen der Ausgleichsgefäße wurde 1452 m³ gewählt. Das Volumen des Ausgleichsgefäßes von Leiter L2 beträgt 5808 m³ und wurde so gewählt, dass das gesamte Füllvolumen der verbleibenden AGGs aufgenommen werden kann.

ERZEUGERMODELLIERUNG

Die in der Erzeugerkonfiguration vorhandenen Erzeugerarten werden in Abhängigkeit von Wirkungsgradkennlinien abgebildet.

Heizgaskessel:

Nach (Viessmann, 2006) ist der Teillastnutzungsgrad eines Heizgaskessels im Wesentlichen vom Auslastungsgrad f_{AG} abhängig. Der funktionale Zusammenhang kann der Abbildung 6 entnommen werden. Es wird davon ausgegangen, dass Änderungen der Kesselleistung gering im Vergleich zum Betrachtungszeitraum bei der Entwicklung der Teillastnutzungsgrade sind. Dadurch können die dargestellten Teillastverläufe als Wirkungsgrade angenähert werden.

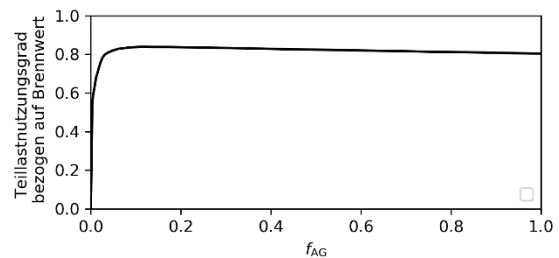


Abbildung 6: Teillastnutzungsgrad – Heizgaskessel, (Viessmann, 2006)

Brennwertgaskessel:

Der Wirkungsgrad eines Brennwertgaskessels ist nach (Lochinvar, 2018) vom Auslastungsgrad und der Kesselrücklauftemperatur abhängig. Damit ergeben sich die in Abbildung 7 dargestellten funktionalen Zusammenhänge, die linear interpoliert werden.

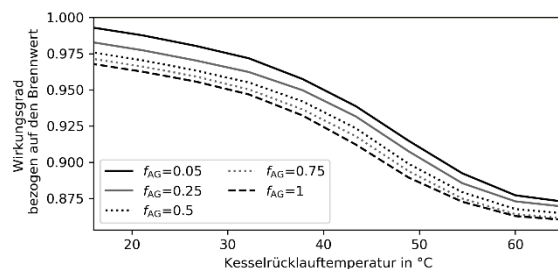


Abbildung 7: Teillastwirkungsgrade – Brennwertgaskessel, (Lochinvar, 2018)

Wärmepumpen

Wärmepumpen werden anhand ihres thermodynamischen Vergleichsprozesses, dem Carnot-Prozess, abgebildet. Hier erfolgt eine Betrachtung der Leistungszahl COP (engl. Coefficient of Performance). Diese wird aus dem Wärmestrom

am Kondensator \dot{Q}_{Kon} und der aufgenommenen elektrischen Leistung P_{el} ist wie folgt definiert:

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_{\text{Kon}}}{P_{\text{el}}} \quad (1)$$

Der COP einer Wärmepumpe wird über die Kondensator- und Verdampfertemperatur (T_{Kon} und T_{Ver}) und einem Wirkungsgrad $\eta_{\text{real}} = 0,5$ nach Gleichung (2) angenähert.

$$\text{COP}_{\text{real}} = \frac{T_{\text{Kon}}}{T_{\text{Kon}} - T_{\text{Ver}}} \cdot \eta_{\text{real}} \quad (2)$$

Als Verdampfertemperatur wird die Temperatur der Wärmequelle mit Berücksichtigung einer Grädigkeit von $\Delta T_G = 5 \text{ K}$ und als Kondensatortemperatur die Temperatur des Nutzwärmestroms, die Gebäudevorlauftemperatur, verwendet. Als Quelltemperatur für Sole-Wasser-Wärmepumpen wird eine konstante Erdreichtemperatur von 11 °C angesetzt, wie sie in Tiefen $> 12 \text{ m}$ in der betrachteten Klimaregion 4 üblich ist (PIK, 2018). Die Abwassertemperatur für Abwasserwärmepumpen wird anhand des in Abbildung 8 dargestellten Verlaufs abgebildet.

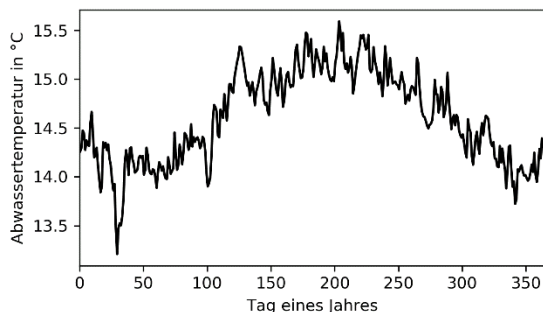


Abbildung 8: Abwassertemperatur von Siedlungsabwässern; (Wanner, 2004)

Blockheizkraftwerk

Der Wirkungsgrad eines BHKWs ist im Wesentlichen von der Größe der Anlage und des Auslastungsgrades abhängig. Der Gesamtwirkungsgrad η_{ges} setzt sich aus einem thermischen und einem elektrischen Teilwirkungsgrad (η_{th} und η_{el}) nach Gleichung (3) zusammen.

$$\eta_{\text{ges}} = \eta_{\text{th}} + \eta_{\text{el}} \quad (3)$$

Nach (ASUE, 2010) kann für den Gesamtwirkungsgrad für Anlagen mit einer Leistung von $500 - 750 \text{ kW}_{\text{el}}$ $\eta_{\text{ges}} = 0,90$ angesetzt werden. Der elektrische Wirkungsgrad wird anhand eines Teillastwirkungsgrades $\eta_{\text{el,TL}}$ und einem

Nennlastwirkungsgrad $\eta_{\text{el,NL}}$ nach Gleichung (4) angenähert.

$$\eta_{\text{el}} = \eta_{\text{el,TL}} \cdot \eta_{\text{el,NL}} \quad (4)$$

In (Milan et al., 2015) wird ein funktionaler Zusammenhang zwischen installierter elektrischer Leistung und dem Nennlastwirkungsgrad vorgeschlagen. Für BHKWs mit einer Nennleistung von $500 \text{ kW}_{\text{el}}$ folgt $\eta_{\text{el,NL}} = 0,39$ und für ein BHKW mit einer Nennleistung von $750 \text{ kW}_{\text{el}}$ folgt $\eta_{\text{el,NL}} = 0,40$. Der Teillastwirkungsgrad wird in einem Lastbereich von $30 - 100 \%$ nach dem in Abbildung 9 dargestellten Verlauf angenähert.

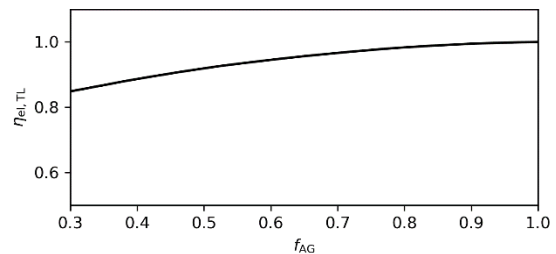


Abbildung 9: Teillastwirkungsgrad BHKW als Funktion des Auslastungsgrades, (Milan et al., 2015)

Solarthermie

Die flächenspezifische Kollektorleistung \dot{q}_{Kol} wird anhand des Kollektorwirkungsgrades η_{Kol} und der flächenspezifischen Solarstrahlung \dot{q}_{sol} nach Gleichung (6) abgebildet. Der Kollektorwirkungsgrad berechnet sich nach Gleichung (6) (Viessmann, 2008)

$$\dot{q}_{\text{Kol}} = \dot{q}_{\text{sol}} \cdot \eta_{\text{Kol}} \quad (5)$$

$$\eta_{\text{Kol}} = \eta_{\text{Opt}} - \frac{k_1 \cdot \Delta T_{\text{Kol}}}{\dot{q}_{\text{sol}}} - \frac{k_2 \cdot \Delta T_{\text{Kol}}^2}{\dot{q}_{\text{sol}}} \quad (6)$$

Die Werte η_{Opt} , k_1 und k_2 stellen kollektorindividuelle Kennwerte dar und werden für jeden Kollektor individuell ermittelt. Für nachfolgende Untersuchungen werden die in Tabelle 3: Zuordnung von Verbraucherarten und Leitern (Viessmann, 2017) dargestellten Kennwerte eines Vakuumröhrenkollektors genutzt. Die Temperaturdifferenz ΔT_{Kol} stellt die Differenz zwischen Kollektor- und Umgebungstemperatur T_{Kol} und T_U dar.

Die Vorlauftemperatur des Kollektors wird über die Stagnationstemperatur T_{sta} ermittelt. Diese stellt die maximal im Kollektor erreichbare Temperatur dar und kann als theoretischer Grenzwert betrachtet werden. Es wird angenommen, dass eine Regeleinrichtung jede beliebige

Vorlauftemperatur erreichen kann, die kleiner als die Stagnationstemperatur ist. Die Berechnung der Stagnationstemperatur wird aus Gleichung (6) mit der Bedingung $\dot{q}_{K_{ol}} = 0$ abgeleitet. Ist diese größer als die Netztemperatur, dann wird davon ausgegangen, dass die geforderte Netztemperatur erreicht wird. Die Einspeisung der Solarthermie erfolgt im Gegensatz zu allen anderen Erzeugern über einen dynamischen Leiteranschluss. Während der Heizperiode (01.10. – 30.04) wird der Leiteranschluss L3L4 und außerhalb L1L2 gewählt. Dadurch kann eine bestmögliche Ausnutzung des Solarertrages erreicht werden.

Tabelle 3: Zuordnung von Verbraucherarten und Leitern (Viessmann, 2017)

η_{opt}	k_1	k_2
0,758	1,28 W/m ² /K	0,006 W/m ² /K

$$T_{sta} = T_U - \frac{k_1}{2k_2} + \sqrt{\left(\frac{k_1}{2k_2}\right)^2 + \frac{\dot{q}_{sol}}{k_2} \cdot \eta_{opt}} \quad (7)$$

ERGEBNISSE

Alle im Untersuchungsgebiet vorhandenen Verbraucher konnten ganzjährig sicher in beiden Szenarien versorgt werden. Auch das genutzte Regelungskonzept wurde erfolgreich anhand der Netzsimulation erprobt. In Abbildung 10 ist der relative Füllstand der im Netz vorhandenen Ausgleichsgefäße des Ist-Szenarios dargestellt. Die Füllstände der AGGs 3, 4 und 5 schwanken geringfügig um den Sollwert von 0,5. Anhand des Füllstandes von AGG 1 und 2 kann der Speichereffekt des Netzes erkannt werden. Der Sollwert des Füllstandes von AGG 1 liegt regulär bei 0,1. Wird im Sommer ein großer Anteil Solarwärme eingespeist und der Verbrauch überstiegen, dann wird dem AGG 1 Wärmeträgermedium (WTM) entzogen und der Füllstand von AGG 1 bis zu einem Grenzwert von 0,9 angehoben. Da AGG 2 ein größeres Füllvolumen als AGG 1 hat, sind die relativen Änderungen des Füllstandes von AGG 2 geringer als von AGG 1.

Entscheidend für den Primärenergiefaktor und den Ausstoß von CO₂ ist der Einspeisemix des Untersuchungsgebietes. Dieser gibt an, welche Wärmemenge dem Netz von welcher Erzeugerart bereitgestellt wird. In Abbildung 11 ist der

Einspeisemix für das Ist- und das Zukunft-Szenario dargestellt. Im Ist-Szenario kann ein solarer Deckungsgrad von 5,1 % und im Zukunft-Szenario von 6,0 % erreicht werden. Der Grund für den relativen Anstieg liegt im Wesentlichen im geringeren Bedarf des Zukunft-Szenarios. Die absolut eingespeiste Solarwärme bleibt annähernd identisch. Zusammen mit Wärme, die von Wärmepumpen bereitgestellt wird, kann im Ist-Szenario ein Anteil regenerativ erzeugter Wärme von 39,4 % und im Zukunft-Szenario von 47,8 % erreicht werden. Im Vergleich der beiden Szenarien kann erkannt werden, dass der Anteil von Wärme aus BHKWs und Gaskesseln im Zukunft-Szenario deutlich reduziert werden kann. Dies ist auf die Verringerung eines Wärmebedarfs auf hohen Temperaturen zurückzuführen. Die absolut eingespeiste Wärme von Wärmepumpen und Solarthermieranlagen bleibt hingegen nahezu identisch. Dies zeigt, dass der Anteil an Wärme aus fossilen Quellen bei einer stetigen Sanierung des Quartiers sukzessive reduziert werden kann.

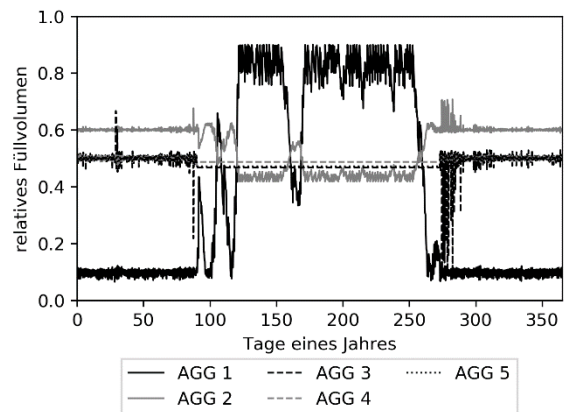


Abbildung 10: Relativer Füllstand Ausgleichsgefäße, Ist-Szenario

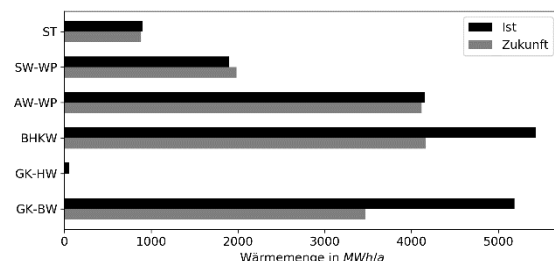


Abbildung 11: Einspeisemix

Als Bewertungsgrößen der beiden Szenarien werden der Primärenergiefaktor (PEF) und der CO₂ Ausstoß betrachtet. Beide Bewertungsgrößen sind in Tabelle 4 dargestellt. Anhand des PEF sind kaum Unterschiede zwischen den beiden Szenarien zu erkennen. Dies ist auf zwei

gegenläufige Effekte zurückzuführen. Zum einen ist die Stromproduktion im Zukunft-Szenario aufgrund des geringeren Wärmeanteils aus von BHKWs verringert, zum anderen konnte die benötigte Brennstoffenergie durch Reduzierung von Wärme aus Gaskesseln gesenkt werden. Beide Effekte gleichen sich aus, sodass der PEF annähernd identisch ist. Im Hinblick auf den CO₂-Ausstoß kann hingegen eine deutliche Reduzierung um 28,5 % erkannt werden. Grund hierfür ist zum einen die Reduzierung des Wärmebedarfs um 16,3 % und zum anderen die Erhöhung des relativen Anteils an regenerativen Wärmequellen am Einspeisemix des Zukunft-Szenarios.

Tabelle 4: Bewertungsgrößen

Szenario	Primärenergiefaktor	CO ₂ -Ausstoß in t/a
Ist-Szenario	0,654	3969,8
Zukunft-Szenario	0,658	2838,2

DISKUSSION

Das hier vorgestellte Wärmenetzkonzept zeigt eine Möglichkeit auf, wie der Anteil an regenerativ erzeugter Wärme in einem Versorgungsgebiet möglichst effizient verteilt werden kann. Solch ein Konzept erscheint dann sinnvoll, wenn es eine Verbraucherstruktur mit unterschiedlichen Temperaturanforderungen existiert und darüber hinaus regenerative Wärmequellen vorhanden sind, die ebenfalls Wärme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus bereitstellen kann.

Die hier betrachteten Erzeugermixe zeigen Potentiale auf, die mit Mehrleiternetzen heute und auch in Zukunft erreicht werden können. In wie weit dieser Anteil regenerativ erzeugter Wärme tatsächlich bei einer realen Ausführung erreicht werden kann, hängt dabei im Wesentlichen von den lokalen Gegebenheiten ab. Darüber hinaus ist eine Priorisierung der Erzeuger anhand der Effizienz oder anderer Bewertungsgrößen entscheidend. Die Untersuchungen zeigen, dass insbesondere für die Versorgung von Verbrauchern mit einem Wärmebedarf auf hohen Temperaturen, Brennstoffe notwendig sind. Werden hierfür biogene Brennstoffe genutzt, so kann ein noch deutlich höherer Anteil regenerativ erzeugter Wärme erreicht werden. Solarthermie zeigt insbesondere in den Sommermonaten erhebliche Potentiale auf. Werden hier saisonale Speicher eingesetzt, so kann der Anteil regenerativ

erzeugter Wärme nochmals deutlich erhöht werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Dieses Paper beschreibt die Entwicklung und die Überprüfung der Machbarkeit eines neuartigen Wärmenetzkonzeptes anhand von Netzsimulationen. Hierzu wurde ein Bestandsquartier als Untersuchungsgebiet in zwei Entwicklungsszenarien betrachtet. Die Ergebnisse zeigen, dass bereits heute vergleichsweise hohe Anteile regenerativ erzeugter Wärme erreicht werden können, wenn vorhandene Erzeugerpotentiale ausgenutzt werden. In Zukunft ist mit einer Reduzierung des Temperaturniveaus auf der Verbraucherseite aufgrund zunehmender Gebäudesanierung zu rechnen. Dies erlaubt den Anteil regenerativ erzeugter Wärme nochmals zu steigern.

DANKSAGUNG

Wir danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die finanzielle Unterstützung. Gefördertes Vorhaben: 03ET1237A.

LITERATUR

- BMWi 2015. Zweiter Erfahrungsbericht zum Erneuerbaren-Energie-Wärmegesetz, Berlin 2015.
- Wanner 2004. Schlussbericht Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen, Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Dübendorf, Schweiz, 2004
- Viessmann, 2006. Fachreihe Brennwertechnik, Brennwertechnik für Wirtschaftlichkeit und Umweltschonung, Viessmann Deutschland GmbH, Allendorf, 2006
- Lochinvar, 2018. Boiler Efficiency Curve. http://www.lochinvar.com/_linefiles/CREST%20Efficiency%20Curve.pdf Zuletzt zugegriffen am 18.04.2018
- ASUE, 2010. BHKW-Grundlagen, ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., Berlin, 2010
- Milan et al., 2015. Modelling of Non-linear CHP Efficiency Curves in Distributed Energy Systems, Applied Energy, Ausgabe 148, Seiten 334-347, 2015

PIK, 2018. Potsdam-Institut für Klimaforschung, Bodentemperaturen. https://www.pik-potsdam.de/services/klima-wetter-potsdam/klimazeitreihen/bodentemperatur/index_html Zuletzt zugegriffen am 18.04.2018

Viessmann 2008, Planungshandbuch Solarthermie. Viessmann Deutschland GmbH, Allendorf, 2018

Viessmann 2017, Datenblatt VITOSOL 200-TM, Viessmann Deutschland GmbH, 2017

WÄRMESPEICHERUNG IN DER GEBÄUDESTRUKTUR - UMSETZUNG EINES GROSSDEMONSTRATORS

C. Caspari¹ und M. Pahn¹

¹ Technische Universität Kaiserslautern, Massivbau und Baukonstruktion, Kaiserslautern, Germany

KURZFASSUNG

Betonkerntemperierungen (kurz: BKT) unterscheiden sich gegenüber anderen thermisch aktiven Bauteilen, wie zum Beispiel Fußbodenheizungen, durch ihre hohe thermische Trägheit. Hiermit ist es möglich, Wärme in den massiven Baustoffen zu speichern. Das große Volumen der Gebäudestruktur kann so zur niederexergischen Wärmespeicherung von Erneuerbaren Energien herangezogen werden.

Neben der Wärmespeicherung sind thermisch aktivierte Bauteile in der Lage den Innenraum zu temperieren (Heizen und Kühlen) und/oder über die Fassade Wärme bereitzustellen (Massivabsorber). Durch diese Multifunktionalität kann eine nachhaltige Gebäudestruktur entstehen, die zu einer vermehrten und effizienten Nutzung von solarer Wärme beiträgt. Zu diesem Zweck wird ein Gebäudeenergiekonzept zur effizienten Nutzung von multifunktionalen Betonfertigteilen entwickelt und in einem Großdemonstrator umgesetzt: Das Smallhouse IV.

In der vorliegenden Arbeit wird das Gebäudeenergiekonzept des Smallhouse IV vorgestellt, untersucht und bewertet. Zuerst wird auf die Wärmespeicherung in der Bauteilmasse eingegangen. Anschließend werden das Konzept, die hier verwendeten Anlagentechnik und dessen Verschaltung erläutert. Hierbei werden die unterschiedlichen Wirkungsweisen zwischen einem herkömmlichen Gebäudeenergiekonzept mit einem Wasserspeicher und dem Gebäudeenergiekonzept des Smallhouse IV untersucht. Ziel dieser Arbeit ist die verschiedenen Wirkungsweisen zwischen der Wärmespeicherung in der Bauteilmasse und in einem Wasserspeicher zu erläutern.

EINLEITUNG

Um die Ziele der Energiewende im Bereich der Raumwärme umzusetzen bestehen zwei grundsätzliche Möglichkeiten: das Verringern der Wärmeverluste und/oder das Steigern des Anteils Erneuerbarer Energien an der Wärmeversorgung. Ersteres findet beispielsweise im Passivhaus-Konzept seine Anwendung. Der Wärmewiderstand und die Luftdichtheit der Gebäudehülle werden dabei, um die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste auf ein Minimum zu reduzieren, massiv gesteigert. Hierdurch wird der Heizwärmebedarf gesenkt. Die zweite Möglichkeit besteht in der effizienten Nutzung Erneuerbarer Energien. Der Fokus hierbei liegt nicht primär im Senken des Wärmebedarfs, sondern im Steigern des Anteils Erneuerbarer Energien am Endenergiebedarf. Dies führt zu einer Reduzierung der notwendigen Zusatzenergie und somit zu einer Reduzierung der Primärenergie.

Die Strategie der effizienten Nutzung Erneuerbarer Energien hat ein zentrales Problem: die Wärmespeicherung. Erneuerbare Energien treten fluktuierend und nicht steuerbar auf und müssen für eine effektive Nutzung gespeichert werden. Solaraktivhäuser nutzen hierfür große Wasserspeicher innerhalb der Gebäudehülle. Praxisbeispiele zeigen, dass dieses Konzept funktioniert und hohe solare Deckungsgrade zulässt. Dem entgegenstehen die vergleichsweise hohen Anschaffungskosten und der hohe Platzbedarf. Neben Wasserspeichern verfügt ebenfalls die Gebäudetragstruktur über die Fähigkeit Wärme zu speichern. Mittels wasserführender Rohre kann über ein Wärmeträgermedium in die Betonstruktur aktiv Wärme eingebracht oder entzogen werden.

WÄRMESPEICHER BAUTEIL

Das Wärmespeichermedium sind massive die Baustoffe der Gebäudestruktur, wie z.B. Beton oder Mauerwerk. Die thermischen Eigenschaften der Wärmespeichermedien bestimmen dabei die Qualität der Wärmespeicherung maßgeblich (Kaltschmitt et al., 2009). Je höher die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität des Wärmespeichermediums, desto besser kann der Speicher die Wärme aufnehmen und speichern. Dadurch, dass bei Beton der Wärmetransport ausschließlich über Wärmeleitung stattfindet und nicht wie bei Wasser über Konvektion, ist hier eine hohe Wärmeleitfähigkeit von besonderer Bedeutung. Tabelle 1 vergleicht die beiden Wärmespeichermedien Beton und Wasser.

Tabelle 1: Thermische Eigenschaften der Wärmespeichermedien Beton und Wasser (Kaltschmitt et al., 2009)

	Wasser	Stahlbeton
Wärmeleitfähigkeit [W/m*K]	0,60	1,5
Spez. Wärmekapazität [kJ/kg*K]	4,18	0,85
Dichte [kg/m ³]	998	2.500
Wärmespeicherezahl [kWh/m ³ *K]	1,16	0,59

Aktiviertere Bauteile stehen mit dem Innenraum im direkten thermischen Kontakt. Das Beladen der Bauteile wird aktiv gesteuert und das Entladen findet selbstregulierend statt. Im Gegensatz zu thermischen Wasserspeichern beeinflussen aktive Bauteile die Raumlufttemperatur und die Oberflächentemperatur direkt. Daher ergeben sich für diese Systeme aus den Grenzen der Behaglichkeit die Speichergrenztemperaturen. Hieraus folgt, dass die mittlere Oberflächentemperatur auf 25-30°C zu begrenzen ist.

Das thermische Verhalten aktivierter Bauteil ist maßgebend vom Bauteilaufbau abhängig. Die wichtigsten Kenngrößen hierfür sind der U-Wert, das maximale Wärmespeichervermögen, der effektive Nutzungsgrad und die Be- und Entladedauer (Caspari, Pahn, 2016).

Multifunktionale Bauteile sind auf den Bedarf und das Angebot abzustimmen. Hierfür sind die Schichtdicken, die Materialien und die Lage des Rohrregisters untereinander und auf den Raum anzupassen (Caspari, Pahn, Krumke, 2015). Die thermische Reaktionszeit eines Bauteils bestimmt dabei die Geschwindigkeit der Raumtemperierung. Je höher die Wärmekapazität der massive Schicht vor dem Rohrregister, desto reaktionsträger ist das thermische Bauteilverhalten.

Abbildung 1 zeigt schematisch den Be- und Entladevorgang eines reaktionsschnellen und einer reaktionsträgen thermisch aktivierten Bauteils. In der Beladephase werden im Solarbetrieb des Kollektors die Bauteile erwärmt. Hiernach wird in der Entladephase die Wärme zeitverzögert an den Innenraum abgegeben. Reaktions-schnelle Bauteile können mit einer geringen Zeitverzögerung kurzfristig auf thermische Lasten reagieren, haben aber kein Potenzial Wärme zu speichern. Reaktionsträge Bauteile geben ihre Wärme mit einer großen Zeitverzögerung an den Raum ab. Durch die träge Raumtemperierung sind diese Bauteile in der Lage, Wärme aufzunehmen und nach dem Beladevorgang zeitverzögert an den Innenraum abzugeben. Dieser Speichereffekt führt allerdings auch dazu, dass diese Bauteile eingeschränkt regelbar sind (Kempkes et. al., 2009), da durch das reaktions-träge Verhalten nicht auf schnelle Lastwechsel reagiert werden kann. Um trotzdem auf Lastwechsel reagieren zu können, bedarf es eine prädiktive Regelung oder eine Kombination von reaktionsschnellen und -trägen Systemen.

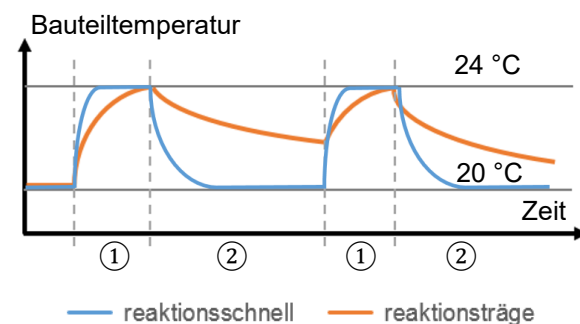


Abbildung 1: Be- ① und Entladevorgang ② thermisch aktivierter Bauteile.

GROßDEMONSTRATOR

Das Forschungsprojekt „Großdemonstrator – Multifunktionale Betonfertigteile für energetisch nutzbare Gebäudetragestrukturen“ befasst sich im Kern mit der Entwicklung eines Gebäudeenergiekonzepts zur effizienten Nutzung von multifunktionalen Betonfertigteilen. Zur Untersuchung des thermischen Verhaltens der Bauteile im realen Betrieb wird neben thermischen Gebäudemodellen ein Demonstrationsgebäude entwickelt und anschließend gebaut. Dieses Demonstrationsgebäude trägt den Namen „Smallhouse IV“.

Ähnlich wie bei dem Gebäudeenergiekonzept von Solaraktivhäusern, verfolgt das Small-

house IV den Ansatz des minimalen primärenergetischen Bezugs durch die effiziente Nutzung lokaler solarer Wärme. Im Gegensatz zu einer zentralen Wärmespeicherung in Wasserspeichern wird das Potenzial der Gebäudestruktur zur Wärmespeicherung herangezogen. Die primäre Wärmequelle bildet ein Solarthermiekollektor und als Zusatzheizung wird eine Wärmepumpe verwendet. Die Dachelemente sind in der Außenschale aktiviert und fungieren als Massivabsorber und bieten somit eine alternative Wärmequelle (①). Um das thermische Potenzial des Kollektors in einem möglichst großen Umfang nutzen zu können, dienen multifunktionale Bauteile, ein minimaler Wasserspeicher und das überbaute Erdreich unter dem Gebäude als Wärmespeicher. Hierbei werden die multifunktionalen Bauteile zur Kurzzeitspeicherung herangezogen, folglich zum Ausgleich der täglichen Diskrepanz zwischen solarem Angebot und Heizlast (②). Das Erdreich dient hingegen als Langzeitspeicher zum möglichst saisonalen Ausgleich zwischen Sommer und Winter (③). Die während des Sommers im Erdreich gespeicherte Wärme kann mittels einer Wärmepumpe bei Bedarf zur Deckung des Heizwärmebedarfes nutzbar gemacht werden und über die oberflächennah aktivierte Bodenplatte den Raum schnell temperieren (④). Die Kombination aus reaktionsträgen und -schnellen Bauteilen soll einerseits zu einer Lastenverschiebung von solarem Angebot zum Heizbedarf beitragen und andererseits zu einem schnellen Ausgleich von Lastspitzen führen. Hierbei soll untersucht werden, inwieweit durch die Kombination verschiedener multifunktionaler Bauteile, anfallende solare Wärme effizient genutzt werden kann. Abbildung 2 zeigt eine Visualisierung des Großdemonstrators mit einer Offenlegung der thermisch aktiven Bauteile.

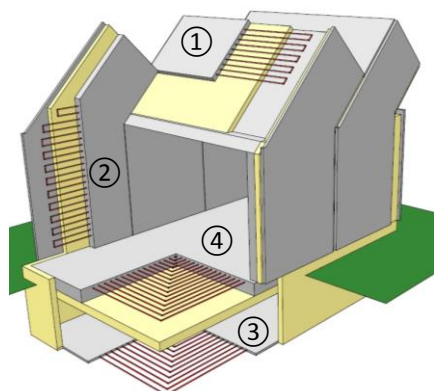









Abbildung 2: Smallhouse IV mit Offenlegung der thermisch aktiven Bauteile: ① Massivabsorber, ② kerntemperierte Außenwände, ③ Erdreichspeicher, ④ aktive Bodenplatte

Tabelle 2 zeigt die im Großdemonstrator verwendeten TGA-Komponenten. Diese Komponenten werden mittels 6 verschiedener Betriebsmodi gesteuert (Caspari, Pahn, 2017).

Tabelle 2: Einfluss der Verbindungsmittel auf den Wärmestrom von kerngedämmten Elementwänden

	Komponente Funktion	Auslegung
	Solarkollektor Wärmeerzeugung	Vakuumpöhrnenkollektor 15 m ² (Brutto), Richtung Süden
	Deckenelement Wärmeerzeugung	24 m ² (ges. Dachfl.) 7 cm aktivierter Beton Tiefe der Rohre: 4 cm Richtung Süden U = 0,236 W/m ² *K
	Wärmepumpe Wärmeerzeugung	Sole/Wasser-WP Wärmeleistung: 3 kW Heizen & Kühlen
	Erdreichspeicher Langzeitwärmespeicherung	36 m ² (ges. Grundfl.) 14 cm Dämmschürze 2 Kreisläufe in 1,4 m Bodenart: Sandstein
	Kerntemperierte Wandelemente Kurzzeitwärmespeicherung	80 m ² (ges. Wandfl.) 21 cm aktivierter Beton Tiefe der Rohre: 10 cm U = 0,201 W/m ² *K
	Aktive Bodenplatte Temperierung	36 m ² (ges. Grundfl.) 20 cm aktivierter Beton Tiefe der Rohre: 4 cm U = 0,147 W/m ² *K
	Wasserspeicher hyd. Ausgleich	Wasserspeicher 100 l

Der Großdemonstrator besteht aus drei verschiedenen Bauteilgruppen: der Bodenplatte, den Außenwänden sowie den Deckenelementen. Jedes dieser Bauteile ist als multifunktionales Bauteil ausgeführt und übernimmt unterschiedliche thermische Funktionen. Die kerntemperierten Außenwände des Großdemonstrators sollen neben ihrer wärmedämmenden Eigenschaften auch zur Wärmespeicherung und zur Temperierung des Innenraumes genutzt werden. Dessen dreischichtiger Bauteilaufbau besteht aus 21 cm Tragschale, 14 cm Wärmedämmung und 7 cm Außenschale. Zur Kerntemperierung sind in der Mitte der Tragschale Rohrregister angeordnet. Die Aufgaben der oberflächennah aktivierten Bodenplatte sind die Wärmedämmung und Temperierung des Innenraumes mit geringer Zeitverzögerung. Die Bodenplatte besteht aus 20 cm Beton und 20 cm Wärmedämmung. Im Gegensatz zu den Außenwänden, befinden sich hierbei das Rohrre-

gister 4 cm unter der Oberfläche und sorgt somit für eine geringe Reaktionszeit. Somit kann die Bodenplatte die eingebrachte Wärme schneller an den Innenraum abgeben. Während die Bauteile primär die Grundlast des Wärmebedarfs decken, sorgt die Aktivierung in der Bodenplatte für die Deckung der Lastspitzen. Die Deckenelemente werden ebenfalls wie die Außenwände in Sandwichbauweise hergestellt und sind innerhalb der Vorsatzschale, demzufolge nach außen, thermisch aktiviert. Dessen dreischichtiger Bauteilaufbau besteht aus 21 cm Tragschale, 12 cm Wärmedämmung und 7 cm Außenschale. Hierdurch fungieren die Deckenelemente neben ihrer wärmedämmenden Funktion als Massivabsorber zur Wärmebereitstellung. Die nachfolgende Abbildung 3 gibt einen schematischen Überblick über die Komponenten und deren Verschaltung. Hierbei wird deutlich, dass die Wärmepumpe Wärme aus zwei verschiedenen Quelle beziehen kann: dem Erdreichspeicher und dem Massivabsorber. Dem Solarkollektor stehen drei verschiedene Wärmesenken zur Verfügung: die multifunktionalen Bauteile, der Wasserspeicher und der Erdreichspeicher. Die Heizlast kann sowohl mittels der aktiven Bodenplatte, als auch der multifunktionalen Wandbauteile gedeckt werden (Caspari, Pahn, 2017).

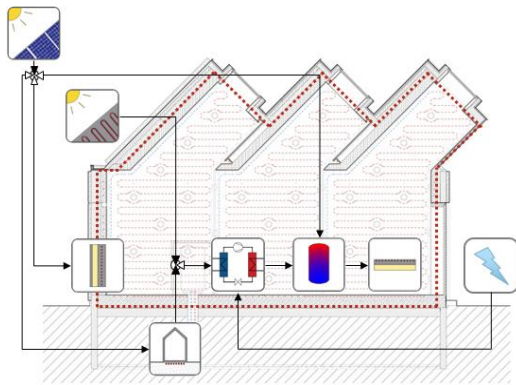


Abbildung 3: Verschaltung der TGA-Komponenten im Großdemonstrator Smallhouse IV.

Die Zielsetzung des Forschungsprojektes „Smallhouse IV“ ist ein solarer Deckungsgrad von 50 % durch die Wärmespeicherung in der Gebäudestruktur.

SIMULATION

Die thermische Effizienz des Großdemonstrators wird anhand einer dynamischen Simulation bewertet. Hierzu wird in Trnsys eine Gebäudesimulation erstellt, die eine dynamische Berech-

nung unter variablen Randbedingungen erlaubt. Im Folgenden wird das Gebäudeenergiekonzept des Großdemonstrators (Konzept 1) mit einem Konzept bestehende aus einem Wasserspeicher und einer Fußbodenheizung (Konzept 2) verglichen. Die Randbedingungen wie Wetter, Gebäudestruktur und Anlagentechnik sind gleich und entsprechen der obigen Beschreibung. Gegenstand dieser Untersuchung ist die Wirkungsweise der multifunktionalen Bauteile. Um die Wärmespeicherung der Bauteile zu separieren, wird in dieser Simulation der Erdreichspeicher sowie der Massivabsorber nicht betrachtet.

In Konzept 1 stehen der Solarthermieanlage die kerntemperierten Außenwände und ein kleiner 100 l Wasserspeicher zur Verfügung. Die Außenwände werden hierbei ausschließlich mittels der Solarthermieanlage erwärmt. Das Nachheizen des Raumes erfolgt über die Bodenplatte. In Konzept 2 steht als Wärmesenke lediglich ein großer Wasserspeicher zur Verfügung. Die gesamte Raumtemperierung findet über die Bodenplatte statt. Im Folgenden werden zwei Szenarien untersucht. In Szenario 1 soll die äquivalente Wasserspeichergröße der multifunktionalen Außenwände des Großdemonstrators ermittelt werden. Hiermit soll bestimmt werden, welche Wasserspeichergröße in Konzept 2 erforderlich ist, um dieselbe Effizienz wie in Konzept 1 aufzuweisen. Das Kriterium der Effizienz ist hierbei der Strombedarf der Wärmepumpe, welcher die Betriebskosten des Systems widerspiegelt. In Szenario 2 soll die Auswirkung eines großen Wasserspeichers auf das Gebäudeenergiekonzept des Smallhouse IV untersucht werden. Die tägliche Wärmespeicherung der Außenwände wird hierbei um eine saisonale Wärmespeicherung mittels Wasserspeicher erweitert.

Szenario 1

Die Simulation von Konzept 1 zeigt, dass bei einer Wärmespeicherung in den kerntemperierten Wandbauteilen und einem 100 l Wasserspeicher eine elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe von 1,28 MWh/a erforderlich ist. Zur Bestimmung der äquivalenten Wasserspeichergröße wird die Größe des Wasserspeichers von Konzept 2 so lange gesteigert, bis beide Konzepte dieselbe elektrische Leistungsaufnahme aufweisen. Die Untersuchung zeigt, dass Konzept 2 hierfür ein Wasserspeichervo-

lumen von 2.000 l benötigt. Abbildung 4 und 5 zeigen die bilanzierten Energiemengen der Konzepte.

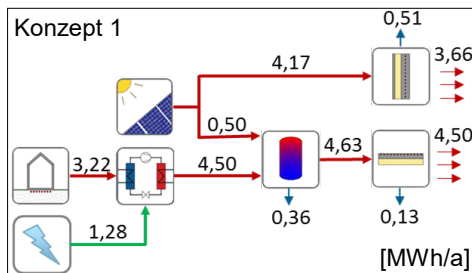


Abbildung 4: Bilanzierte Energiemengen Konzept 1

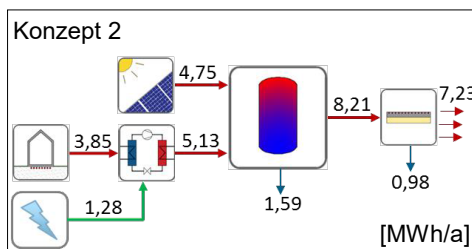


Abbildung 5: Bilanzierte Energiemengen Konzept 2

Beide Konzepte weisen in diesem Szenario denselben Stromverbrauch auf. Die Wärmebereitstellung durch die Solarthermieanlage ist in beiden Konzepten in etwa gleich. Im Gegensatz zu einem Wasserspeicher werden die aktivierten Außenwände nur in der Heizperiode zur Speicherung herangezogen. Der minimale Wasserspeicher von 100 l übernimmt hierbei keine Speicherfunktion und dient lediglich als hydraulische Weiche. Konzept 1 hat somit kein Langzeitspeicherpotenzial für sommerliche Wärme. Der 2.000 l Wasserspeicher in Konzept 2 wird ganzjährig zur Wärmespeicherung herangezogen. Hieraus resultieren allerdings große Wärmeverluste. Tabelle 3 zeigt die bilanzierten Wärmemengen beider Konzepte aufgeteilt in Heiz- und Kühlperiode.

Tabelle 3: Wärmefluss von der Solarthermie in die Wärmespeicher aufgeteilt nach Heiz- und Kühlperiode

Wärmefluss	Konzept	Zeitraum	Energie-menge
Solarthermie in Bauteile	1	Heizperiode	4,17 MWh/a
		Kühlperiode	0,00 MWh/a
Solarthermie in Wasserspeicher		Heizperiode	0,26 MWh/a
		Kühlperiode	0,24 MWh/a
Solarthermie in Wasserspeicher	2	Heizperiode	3,62 MWh/a
		Kühlperiode	1,13 MWh/a

Hieraus wird ersichtlich, dass Konzept 1 durch die Wärmespeicherung in den kerntemperierten Wandbauteilen mehr solare Wärme in der

Heizperiode aufnehmen kann als Konzept 2. Dieses Defizit muss von der Wärmepumpe ausgeglichen werden, was zu einer erhöhten Wärmebereitstellung der Wärmepumpe in Konzept 2 führt. Trotzdem ist die elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe in beiden Systemen gleich. Hieraus folgt, dass die Jahresarbeitszahl (JAZ) der Wärmepumpe in Konzept 2 höher ist als in Konzept 1 (JAZ Konzept 1: 3,5; JAZ Konzept 2: 4,0). Bei einer genauen Analyse der Betriebszeiten und der Taktraten der Wärmepumpen zeigt sich, dass zwar die Laufzeiten der Wärmepumpe in beiden Konzepten annähernd gleich sind, aber Konzept 1 eine fast dreimal höhere Wärmepumpen-Taktrate aufweist. Da beim Einschalten der Wärmepumpe zuerst das Wärmepumpenaggregat aufgeheizt sowie die Druckdifferenz zwischen Verdampfer und Kondensator aufgebaut werden muss, führt dies zu einer anfänglichen Leistungsminderung. Dieser Anlaufeffekt wird in der Simulation mitberücksichtigt (Wetter et. al., 1996) und führt analog zu der geringen JAZ in Konzept 1. Die geringere JAZ von Konzept 1 ist somit dem kleinen Wasserspeicher geschuldet, da hier die Wärmepumpe Wärme bedarfsgerecht bereitstellen muss. Dieses Problem kann mit einer Erhöhung des Wasserspeichervolumens oder einer angepassten Steuerung gelöst werden.

Zeitliche Auflösung von Szenario 1

Die in dem obigen Abschnitt dargestellten Ergebnisse zeigen Jahresbilanzen. Zur detaillierten Analyse des Systemverhaltens werden die Wärmeströme aus diesem Szenario zeitlich aufgelöst, sodass für jeden Monat der Heizperiode repräsentative Tagesganglinien entstehen. Auf diese Weise ist es möglich, die Auswirkung der unterschiedlichen Speicher auf das Gesamtkonzept zeitabhängig darzustellen. Hierzu wird der Wärmestrom jeder Tagesstunde eines Monats gemittelt. In Abbildung 7 ist der über den März gemittelte Tagesgang von Wärmeerzeugung und -abgabe der beiden Konzepte dargestellt. Die Flächen gelb und grau stellen den Wärmeeintrag aus den kerntemperierten Wandbauteilen und der Bodenplatte dar, welche in Summe der Heizlast entspricht. Die in orange bzw. blau dargestellten Linien zeigen die Summe der Wärmeerzeugungen und die Wärmeerzeugung durch die Wärmepumpe. Die Differenz dieser beiden Linien bildet somit den solaren Eintrag des Solarkollektors.

Die in den Wärmespeichern eingespeicherte Wärme entspricht der nicht-schraffierten Fläche der Solarthermie (①). Die horizontal schraffierte Fläche entspricht der solaren Wärme, welche direkt vom System genutzt wird (②). Das Entladen der solaren Wärme aus den Wärmespeichern ist vertikal schraffiert (③). Die Zusatzwärme zur Deckung des Heizwärmebedarfs, die durch die Wärmepumpe bereitgestellt wird, ist diagonal schraffiert (④).

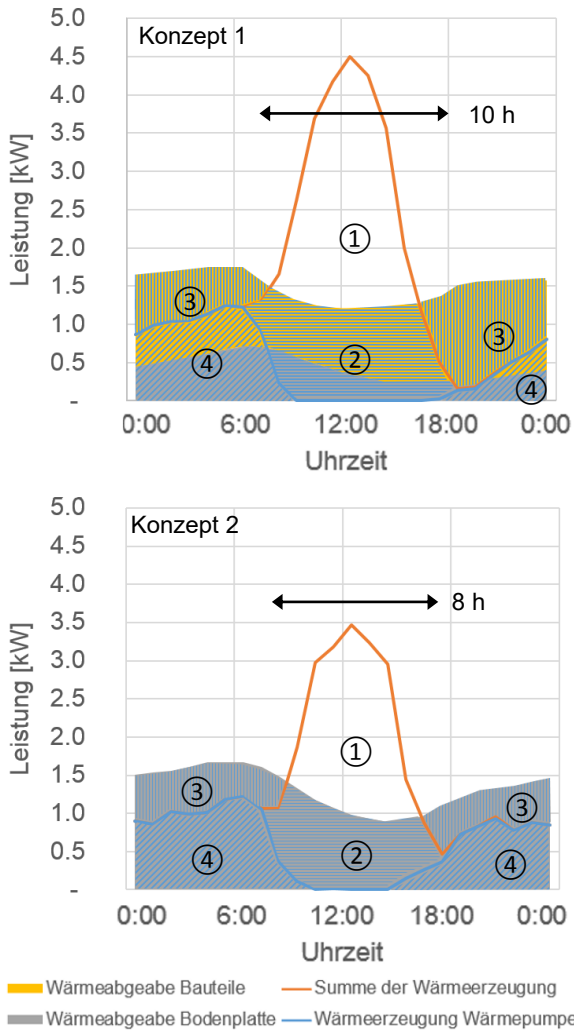


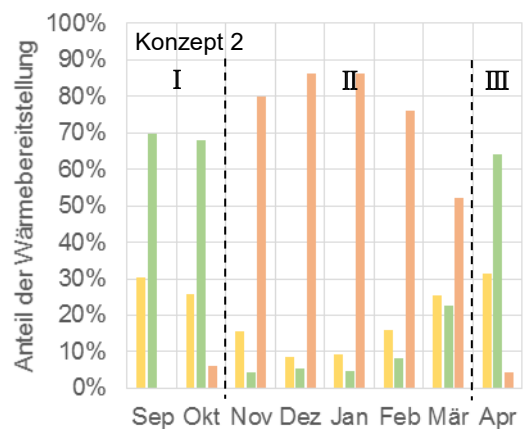
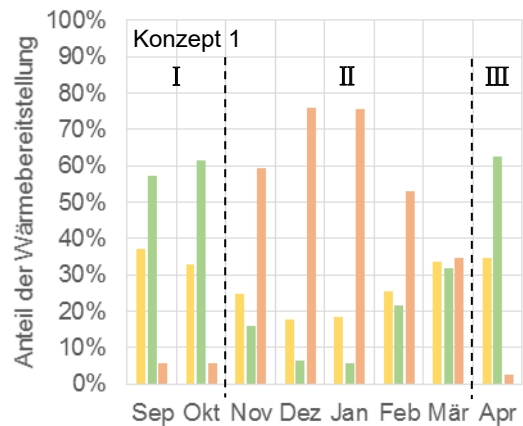
Abbildung 7: Gemittelter Tagesverlauf der Wärmeabgabe und -erzeugung im März. Oben Konzept 1, unten Konzept 2.

Hierbei zeigt sich, dass in Konzept 1 im März mehr Wärme aus der Solarthermieanlage gewonnen und genutzt werden kann, als in Konzept 2. Dies führt zu einer entsprechenden Reduzierung der Wärmebereitstellung durch die Wärmepumpe. Dieser Effekt spiegelt sich auch im ganzjährigen solaren Deckungsgrad der beiden Konzepte wieder: Konzept 1: 53 % und Konzept 2: 44 % solarer Deckungsgrad.

Das größere Aufnahmevermögen von solarer Wärme in Konzept 1 ist dem niederexergeti-

chem Speicherverhalten der kerntemperierten Wandbauteile geschuldet. Durch das geringere Temperaturniveau in den Außenwänden können hier schon geringe Temperaturen aus der Solarthermieanlage eingebracht und genutzt werden. Dies zeigt auch die solare Beladezeit der beiden Konzepte. Konzept 1 nimmt im März solare Wärme von ca. 8 bis 18 Uhr und Konzept 2 von ca. 9 bis 17 Uhr auf.

In Abbildung 8 werden die Anteile der Wärmebereitstellung durch direkte solare Nutzung (②), Speicher entladen (③), und Zuheizen (④) für jeden Monat der Heizperiode dargestellt. Diese Anteile beziehen sich auf die Monatssumme der Wärmebereitstellung des jeweiligen Konzepts. Wie bereits beschrieben, bezieht sich der Bereich „Speicher entladen“ in Konzept 1 auf die Wärmebereitstellung infolge der der kerntemperierten Wandbauteile und den 100 l Wasserspeicher und in Konzept 2 auf die Wärmebereitstellung des 2.000 l Wasserspeichers.



■ Direktes Nutzen solarer Wärme ■ Speicher entladen ■ Zuheizen

Abbildung 8: Anteile der Wärmebereitstellung in der Heizperiode. Oben Konzept 1, unten Konzept 2.

Die Gegenüberstellung der zeitlichen Auflösung der Heizperiode in Abbildung 8 zeigt, dass der Betrachtungszeitraum in jeweils drei Segmente unterteilt werden kann: I Übergangszeit nach dem Sommer, II Kernzeit und III Übergangszeit vor dem Sommer. Diese drei Segmente zeigen in beiden Konzepten eine signifikante Änderung der Wärmebereitstellung untereinander. Der Heizwärmebedarf während der Übergangszeit in Segment I kann durch im Sommer gewonnene Wärme gedeckt werden. Infolge des Langzeitspeicherpotenzials des großen 2.000 l Wasserspeichers kann Konzept 2 sommerliche Wärme aus dem Speicher entladen. Hierdurch muss erst ein Monat später mittels der Wärmepumpe nachgeheizt werden. Da die kerntemperierten Wandbauteile sowohl Wärmespeicher wie auch Wärmeübertrager sind, werden diese während der Sommermonate nicht beladen und könne somit nicht für einen Wärmeübertrag vom Sommer in die Übergangsjahreszeit beitragen. Die Wärmespeicherkapazität des kleinen Wasserspeichers ist hierfür nicht ausreichend. Im Segment II können nur noch tägliche solare Erträge zur direkten Nutzung und Speicherung genutzt werden. Durch das höhere Aufnahmevermögen der kerntemperierten Außenwände steht in Konzept 1 mehr Wärme zur direkten Nutzung sowie zur Speicherung zur Verfügung. Analog hierzu muss in Konzept 1 weniger Wärme durch die Wärmepumpe nachgeheizt werden wie in Konzept 2. Die Wirkungsweise der Wärmebereitstellung von Konzept 1 und 2 sind in Segment III annähernd gleich.

Die zeitliche Auflösung beider Konzepte zeigt, dass die Wärmespeicherung in aktivierten Außenbauteilen ganzjährig zu einem höheren solaren Aufnahmevermögen führt. Hierdurch ist mehr solare Wärme direkt nutzbar, was analog zu einer Steigerung des solaren Deckungsgrades und einer Reduzierung des Primärenergiebedarfs führt. Während der Übergangszeit nach dem Sommer (I) kann Konzept 2, durch das Langzeitspeicherpotenzial des großen 2.000 l Wasserspeicher, solare Wärme aus den Sommermonaten in die Heizperiode übertragen. Diese Möglichkeit ist mit der Wärmespeicherung in den aktivierten Außenbauteilen aus Konzept 1 nicht möglich. Während der Kernzeit der Heizperiode (II) können die aktivierten Außenbauteile das geringe solare Angebot effizienter nutzen als der große 2.000 l Wasserspeicher und somit das Nachheizen reduzieren.

Szenario 2

Zur Steigerung des ganzjährigen Wärmespeicherpotenzials soll Konzept 1 um einen Langzeitwärmespeicher erweitert werden. Hierdurch soll mittels sommerlicher Wärme das Nachheizen in der Übergangszeit nach dem Sommer (I) reduziert werden. Daher wird in Szenario 2 das Wasserspeichervolumen von Konzept 1 ebenfalls auf 2.000 l erhöht. Abbildung 6 zeigt die Bilanzierung der Energiemengen von Konzept 1.

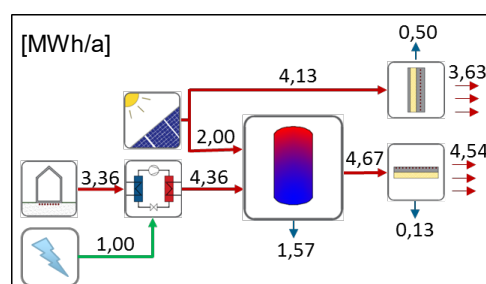


Abbildung 6: Bilanzierte Energiemengen Konzept 1, Kollektor: 15 m², Wasserspeicher: 2.000 l

Die Ergebnisse zeigen, dass durch den Einsatz eines großen Wasserspeichers zur Langzeitwärmespeicherung der elektrische Bezug der Wärmepumpe um rund 20 % reduziert wird. Die thermische Bereitstellung der Wärmepumpe verändert sich hingegen kaum. Die Solarthermie bringt in den 2.000 l Wasserspeicher viermal so viel Wärme ein wie in den 100 l Wasserspeicher. Gleichzeitig steigen auch die thermischen Verluste auf ca. das Vierfache an. Tabelle 4 zeigt die bilanzierten Wärmemengen von der Solarthermie in den Wasserspeicher, aufgeteilt in Heiz- und Kühlperiode.

Tabelle 4: Aufteilung der erzeugten Wärme Konzept 1, Kollektor: 15 m², Wasserspeicher: 2.000 l

Wärmefluss	Zeitraum	Energie-menge	Anteil Verluste
Solarthermie in Wasserspeicher	Heizperiode	0,93 MWh/a	75%
	Kühlperiode	1,07 MWh/a	81%

Hieraus wird deutlich, dass der 2.000 l Wasserspeicher in Konzept 1 kaum einen Beitrag zu einer Langzeitwärmespeicherung leistet. Die in den Wasserspeicher eingebrachte solare Wärme führt größtenteils zu Wärmeverlusten. Daher ist die Wärmemenge vom Wasserspeicher an die Bodenplatte in beiden Szenarien in etwa gleich. Das wesentlich größere Wasserspeichervolumen kann somit nicht effizient genutzt werden. Die Reduzierung der elektrischen Leistungsaufnahme der Wärmepumpe ist somit

lediglich auf die Reduzierung des Taktbetriebs der Wärmepumpe und nicht auf ein erhöhtes Speicherpotenzial zurückzuführen.

FAZIT UND AUSBLICK

Die Untersuchungen zeigen, dass der grundlegende Gedanke einer thermisch nutzbaren Gebäudestruktur funktioniert und Wasserspeicher hierdurch minimiert werden können. So kann in den Simulationen gezeigt werden, dass die thermisch aktivierten Außenwände des Großdemonstrators Smallhouse IV einem Speichervermögen eines 2.000 l Wasserspeichers entsprechen. Diese Wasserspeichergröße führt zu dem gleichen elektrischen Stromverbrauch der Wärmepumpe wie die Wärmespeicherung in den kerntemperierten Außenwänden. Bei gleichem Stromverbrauch führt das niederexergetische Aufnahmevermögen der Außenwände zu einem vermehrten Nutzen von solarer Wärme. Hieraus folgt für Konzept 1 ein solarer Deckungsgrad von 53 % und in Konzept 2 von 44 %. In der zeitlichen Auflösung zeigt sich, dass die Außenwände den Anteil „Direktes Nutzen solarer Wärme“ sowie „Speicher entladen“ gegenüber einem 2.000 l Wasserspeicher steigern. Dahingegen ist es mit einem großen Wasserspeicher möglich, den Taktbetrieb der Wärmepumpe zu reduzieren und einen Wärmeübertrag vom Sommer in die Übergangsjahreszeit zu ermöglichen.

Neben der Art und Beschaffenheit der multifunktionalen Bauteile ist das Regelungs- und Steuerungskonzept von entscheidender Bedeutung. Durch den Einsatz einer ungeeigneten Steuerung kann die Gebäudemasse nicht vollständig genutzt und/oder eine Unbehaglichkeit im Innenraum erzeugt werden. Diese Effekte sollen mittels des Großdemonstrators unter realen Bedingungen in Zukunft erforscht werden. Das Smallhouse IV ist hierbei so konstruiert, dass durch eine austauschbare Wand weitere multifunktionale Bauteile im Realbetrieb getestet werden können. So sollen verschiedene Bauteilaufbauten und dessen Wechselwirkung mit der Anlagentechnik untersucht werden.



Abbildung 8: Smallhouse IV im Rohbauzustand 2017

DANKSAGUNG

Dieses Projekt wird von der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert (FKZ: SWD-10.08.18.7-15.51). Die Autoren bedanken sich bei allen Partnern und bei dem Fördermitelgeber für die Unterstützung dieses Projekts.

LITERATUR

- Kaltschmitt, M., Streicher, W., Wiese A. 2009. Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte, 5. Auflage, Springer Vieweg Verlag.
- Caspari, C., Pahn M. 2016. Fertigteile zur multifunktionalen thermischen Nutzung, BauSIM 2016, Dresden, Deutschland.
- Caspari, C., Krumke, S. O., Pahn M. 2015. Entwicklung multifunktionaler Bauteile mit Hilfe mathematischer Optimierungsmethoden, Bauphysiktag 2015, Kaiserslautern, Deutschland.
- Kempkes, C., Schalk, K., Felsmann, C., Oschatz, B., Günther, M. 2009. Energetische Bewertung thermisch aktivierter Bauteile. Fraunhofer IRB Verlag.
- Caspari, C., Pahn M. 2017. Multifunktionale Betonfertigteile – Großdemonstrator „Smallhouse IV“, Bauphysiktag 2017, Kaiserslautern, Deutschland.
- Richard, H., Haller, M. 2007. Task 32 - The Reference Heating System, the Template Solar System: A Report of IEA SHC - Task 32, 2007.
- Wetter, M., Afjei, T., 1996. Trnsys Type 401, Kompressionswärmepumpen inklusive Frost- und Taktverlusten. Modellbeschreibung und Implementation in Trnsys. 1996.

EXPLORING THE POTENTIAL OF THE DYNAMIC FAÇADE: SIMULATING DAYLIGHT AND ENERGY PERFORMANCE OF COMPLEX FENESTRATION SYSTEMS

A. Ganji Kheybari¹ and S. Hoffmann¹

¹ Faculty of civil engineering, TU Kaiserslautern, Kaiserslautern, Germany

ABSTRACT

In order to find an effective control strategy for dynamic facades with complex fenestration systems, this paper proposes a simulation-based framework that explores different scenarios for the most appropriate window states. For every performance parameter, certain criteria must be fulfilled and by using a weighted penalty function method at every timestep, the unpleasant or unacceptable states are rejected. Consequently, the scenario containing the top-ranked window states will be used as a signal to control the dynamic facade.

Finally, this paper investigates the influence of the proposed control method by comparing the simulated annual results with the results of some conventional control strategies.

INTRODUCTION

Dynamic facades with adjustable optical and/or thermal properties are a result of being able to interact dynamically with environmental conditions to improve building performance (Loonen 2010). Previous studies showed that manually controlled systems (such as venetian blinds) are mostly adjusted improperly and have only been used to avoid disturbing conditions once a day (Inkarojrit, 2005; Bordass et al. 2001). Automatically-operated systems can play an important role in overcoming this problem and significantly save energy and reduce peak demand (Bakker et al. 2014; Lee, E. et al. 1998). However, the satisfaction of the occupants can highly be influenced due to the high-frequency adjustment on a partially sunny day. In these conditions occupants often dislike the automatic systems and try to find ways for intervention and disabling them.

The complexity of the relationship between the state of the façade and energy requirements for cooling, heating, and electric lighting (Lee, E. et al. 2015) shows that only a multi-objective (considering all aspects of visual and thermal comfort and energy saving) control strategy can be effective.

Finding an effective control strategy based on simulations requires more investigating that combines dynamic building energy and daylight simulations and uses Bidirectional Scattering Distribution Functions (BSDF). TRNSYS18 (Hiller, M., Schöttl, P. 2014; McDowell et al. 2017) and Radiance (Ward, G., Shakespeare R. 2004; Ward, G. et al. 2011) are currently able to consider detailed optical and thermal properties of complex fenestration systems. This facilitates modeling the behavior of the façade components reliably in order to improve the exploration procedure for finding the required window state at every timestep.

METHODOLOGY

This study proposes a simulation-based framework to explore different scenarios for window states over the course of a year for a window with the motorized venetian blind system. The main concern in this method is finding the most appropriate window state to reduce energy demand and provide the desired indoor thermal and visual comfort at the same time.

The control strategy can be driven by exploring the pre-calculated simulated results of all the possible states over a year. At every timestep, the hourly results of all possible states were

compared to evaluate the performance of visual comfort, thermal comfort, and energy.

For every aspect, certain criteria were checked by using a weighted penalty function method. Then, ranking the most appropriate states of the facade at every timestep is made possible by finding the states with minimum penalties (we call them “top-ranked scenarios”).

The final output (“final scenario”) will be generated as an annual profile of the most appropriate window states which have the best-predicted performance. This generated profile can be used later to control the dynamic facade and improve indoor conditions as well as reduce the energy demand.

MODEL DESCRIPTION

The model represents an office room with a south oriented fully glazed window (window area of 14 m², 90% WWR) divided into three different zones (top, middle, bottom). The room has the following dimensions: 6 m long, 5 m wide, and 3.3 m high (30 m² floor area). The layout of workplaces was defined for four seated occupants executing common office tasks (Figure 1).

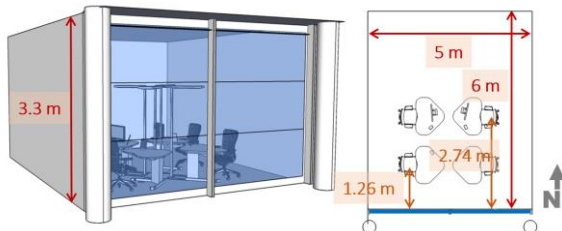


Figure 1: The 3D geometry of the office room and the plan layout

The same geometry was used in lighting and thermal simulation (with some simplifications and adjustments). The weather data (EPW file) of Mannheim (49.4875° N, 8.4660° E) was used for thermal simulation as well as for lighting simulation in this study.

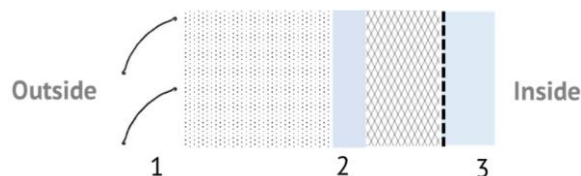


Figure 2: Glazing system configuration in LBNL Window software

The glazing system is a double window combined of clear float glass (7.8 mm, layer 2),

a 16 mm gap (90% Argon), and a coated layer (12.1mm, layer 3) with the U-value of 1.27 W/m²K and a g-value of 0.62 (Figure 2).

The exterior shading system is a motorized venetian blind with curved aluminum slats (slat thickness: 0.6 mm, slat width: 80 mm, spacing: 70 mm, and rise: 10 mm).



Figure 3: Venetian blinds with different tilting angles

Table 1: Venetian blinds, slats properties (Warema GmbH)

Color	Solar Reflection
RAL_9006	0.58

Generally, blinds can be continuously adjusted from 0° (horizontal) to 82° (fully closed), and be pulled up or down at any height. However, in this study, we assumed the discrete possible range of tilting angle outward (only 4 states: 0°, 30°, 45°, and 80°) and three levels of height. This assumption (together with the fact that in this study hourly results are used to drive a control scenario) avoids the problem of high-frequency adjustment in an automated blind system which can be annoying for the occupants on a partially sunny day.

The venetian blind system without any variable slat angle option on different heights was considered. Therefore, considering the 5 states of the blinds (1 extra state for fully pulled up and open) and 3 zones of the window, the total number of possible combinations ends up being 13 different cases for the window.

Table 2: States of venetian blind systems, center-of-glazing properties, and shading configuration IDs

States of the venetian blind	SHGC	T sol	T vis	ID
Pulled up, Open	0.62	0.44	0.62	0
Horizontal (0°)	0.54	0.35	0.49	1
Tilted outward (30°)	0.31	0.18	0.25	2
Tilted outward (45°)	0.19	0.09	0.13	3

Closed (80°)	0.07	0.00	0.01	4
--------------	------	------	------	---

Simulation setup:

The 3D geometry of the room's surfaces, overhang, and the columns are defined in building file (.b18) as one thermal zone. The construction properties are shown in Figure 4 and Table 3.

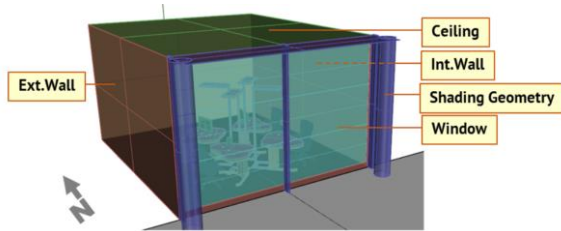


Figure 4: The 3D geometry and the surfaces in the thermal zone

Table 3: Construction properties of the thermal zone

Constr.	Total thickness [m]	U-Value [W/m ² .K]	Category Position
Floor	0.42	0.22	Boundary
Ceiling	0.31	0.58	Boundary
Internal Wall	0.13	0.32	Boundary East and North
External Wall	0.41	0.19	External South and West

The internal gains for four occupants are based on the office occupancy schedule (8:00 to 18:00 for Monday to Friday, and Off for Saturday and Sunday).

Table 4: Internal gains

Internal Gains	Nr.
People, Seated light work	4
Computer	4
Electric lighting	4

For electric lighting, 4 LED luminaires in 2 different control groups (G1 close to the window, G2 far from the window) with 200 W of power (50 W for each luminaire) are specified. The lighting control is a native daylight dependent control in TRNSYS which has a continuous dimming function and on/off (Type 4) with the 1st ill setpoint: 500 lx and 2nd ill setpoint: 250 lx. For every TRNSYS model corresponding annual illuminance values (from daylight simulation with Radiance) are used as inputs. The infiltration of the building assumed 0.1 ACH and 1.45 ACH and was applied for hygienic ventilation of 4 occupants during working hours. To compare the impact of the facade system on energy demand an ideal heating and cooling system are applied with a cooling setpoint temperature of

27°C and a heating setpoint temperature of 23°C.

Modeling the complex fenestration system

The detailed geometry of the aluminum slats with 0.58 reflectivity for 4 different cases (4 tilting angles) was modeled in Rhino software to be used for generating BSDF data. By using the genBSDF tool a full Klems matrix (with 145 patches) can be generated for each shading geometry. These BSDFs should be combined with the double glazing window in LBNL Window software (version 7.6) as a shading layer. The final output ("Energy Plus BSDF IDF File report" xml file) which contains complete optical and thermal properties of glazing system can be used for daylight and thermal simulation.

Simulation-based control strategies

This paper proposes a control strategy for operating the dynamic facade over a year based on a ranking algorithm.

In the first step, all the possible states of the facade were simulated (using the Radiance three-phase method) in order to get the hourly vertical (Ev) and horizontal illuminance (Eh) values and generate some HDR images. Moreover, the thermal comfort (local PMV) and energy demand values were also pre-calculated by parametric runs of TRNSYS (version 18) and using the detailed window feature and variable shading configuration IDs (with room setpoint temperatures of 23°C - 27°C).

Ranking procedure

In the second step, in order to evaluate the performance of all possible window combinations at every timestep and select the most appropriate cases, a weighted penalty function was defined. When the required criteria in the room are not achieved the unacceptable cases are rejected by applying different penalties for visual discomfort, thermal discomfort, and energy demand (P_{vc} , P_{tc} , and P_{en}). Some static coefficients (W_1 , W_2 , and W_3) have been specified separately for each component (Figure 5). Therefore, different priorities for building operation (or during design) can be assigned by setting these coefficients properly.



$$Penalty = W_1 \times P_{vc} + W_2 \times P_{tc} + W_3 \times P_{en}$$

Figure 5: The weighted penalty function with different coefficients for visual discomfort, thermal discomfort, and energy demand

By using the ranking algorithm for every timestep (from 0 to 8760, as depicted in Figure 6, all hourly annual results were analysed to evaluate the visual comfort, thermal comfort, and energy performance for all the possible facade combinations. For visual comfort daylight glare probability (DGP), useful daylight illuminance at every workplace, and the electric lighting are taken into account. In addition, for thermal comfort the Predicted Mean Vote (PMV) index and for energy performance, the energy demand (Q_sensible) are considered.

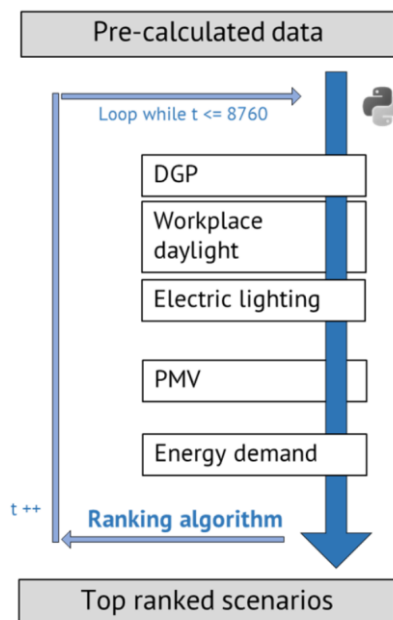


Figure 6: Ranking procedure to generate the top-ranked scenarios

By ranking the most appropriate states of the facade at every timestep, it is possible to find the states with minimum penalties. The final outputs can be generated as annual profiles (scenarios for the hourly window states on top, middle, and bottom zones, from 1 to 8760) for some of the most appropriate scenarios which have the best-predicted performance (top-ranked scenarios).

Re-ranking procedure

In order to consider the impact of selecting one window state on energy demand and thermal condition of the future timesteps (thermal inertia impact) in ranking procedure, the selected top-ranked scenarios (containing the window states

with minimum total penalties) should be re-ranked in some sequential TRNSYS simulations.

Finally, by running these simulations for a complete year, the final scenario will be achieved (a profile of the most performative window states over a year).

Parameters for performance evaluation

As mentioned, to apply the penalty function and rank the window states, some parameters and criteria were defined. For visual comfort, since there is no dependency from the past timestep to the present, it is sufficient to check the parametric simulated data for all combinations. However, for thermal comfort and energy demand, thermal inertia should be considered carefully.

Finally, each component of the penalty gets normalized and summed up to calculate the total penalty for each window combination at every timestep. This total penalty is the main parameter considered during the ranking and re-ranking procedures.

Daylight glare probability (DGP)

The daylight glare probability is a metric for discomfort glare caused by daylight (Wienold & Christoffersen, 2006). To date, the common tools for evaluating the annual glare (e.g. DAYSIM) are not able to use BSDF data for annual simulation (Reinhardt 2016). In this study the enhanced method was used to predict the glare probability. By using Eq.1, DGPs can be calculated when direct radiation does not hit the observer's eye based on the vertical eye illuminance (E_v) simulated in the Radiance three-phase method (McNeil, A. et al 2013). Wienold has shown that the vertical illuminance (E_v) at eye level has a very good correlation to the DGP for these situations (Wienold et al. 2006).

$$DGPs = 6.22 \times 10^{-5} \times E_v + 0.184$$

(Eq.1; Wienold et al. 2006)

When the sun is visible to the user's eye, rendering a fish eye HDR image based on the view direction of the occupant and using Evalglare tool (Wienold, 2004) to calculate the DGP value is necessary.

The visible sun hours were calculated in advance for every user's view direction based on the sun's position, window size, and considering

shading geometries. Then the HDR images were simulated in Radiance (using the exact geometry of the venetian blinds) for those specific hours over the year to be processed for the glare evaluation in Evalglare.

The final annual results were generated by combining the E_v driven DGPs and the Evalglare results (based on the simulated HDR images in Radiance) for every window combination. For this study, we assumed 0.38 as the upper threshold of DGPs, and any case with DGPs value above the threshold gets a penalty.

Available daylight workplace illuminance

Annual horizontal illuminance (E_h) values (on 12 sensor points at 75 cm height) were calculated using BSDF data in the Radiance three-phase method. Based on the concept of Useful Daylight Illuminance (UDI) (Nabil & Mardaljevic 2005), this paper assumed useful daylighting between 300 [lx] and 3000 [lx] for horizontal workplace illumination (E_h). Since there is significant potential for glare or overheating for the values over the upper threshold, a penalty is applied for the cases outside the defined range.

Electric lighting

Through the combination of daylight and building energy simulation, it is possible to have a good prediction of electric lighting demand and its influence on the internal gains and energy demand in a building. In this study, by using the daylight dependent lighting control in TRNSYS, the pre-calculated values (E_h) were used to control the artificial lighting. The lighting is defined in two different groups and the average E_h value for each group driving the electric lighting demand during occupancy time. In order to increase daylight availability in the building (and reduce the use of electric lighting as much as possible), the window case gets a penalty based on the dimming fraction value in lighting groups.

Energy demand

Energy demand (Q_{sensible} [kW]) is calculated based on the set point temperatures that have been assigned for the heating and cooling (23°C and 27°C) in the thermal zone. The acceptable room temperature is assumed to be between 23°C to 27°C, but this range can be defined in many different ways.

The condition of a window has a huge influence on the required energy by avoiding overheating when cooling is required and by harvesting solar energy when heating is necessary. This study considered the energy demand equal to zero (balanced case) as the best situation with no penalty. Therefore, for the cases with cooling demand, some bigger penalties and for the cases with heating demand some smaller penalties were applied.

Thermal comfort

Several indices were used for the estimation of thermal sensation and comfort in the built environment. Fanger's Predicted Mean Vote (PMV) (ISO 7730:2006-05; ASHRAE 2013) method has been widely used and was applied in this study to assess thermal comfort. Even though the room temperature is kept in acceptable range, the impact of the facade on the occupants' satisfaction (especially in proximity to a large window area) needs to be evaluated by a comfort index (e.g. PMV), which considers mean radiant temperature (MRT) for every specific occupant's position. For calculating PMV other parameters such as clothing (1 clo), metabolic rate (1 met), and air velocity (0.1 m/s) were defined, and relative humidity was internally calculated in TRNSYS. It is worth mentioning that the PMV index does not directly consider the solar radiation on the human body. Additionally, uniform surface temperature (which is used to calculate MRT in TRNSYS) does not provide enough details for some asymmetric environments.

We assumed that satisfying thermal condition can normally be achieved when the PMV values are between -1 and +1, therefore a penalty is applied for the cases outside the ideal range.

Simulation-based control, penalty functions (P1 and P2)

By using a different weighting coefficient in the main penalty function and setting different preferences, the results of the ranking procedure will be different. As an example, by setting the coefficient for any component to zero we can eliminate the influence on the penalty function and by using a higher weight for a parameter we can increase its impact. Visual comfort has three components, P_{dgp} for penalties due to glare, P_{ill} for penalties due to useful daylight availability, and P_{elc} for use of electric lighting. P_{tc} is

defined for penalties due to thermal discomfort and Pen is applied for penalties due to energy demand.

In this study, two different penalty functions were defined. In penalty function number one (P1), the ranking algorithm considers visual comfort by taking into account all three aspects of glare, sufficient daylight, and the use of electric lighting. Since glare can be more important in dissatisfying users, this penalty function used the weighting coefficient 2 for glare and 1 for the other aspects of visual comfort. In this function, thermal comfort and energy savings were given equal consideration to calculate the total penalty. The penalty function number 1 is shown in Equation 2.

$$P_{total} = 0.25 \times (2 \times P_{dgp} + 1 \times P_{ill} + 1 \times P_{elc}) + 1 \times P_{tc} + 1 \times P_{en} \quad (Eq.2)$$

In penalty function number two, the algorithm (only) considers glare, thermal comfort, and energy saving equally (see Equation 3).

$$P_{total} = 1 \times (1 \times P_{dgp} + 0 \times P_{ill} + 0 \times P_{elc}) + 1 \times P_{tc} + 1 \times P_{en} \quad (Eq.3)$$

CONVENTIONAL CONTROL STRATEGIES

This paper investigates the impact of using the proposed ranking algorithm based control, by comparing the annual results with other conventional control strategies.

The Baseline (NoCtrl) is the clear state of the double glazing window with the solar heat gain coefficient of $g = 0.62$ without using any sun protection device.

For radiation dependent shading control, two different methods were used. The first method (CtrlRad1) depends on one threshold; if the direct radiation on the window surface (IB_Win) is higher than 50 W/m^2 it will be closed (pulled down $+45^\circ$), while the bottom part of the window remains open. The second method (CtrlRad2) depends on smaller intervals of direct radiation (IB_Win). When radiation is higher than 50, 100, 150, and 180 W/m^2 , the shading will be closed in four different steps (pulled down 0° , $+30^\circ$, $+45^\circ$, $+80^\circ$) while the bottom part is open. The bottom part of the window was kept open in order to provide enough diffused daylight into the room, while the shading system can still protect the occupants from direct sunlight.

Another control has been considered to protect occupants against direct sun glare (CtrlDirSun). Whenever the sun is visible to one of the occupants in the room, the shading system will be closed (pulled down $+45^\circ$), otherwise it will keep open (pulled up).

RESULTS

In order to investigate the impact of the proposed control strategy, all the controls were applied to the office room model in TRNSYS over the course of a year.

Table 5: Final annual energy demand kWh/m².a

Ctrl Strategy	Q_Cool	Q_Heat	elecLight
NoCtrl (Baseline)	61.9	36.1	2.0
CtrlDirSun	53.1	43.0	4.0
CtrlRad1	34.6	44.1	2.4
CtrlRad2	33.4	44.3	2.5
Penalty function Nr. 1 (P1)	8.1	51.0	2.9
Penalty function Nr. 2 (P2)	6.6	52.1	9.3

The total annual energy demand [kWh/m².a], containing the annual cooling demand (Q cooling [kWh]) in blue, annual heating demand (Q heating [kWh]) in red, and total annual electricity demand for lighting (Q electric light [kWh]) in yellow is depicted for all 6 control strategies in Figure 7 and Table 5.

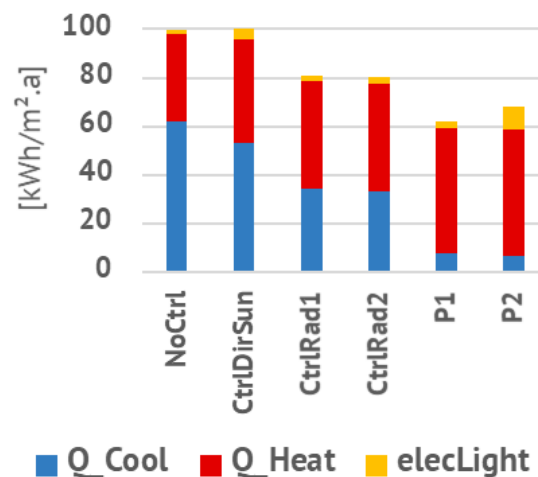


Figure 7: The annual energy demand [kWh/m².a] for all 6 control strategies

Figure 8 shows the annual thermal comfort (local PMV) for every user by depicting the percentage of occupied hours with a dissatisfying thermal condition (PMV > +1 or PMV < -1). The total number of occupied hours is 2610 in this study.

Reducing the percentage of the hours in a year with dissatisfying thermal comfort shows the

improvement in thermal condition in the room (Figure 8). Since the PMV value is related to the position of the users, the results are shown for group 1: close to the window (G1: users number 1 and 4) and group 2: far from the window (G2: users number 2 and 3) separately.

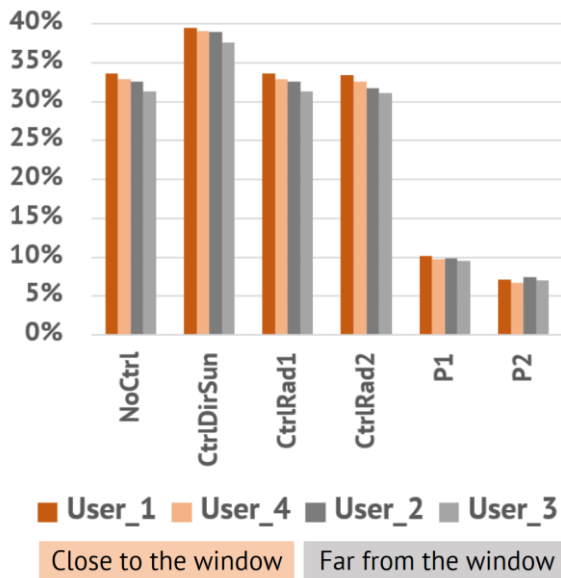


Figure 8: The percentage of occupied hours with dissatisfying thermal comfort

To assess the impact of the control strategy on improving visual comfort (avoiding glare), the total number of occupied hours with glare probability (when DGPs ≥ 0.38) was calculated for every control strategy (Figure 9).

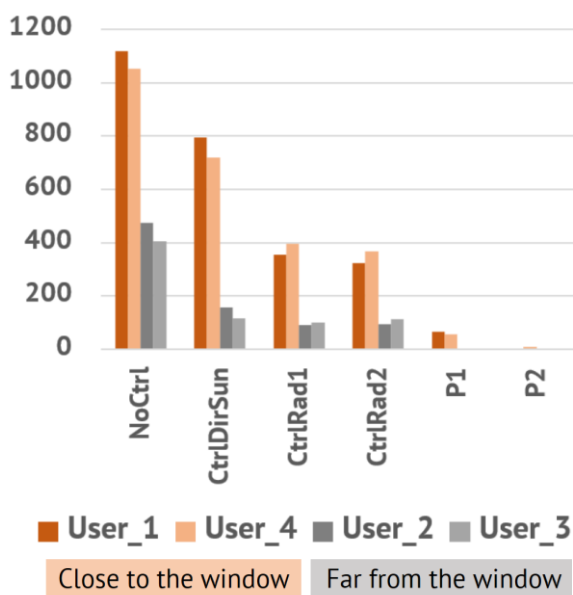


Figure 9: The total number of occupied hours with glare probability (when DGPs ≥ 0.38)

In addition to avoiding glare, providing useful daylight in the room should be considered to improve visual comfort. By calculating the total number of occupied hours with useful daylight

($300 \text{ [lx]} < \text{illuminance} < 3000 \text{ [lx]}$) for every control case it is possible to compare the impact of the different strategies on providing useful daylight (Figure 10).

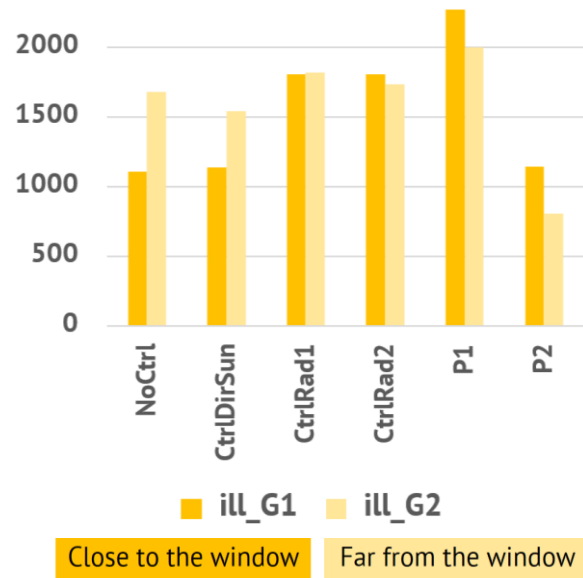


Figure 10: the total number of occupied hours with useful daylight ($300 \text{ [lx]} < \text{illuminance} < 3000 \text{ [lx]}$)

DISCUSSION

By considering the annual energy consumption of the building with no shading control (NoCtrl) as the baseline, Figure 7 shows that control of direct sun glare (CtrlDirSun) reduced the probability of overheating in the room (14%) during the winter time while it slightly increased the heating demand. Figure 7 further shows that protection against glare has an increasing impact (100%) on electric lighting demand. Both radiation dependent controls (CtrlRad1 and CtrlRad2) reduced cooling demand (44% and 46%). The second strategy (CtrlRad2) with shorter intervals showed a stronger reduction in cooling demand, at the cost of slightly increased heating demand.

Control strategies based on the penalty functions (P1 and P2) both improved the energy performance of the building by reducing cooling demand (87% and 89%), as well as electric lighting demand (relative to the other controls). Since the penalty function number 2 (P2) only focused on glare and not the other aspects of visual comfort, it has the chance to reduce cooling energy demand more than the penalty function number 1 (P1). However, because the available useful daylighting in P2 was neglected, the need for electric lighting was increased.

Figure 8 shows that by using the proposed control strategies (P1 and P2) the number of hours with PMV outside the satisfying range (between -1 and 1) was reduced. In other words, the controls P1 and P2 both improved the thermal condition of the occupants.

It is worth mentioning that the direct sun glare control (CtrlDirSun) caused greater user dissatisfaction than the no shading device case (NoCtrl), due to the lack of solar harvesting especially during the winter time, when the occupants are willing to have more solar radiation in the room.

In Figure 9 and Figure 10 one can see that both radiation dependent controls (CtrlRad1 and CtrlRad2) and control strategies based on the penalty functions (P1 and P2) were able to significantly protect the occupants from discomfort glare. However, the proposed controls (P1 and P2) avoided glare more effectively by providing more useful daylight for the users farther from the window (G2). Furthermore, it is clear that the control strategy P2 is more successful in reducing glare and less effective for providing useful daylight in the room since it was only focused on glare for providing visual comfort.

CONCLUSION

By using the proposed control strategy based on the ranking algorithm, all aspects of visual and thermal comfort as well as energy saving can be taken into account to operate the dynamic facade systems. Even the different preferences or priorities can be considered by adjusting different weighting coefficients in penalty function. In conclusion, the impact of the proposed method on improving performance is significant in a building with an automated sun protection system.

Despite the anticipated performance benefits, application of the proposed method in a real building is still limited due to the real-time changes, especially in sky condition. In this study, the ranking and the re-ranking procedure are based on hourly weather file data and real-time data (and/or prediction), which should be applied in ways that further improve the proposed method.

In this method, the computation time to simulate all the window combinations will be influenced

significantly by the number of states possible. In addition, for lighting simulation and rendering of the HDR images selection of the sufficient Radiance parameters (such as -ab, -ad, ...) is very influential. However, all pre-calculations need to be done once and the main procedure to find the most appropriate states (ranking and re-ranking) and select the final scenario can use the results many times.

ACKNOWLEDGMENT

We would like to thank our colleagues **Deepak Paramashivam** who support us for the automation code and **Raghuram Kalyanam** for simulating the HDR images in Radiance and evaluating glare in this paper.

REFERENCES

- ASHRAE (Ed.) (2013): ANSI/ASHRAE Standard 55-2013. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE
- Bakker, L. G., Hoes-van Oeffelen, E. C. M., Loonen, R. C. G. M., & Hensen, J. L. M. (2014). User satisfaction and interaction with automated dynamic façades: A pilot study. *Building and Environment*, 78, 44-52.
- Bordass, B., Cohen, R., Standeven, M., & Leaman, A. (2001). Assessing building performance in use 2: technical performance of the Probe buildings. *Building Research & Information*, 29(2), 103-113.
- Hiller, M., & Schöttl, P. (2014). Modellierung komplexer Verglasungssysteme in TRNSYS. In Proceedings of BauSIM2014, the Fifth German-Austrian IBPSA conference(pp. 387-394).
- Inkarojrit, V. (2005). Balancing comfort: occupants' control of window blinds in private offices.
- Larson, G. W., & Shakespeare, R. (2004). *Rendering with Radiance: the art and science of lighting visualization*. Booksurge LLC.
- Lee, E. S., DiBartolomeo, D. L., & Selkowitz, S. E. (1998). Thermal and daylighting performance of an automated venetian blind and lighting system in a full-scale private office. *Energy and buildings*, 29(1), 47-63.
- Lee, E. S., Gehbauer, C., Coffey, B. E., McNeil, A., Stadler, M., & Marnay, C. (2015).

Integrated control of dynamic façades and distributed energy resources for energy cost minimization in commercial buildings. *Solar Energy*, 122, 1384-1397.

Loonen, R. C. G. M. (2010). Overview of 100 climate adaptive building shells.

McDowell, T. P., Bradley, D. E., Hiller, M., Lam, J., Merk, J., & Keilholz, W. TRNSYS 18: The Continued Evolution of the Software.

McDowell, T. P., Bradley, D. E., Hiller, M., Lam, J., Merk, J., & Keilholz, W. (2017) Proceedings of the 15th IBPSA Conference.

McNeil, Andrew, and E. S. Lee. "A validation of the Radiance three-phase simulation method for modeling annual daylight performance of optically complex fenestration systems." *Journal of Building Performance Simulation* 6.1 (2013): 24-37.

Nabil, A., & Mardaljevic, J. (2005). Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings. *Lighting Research & Technology*, 37(1), 41-57.

Reinhart C. F. 2016, Daysim (V4.0). <http://daysim.ning.com/>

Ward, G., Mistrick, R., Lee, E. S., McNeil, A., & Jonsson, J. (2011). Simulating the daylight performance of complex fenestration systems using bidirectional scattering distribution functions within radiance. *Leukos*, 7(4), 241-261.

Warema. Available online at https://www.warema.com/en/Planning/Architects/_dokumente/strahlungsphysikalische-daten_raffstoren.pdf, checked on 5/5/2018.

Wienold, J. (2004). Evalglare—A new RADIANCE-based tool to evaluate daylight glare in office spaces. In 3rd International RADIANCE workshop 2004.

Wienold, J. and Christoffersen, J., (2005). Towards a New Daylight Glare Rating, LuxEuropa, Berlin, D, pp. 157-161.

THERMAL ENERGY SIMULATION OF BUILDINGS BASED ON THE CITYGML ENERGY APPLICATION DOMAIN EXTENSION

A. Geiger¹, J. Benner¹, K.-H. Häfele¹ and V. Hagenmeyer¹

¹ Institute for Automation and Applied Informatics, Karlsruhe Institute for Technology, Karlsruhe, Germany

ABSTRACT

The present paper describes a semi-automatic process, in which a typical CityGML 3D building model is enriched with explicit thermal energy related information and stored in a CityGML Application Domain Extension (ADE). Special emphasis is given to the discussion of suitability of existing CityGML models for city-wide energy simulations. Possible conflicts between the requirements of urban energy simulation systems, the capabilities of the CityGML Energy ADE and the available data are presented, which can be partly resolved by specific geometric / semantic corrections of the model data. For testing and evaluating the approach, interfaces for two building energy simulation systems have been developed.

INTRODUCTION

Recent studies have shown that cities are responsible for more than 70% of greenhouse gas emissions (IEA, 2016), and therefore strongly contribute to climate change and air pollution. This calls for a new, holistic urban planning approach, considering all aspects of sustainable urban development. Reducing energy demand and CO₂ emissions, and increasing the share of renewable energy are crucial points in this context.

Therefore, the popularity of urban energy modelling (UEM) tools for assessing the thermal energy demand of buildings on urban scale has risen in recent years (Reinhard and Davila, 2016). UEM technology is used for planning energy efficiency measures like integrating combined heat and power plants (CHP), supporting balancing fluctuating renewable energies for demand side management, and

providing indispensable information for planning energy related retrofitting measures of the building stock.

Most of the applications mentioned above require analysing time-varying energy demand profiles under dynamic external (e.g. weather) conditions. A number of building performance simulation platforms like CitySim (Robinson et al., 2009), Sim-Stadt (Nouvel et al., 2015), EnergieAtlas (Kaden and Kolbe, 2013) or TEASER (Remmen et al., 2018) have been developed, which can handle multiple buildings on urban scale. However, a common problem in the application of these tools is the lack of energy related information for the individual buildings. Furthermore, the available data is frequently inaccurate or at least unreliable.

Typical sources for urban wide building energy related information are 2D cadastre data or virtual 3D city models from public agencies and aggregated statistical data from population and housing censuses. Thus, besides the building's position, orientation and - more or less generalized - geometry, there is typically only very little information available for the derivation of input for energy simulations. Each of the urban energy simulation systems mentioned above therefore implements specific strategies for checking, correcting and enriching the available information and transforming it into a usable simulation model. Therefore, the existing enrichment processes are tool specific and opaque to the user. This is one reason why simulations of the same urban situation - performed with different tools - can lead to strongly differing results.

The present paper therefore proposes a transparent enrichment process, which

- uses virtual 3D building models in the standardised data format CityGML, which are geometrically and semantically checked and corrected,
- enables control and correction of the attributive data being generated in the enrichment process, and
- explicitly stores the generated simulation model in an Application Domain Extension (ADE) "Energy" of CityGML.

The Energy ADE data model is considered a "neutral" interface between Building Information Modelling (BIM) tools and Geographic Information Systems (GIS) on the one hand and building energy simulation tools on the other hand. In the following, this approach is tested and evaluated by implementing Energy ADE interfaces for two specific simulation systems. First results prove the general applicability of the approach, but also reveal some technical difficulties in its realization and deficiencies in the current version of Energy ADE.

URBAN ENERGY RELATED DATA MODELS

At present, there are only a small number of open data formats for modelling the built environment, which primarily aim to support the interoperable data exchange in heterogeneous software architectures. In the BIM area, especially the standards IFC (Industry Foundation Classes) and gbXML (green building XML) are to be mentioned. The latter has explicitly been designed as interface between modelling and simulation systems for buildings (Casper et al., 2014). This interface is also supported by IFC as comprehensive product data model for buildings. However, at present there are no economic tools or methods for the derivation of BIM data for larger groups of buildings or a whole city.

Furthermore, the building related information available on urban level differs significantly – in structure and content – from the above mentioned BIM models. They are geometrically limited both to the representation of the footprint or exterior shell of the building, representing geometry by explicit surfaces instead of (parametric) volumes, and to support only few non-geometric properties like building function

or year of construction. However, 2D cadastre data and especially virtual 3D city models still represent the most comprehensive data source for urban energy modelling. Hence, the available information needs to be checked, corrected and enriched to allow for energy related simulations, and a suited extension of the 3D city model is needed for its storage and exchange.

CITYGML DATA MODEL

The OGC (Open Geospatial Consortium) standard CityGML (OGC 2012) is the most frequently used data format for 3D city models. In the current version 2.0 a building may either be represented by a single object (class *Building*), or separated into one main part modelled as *Building* and several building parts (class *BuildingPart*), differing structurally (number of storeys, roof type) or functionally (function, year of construction) from the main part. *Building* as well as *BuildingPart* objects can be represented both geometrically and semantically in up to 4 different Levels of Detail (LoD1 – LoD4, the two-dimensional LoD0 representation is irrelevant in the present context). This concept, including its strengths and weaknesses has been extensively discussed elsewhere (Benner et al., 2013), (Löwner et al., 2016). Therefore, in the present paper we discuss and rate only the suitability of different LoD representations for building simulations (see Table 1). The qualitative rating (from "++" (very good) to "--" (very bad)) uses the following criteria:

- Accuracy of the geometric representation of *building volume*.
- Separation of the building's exterior shell into classified (wall, roof, base slab) *boundary surfaces* suitable for thermal simulations.
- Geometric and semantic representation of *openings* (windows, doors) in the exterior shell suitable for thermal simulations.
- Geometric and semantic representation of *interior building structures* (e.g. rooms, inner walls, ceilings) suitable for thermal simulations.
- City-wide availability of data.

It turns out that the most frequently available LoD1 models provide no directly energy relevant information, besides an approximate

representation of the overall building volume. Models of category LoD4 have the highest information content and could, potentially - after an adequate geometric processing - even represent different thermal zones within a building. However, such models do not exist in practice. Hence, the enrichment process described in this paper focusses on LoD2 and LoD3 models.

Table 1: Rating of CityGML LoD for building simulations

	LoD1	LoD2	LoD3	LoD4
Building volume	-	+	++	++
Boundary surfaces	n. a.	++	+	+
Openings	n. a.	n. a.	+	+
Interior structure	n. a.	n. a.	n. a.	+
Availability	++	+	-	--

Most building energy simulation systems work with simplifying assumptions about the thermal energy exchange between the building's interior and the outer environment. Therefore, the generalised boundary surface geometry provided by LoD2 models is typically better suited than the (geometrically more detailed) LoD3 version. However, the central disadvantage of LoD2 models is their lack of explicit opening information, which needs to be added in the enrichment process.

On an attributive level, CityGML 2.0 only provides the building's year of construction, different functional classifications of the building, and the building height and/or number of storeys. Many approaches for city-wide building energy simulation use these parameters in combination with building typologies – as, e.g. Tabula (Ballarini et al., 2014) - to derive real physical parameters like heat resistances or heat capacities of walls. Furthermore, based on the functional building classification and statistical data, the energy relevant behaviour of the building's occupants is assessed and quantified. Unfortunately, in the CityGML or cadastre data currently available, the attributive information, in particular the year of construction, quite often is missing or unreliable. This pertains especially to the year of construction, which may represent either the actual year of construction or the date of the last

building modification (e.g. an enlargement) requiring an official approval.

CityGML Application Domain Extension Energy

Our approach follows the general workflow of enriching and extending the available building information. One of the main differences to other approaches is that the data enrichment process and building simulation process are decoupled and that the enrichment results are stored in a new data format. In principle, this allows running simulations with different tools based on the same input data set.

The new data model for building energy simulations is defined as Application Domain Extension (ADE) of the CityGML standard. According to the general ADE mechanism (van den Brink et al., 2013), the Energy ADE defines a number of new feature classes and extends the existing classes *Building* and *BuildingPart* with additional, energy relevant properties. Version 1.0 of the new data model is comprehensively introduced in (Agugiaro et al., 2018). Therefore, the present paper focuses only on a rough overview of the model (see Figure 1).

The CityGML classes *Building* and *BuildingPart* are extended by properties to represent size (*volume*, *floor area*) and location (*referencePoint*, *heightAboveGround*) of a building. In addition, the properties *buildingType* for an architectural classification (e.g. *singleFamilyHouse* or *terracedHouse*) and *constructionWeight* for classifying the construction status (e.g. *lightConstruction*, *heavyConstruction*) are introduced.

Core of the new data model is a thermal building model, separating the energetically relevant building volume (thermal building hull) into one or more thermal zones (class *ThermalZone*) with homogeneous thermal conditions. All *ThermalZone* objects may contain volumetric geometry (property *volumeGeometry*). Different *ThermalZone* volumes are non-overlapping and unite to the complete thermal building hull. A *ThermalZone* can also be related to one object *UsageZone*, specifying the thermal needs of the zone's occupants (schedules for heating, cooling and ventilation), as well as data to estimate the internal heat gains due to lighting or electrical

facilities (class *Facilities*) and the occupants themselves (class *Occupants*).

ThermalZone objects are completely bounded by specific boundary surfaces (class *ThermalBoundary*), enabling the exchange of energy between adjacent thermal zones as well as thermal zones and the outside environment.

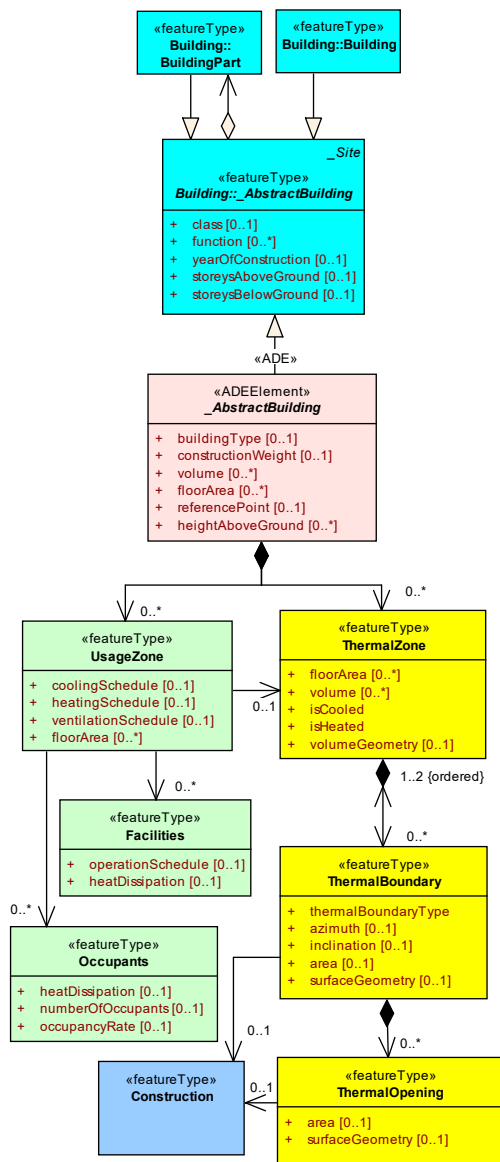


Figure 1: Simplified UML model of the CityGML Energy ADE

Thus, a *ThermalBoundary* relates either to exactly one *ThermalZone* object (in case it corresponds to the exterior building shell) or it relates to two *ThermalZone* objects (in case it corresponds to an interior wall or ceiling). Geometrically, *ThermalBoundary* objects are represented by a simply connected and (within certain limits) planar *surfaceGeometry*. Orientation of this plane (*azimuth*, *inclination*)

and surface size (*area*) may also be specified by attributes, together with the mandatory boundary condition (*thermalBoundaryType*) of the surface (e.g. *outerWall*, *intermediaryCeiling*, *sharedWall*).

It is assumed that a *ThermalBoundary* object has homogeneous thermal and optical properties, aggregated in a related *Construction* object. If the corresponding real building element has openings (doors or windows) with differing physical and optical properties, the openings must be separately represented by *ThermalOpening* objects with their own *surfaceGeometry*, *area*, and associated *Construction*.

ENERGY RELATED ENRICHMENT OF CITYGML DATA

The new general workflow to enrich CityGML LoD2 or LoD3 building models is depicted in Figure 2. The process starts with importing the CityGML data into the new enrichment tool, which at present supports only a file-based import. In case the input data contains several CityGML *Building* objects, the enrichment is performed individually for each object.

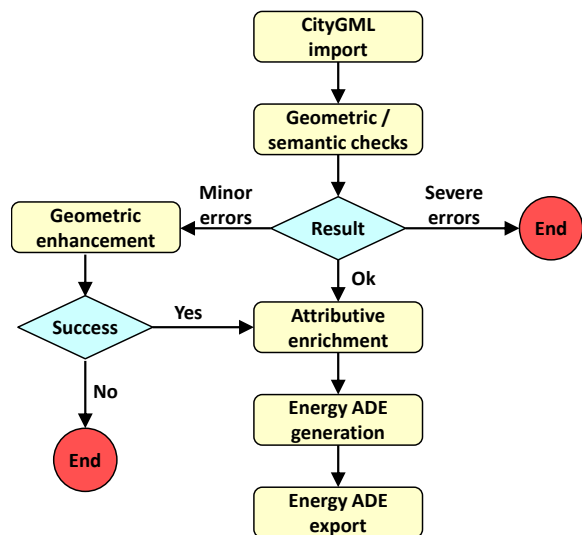


Figure 2: Enrichment process

In the first step, a number of geometric checks is performed. If none of these checks reveals significant errors, the process directly continues with the attributive enrichment. In case minor errors are detected, the algorithm tries to correct the data and afterwards to continue with the attributive enrichment. Finally, if one of the checks detects severe, not easily correctible

errors, the enrichment process for this *Building* object stops.

Geometric checking and correction are performed without any user interaction. In the attributive enrichment process, however, where missing physical parameters and occupant behaviour information is added, user interaction is required. Finally, an Energy ADE representation of the corrected and enriched CityGML model is generated and stored externally. Since LoD2 and LoD3 input data contain no information on internal building structures, the process always generates one *ThermalZone* and one *UsageZone* object for each *Building* and *BuildingPart* object.

Geometric / semantic checking and correction

The relevance of application specific checking and validating CityGML models has been indicated by (Wagner et al., 2014). Simulations, in which the building's interior is assumed as thermally homogeneous (single zone models), require firstly a correct value for the building volume. Secondly, correct sizes, orientations and geometric representations of the different parts (boundary surfaces) of the building's exterior shell are necessary. Thirdly, correct boundary conditions for all boundary surfaces are crucial. The latter conditions indicate whether a specific surface is exposed to air, to the ground or to a neighbouring building.

Concerning boundary conditions, many existing LoD2 and LoD3 CityGML building models show deficiencies. Usually, this occurs when a CityGML *Building* relates to *BuildingPart* objects. Normally, *Building* as well as *BuildingPart* objects are completely enclosed by *_BoundarySurface* objects with significant overlapping surface geometry (see Figure 3).

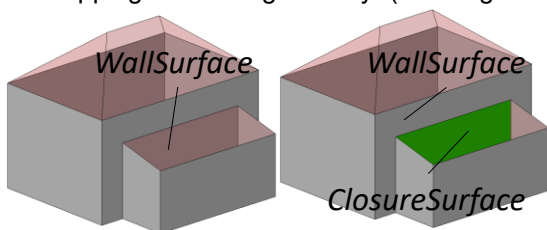


Figure 3: BuildingParts with overlapping WallSurfaces

The overlapping surface parts are then confined to the building's interior and normally do not correspond to real building elements. Thus, for a correct model they need to be separated and

classified as CityGML *ClosureSurface*, which are ignored in the thermal model.

There are similar issues with closed building structures, which are frequently occurring in city centres. For correctly simulating the thermal behaviour of adjacent buildings, the parts of *_BoundarySurface* objects, where adjacent buildings touch, need to be separated and modelled as new *_BoundarySurface* objects of the type "SharedSurface" (see Figure 4). Unfortunately, CityGML has no standardised concept to express this situation.

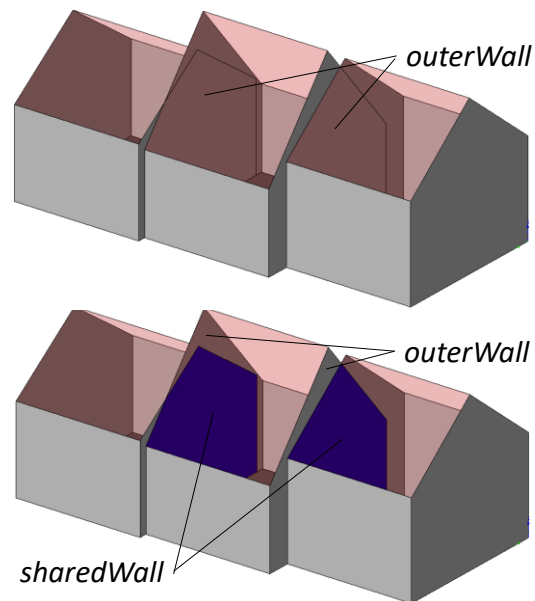


Figure 4: Building objects with overlapping surfaces

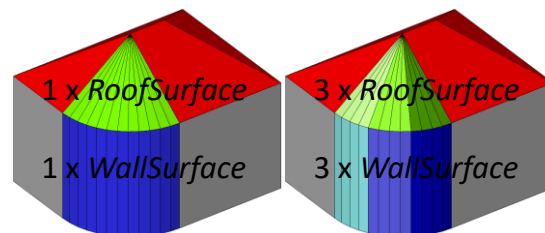


Figure 5: Separation of curved boundary surfaces

In the current state of implementation of the enrichment tool, all geometry errors like non-planar polygons, overlapping surface patches in multi-surface geometries or faulty volume geometry are classified as "severe", and result in an abortion of the enrichment process. Approaches to heal such errors under certain conditions (Wagner et al., 2013) may be incorporated in the future. A geometrical correction is performed in the following cases:

- The overlapping parts of *Building* / *BuildingPart* objects belonging to the same

Building are geometrically identified and classified as "virtual wall" (see Figure 3).

- The overlapping areas of *Building* / *BuildingPart* objects belonging to different Building Objects are geometrically identified and classified as "shared wall" (see Figure 4).
- A *_BoundarySurface* object is composed of surface patches with differing orientations, patches with (within certain limits) identical orientation are clustered, and a new *_BoundarySurface* object is generated for each cluster (see Figure 5).

Attributive enrichment

In this step of the enrichment process, the attributive information missing in the CityGML data is added. At present, this step is entirely performed by the user. However, for future implementations the automatic generation of realistic proposals is planned, which only necessitates checking and correction by the user.

The added information covers three different areas: (1) Thermal and optical properties of the different *_BoundarySurface* objects (*WallSurface*, *RoofSurface*, and *GroundSurface* objects), (2) set-point data for heating, cooling and ventilation, and (3) parameters to assess internal heat gains. For LoD2 models, percental "opening ratios" can be assigned to *WallSurface* and *RoofSurface* objects. The ratio indicates the size of an opening without determining its shape and location on the boundary surface.

Altogether seven sets of material parameters must be defined for *WallSurface*, *RoofSurface* and *GroundSurface* objects, and for openings (*DoorSurface* and *WindowSurface*) in walls and roofs. It is possible either to choose complete constructions - being composed of one or more layers - from a predefined construction list, or to specify physical parameters directly. In the latter case, a corresponding construction with one or two layers is generated automatically. For every layer, thermal conductivity, density, specific heat capacity, and layer thickness need to be specified. For openings, transparency and glazing ratio must be defined.

Set point information is defined in form of daily profiles, i.e. 24 hourly values for the needed temperatures and ventilation rates. For this, different schedules for specific days of the week

(e.g. weekdays and weekends) and specific time periods within a year can be defined.

Internal heat gains are composed of the thermal energy emitted by the occupants, illumination and other electric devices. Again, daily usage or attendance schedules have to be defined, together with floor area or person-related constants to assess the emitted energy.

INTERFACING ENERGY ADE DATA WITH SIMULATION SYSTEMS

As already mentioned, the extended CityGML data model shall establish a "neutral" interface between modelling and simulation systems in the building area. For testing and evaluating this approach, two different simulation systems are used: The commercial system "Gebäude-Simulation 3D Plus" (Geiger et al., 2016), and the open source system EnergyPlus (Crawley et al., 2001). The goal of this research is the automatic derivation of input data sets for the dynamic simulation of a building's heating and cooling demand.

It turns out that this is principally possible for both target systems. Especially EnergyPlus has a very comprehensive and detailed data model for multiple applications, whose functionality is only rudimentarily covered by the CityGML Energy ADE. However, for both target systems it is possible to generate the necessary objects and mandatory properties to support thermal simulations. Transforming the building geometry is easier for the commercial simulation system "Gebäude-Simulation 3D Plus", because this software only needs geometrical parameters (size und orientation) of the thermal boundary surfaces and openings. In contrast, EnergyPlus needs the explicit, geometrically generalised geometry of these surfaces. Multi surfaces and interior contours are not feasible and openings must have at most 4 contour points.

In the course of implementing the interfaces, some gaps and shortcomings in the current version of the CityGML Energy ADE become obvious. Among these are:

- Missing specification of underground soil temperatures;
- Missing class for "transparent" materials;
- Missing boundary conditions for walls in contact with the earth;

- Missing properties to limit the maximum available heating and cooling power.

SIMULATION RESULTS

Enrichment workflow and model transformations are tested with different CityGML models. One of these models is a typical office building (KIT Campus North building 445), whose CityGML LoD3 model is depicted in Figure 6. After finishing the enrichment process, which ignores all building installations (coloured brown in Figure 6), the model contains one *ThermalZone* object, referring to 12 *ThermalBoundary* and altogether 320 *ThermalOpening* objects. For heating and ventilation set-point schedules as well as usage parameters, the profile "Large Office" of "Schweizerischer Ingenieurs- und Architektenverein" (SIA 2015) is used. Typical weather data of the building site are provided by the Meteororm software (Meteororm 2018).

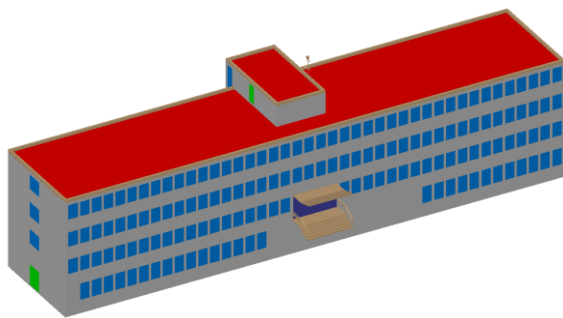


Figure 6: CityGML LoD 3 model of KIT building 445

For both simulation systems, it is generally possible to transform the ADE model into specific simulation models and to perform simulations without severe errors. Central results (calculated yearly heating energy demand as well as energy gains and losses) are depicted in Table 2.

Table 2: Simulated yearly energy demands, gains and losses in kWh

	EnergyPlus	GebSim
Energy demand heating	203.609,0	195.921,9
Energy gains occupants	12.199,1	10.861,8
Energy gains lighting	35.840,4	35.840,2
Energy gains devices	26.065,8	26.064,4
Energy losses ventilation	116.190,0	124.726,5

Considering the differences in the physical models of the simulation programs and the

deficiencies of the Energy ADE model, the agreement between the results is very good, with a difference of only 3.8% of the overall heating requirement, as can be seen in Table 2. Only the difference in the ventilation losses is significantly higher, probably due to different models for the ventilation systems. However, the quality of the simulation can still be improved by an extension of the Energy ADE. Especially EnergyPlus uses and needs a number of parameters where presently only default values can be used, because they are not provided by the Energy ADE in its current version.

SUMMARY AND OUTLOOK

The paper presents a new approach to support building related thermal energy simulations on urban level. The suggested method builds on existing 3D building models in the CityGML format, which are geometrically enhanced and semantically enriched with energy relevant information in an interactive process. A central feature of this approach is that the result of the enrichment process is explicitly represented in a specialised extension (Energy ADE) of the CityGML data format.

A central goal for developing the Energy ADE data model is to support different building energy simulation systems. In order to test and evaluate this functionality, software modules for transforming Energy ADE data into input data sets for two different simulation systems are developed. By this, the principle ability of the Energy ADE to act as a "neutral" interface between modelling and simulation tools in the building area is demonstrated.

When transforming Energy ADE data into input data for the two considered energy simulation systems, a number of deficiencies of the current Energy ADE version become obvious, which need to be corrected in the future. In some cases, the ADE model structure is inappropriate to easily support existing simulation systems and some important physical parameters are not represented completely.

Additionally, the enrichment process itself has potential for further improvement. Central point will be to introduce a higher degree of automation of the process, which is indispensable for the simulation of larger groups of buildings. For this, statistical information will

be used to automatically derive detailed energy related information (e.g. building material data of usage profiles) based on the available information (year of construction, building function).

LITERATURE

- Agugiaro, G., Benner, J., Cipriano, P and Nouvel, R. 2018. The Energy Application Domain Extension for CityGML: enhancing interoperability for urban energy simulations. *Open Geospatial Data, Software and Standards* (2018) 3:2 <https://doi.org/10.1186/s40965-018-0042-y>.
- Ballarini, I., Corgnati, S. P., Corrado, V.. 2014. Use of Reference Buildings to Assess the Energy Saving Potentials of the Residential Building Stock: The Experience of TABULA Project." *Energy Policy* 68: 273–284. doi: 10.1016/j.enpol.2014.01.027
- Benner, J., Geiger, A., Gröger, G., Häfele, K.-H., Löwner, M.-O. 2013. Enhanced LoD Concepts for virtual 3D City Models. ISPRS 8th 3DGeoInfo Conference & WG II/2 Workshop, 27 – 29 November 2013, Istanbul, Turkey.
- Casper, E., Häfele, K.-H., Kaden, R. 2014: OGC standard CityGML opens up new applications in Energy simulation, *J. Nat. Inst. of Building Sciences*, Vol.2, No. 6.
- Crawley, D., Lawrie, L., Winkelmann, F., Buhl, W., Huang, Y., Pedersen, C., Strand, R. 2001. EnergyPlus: Creating a New-generation Building Energy Simulation Program. *Energy and Buildings* 33 (4): 319–331. doi:10.1016/S0378-7788(00)00114-6.
- Geiger, A., Reichenbach, I., Häfele, K.-H. 2016: IFC-Daten für die thermische Gebäude-simulation, 28. Forum Bauinformatik, 19.-21-Sept. 2016, Hannover.
- IEA 2016. Energy and air pollution - World energy outlook 2016 special report. Organisation for Economic Co-operation and Development / International Energy Agency.
- Kaden, R., and T. H. Kolbe. 2013. City-Wide Total Energy Demand Estimation of Buildings Using Semantic 3D City Models and Statistical Data. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II- 2/W1*: 163–171. doi:10.5194/isprsannals-II-2-W1-163-2013.
- Löwner, M.-O., Gröger, G., Benner, J., Biljecki, F., Nagel, C. 2016: Proposal for a new LOD and Multi-Representation Concept for CityGML. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, IV-2/W1, 3-12, <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W1-3-2016>, 2016.
- Nouvel R., Brassel. K.-H., Bruse, M., Duminil, E., Coors, V., Eicker, U., Robinson, D. 2015. SimStadt, a new workflow-driven urban energy simulation platform for CityGML city models. Lausanne: CISBAT International Conference 2015.
- Open Geospatial Consortium (OGC) 2012. OpenGIS@City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard. OGC 08-007r2, Version 2.0.0 (2012),
- Reinhart, C. F., and C. Cerezo Davila 2016. Urban Building Energy Modeling – A Review of a Nascent Field. *Building and Environment* 97: 196–202. doi: 10.1016/j.buildenv.2015.12.001.
- Remmen, P., Lauster, M., Mans, M., Fuchs, M., Osterhage, T., Müller, D. 2018. TEASER: an open tool for urban energy modelling of building stocks. *Journal of Building Performance Simulation*, 11:1, 84-98, DOI: 10.1080/19401493.2017.1283539
- Robinson, D., Haldo, F., Kämpf, J., Leroux, P., Perez, D., Rasheed, A., Wilke, U. 2009. CITYSIM: Comprehensive Micro-Simulation of Resource Flows for Sustainable Urban Planning." *Proceedings of the 11th international IBPSA conference*, 1083–1090.
- van den Brink L, Stoter J, Zlatanova S. 2013. UML-based approach to developing a CityGML application domain extension. *Trans GIS*. 2013;17(6):920–42.
- Wagner, D., Wewetzer, M., Bogdahn, J., Alam, N., Pries, M. and Coors, V. 2013. Geometric-semantic consistency validation of CityGML models. In *Progress and New Trends in 3D Geoinformation Sciences* (pp. 171-192). Springer Berlin Heidelberg.
- Wagner, D., Coors, V. and Benner, J. 2014. Semantic validation og GML-based geospatial data. 9th 3DGeoInfo Conference 2014, Dubai, UAE, November 11-13, 2014.

FASSADENINTEGRIERTE PHOTOBIOREAKTOREN | STRÖMUNGS- UND SYSTEMSIMULATION

J. Haskell^{1,*}, M. Frechen¹ und T. Sengewald¹

¹Advanced Building Engineering, ARUP Deutschland GmbH, Berlin, Deutschland

*Korrespondierender Autor

E-Mail-Adressen: jake.haskell@arup.com (J. Haskell), matthias.frechen@arup.com (M. Frechen), timo.sengewald@arup.com (T. Sengewald)

KURZFASSUNG

Im Zuge des Erfolgs des BIQ-Hauses im Jahr 2013 werden nun verbesserte Photobioreaktoren der nächsten Generation zur Algenzucht entwickelt, die in Gebäudefassaden zur Energiegewinnung integriert werden können. Um effizient in der dünnen Reaktorschicht wachsen zu können, sollten die Geschwindigkeiten im Algenfluid möglichst hoch sein, um für eine gute Durchmischung zu sorgen und die Mikroalgen an die von der Sonne bestrahlte Reaktoroberfläche zu transportieren. Diese Studie befasst sich mit Strömungssimulationen des zweiphasigen Luft-Algenfluid-Gemisches im Reaktor, die durchgeführt werden, um den Einfluss verschiedener Reaktorvarianten auf die Strömungsgeschwindigkeiten zu untersuchen und so einen verbesserten Entwurf für effizientere Photobioreaktor-Fassadenpaneele zu entwickeln.

ABSTRACT

Following the success of the BIQ building in 2013, improved photo-bioreactors are being developed for façade integration to generate energy for building occupants. Algae growth in the reactors is positively influenced by high fluid velocities, which transport microalgae cells to the reactor surface more frequently, allowing them to absorb more sunlight and grow more efficiently. This paper outlines CFD flow simulations of the photo-bioreactors conducted to investigate the effects of different reactor geometries on flow velocities and thus improve the efficiency of the next generation façade-integrated photo-bioreactors.

EINLEITUNG

Hintergrund

Im Jahr 2013 wurde das BIQ Haus im Rahmen der Internationalen Bauausstellung in Hamburg fertiggestellt und wurde somit das erste Gebäude der Welt mit Photobioreaktorelementen an der Fassade (vgl. Abb. 1).



Abbildung 1: BIQ Haus in Hamburg mit Photobioreaktor-Fassade

Aus den Erfahrungen der Umsetzung für das BIQ Haus werden nun im Rahmen eines interdisziplinären Forschungsprojektes die Photobioreaktoren (PBRs) weiterentwickelt, um optimierte Fassadepaneele mit verbesserter Effizienz zu entwerfen, die außerdem dünner, leichter und besser handhabbar sind.

Photobioreaktor-Paneele

In den Photobioreaktoren an der Gebäudefassade werden Mikroalgen kultiviert, die als wertvoller Nährstoff u.a. zu Lebensmittel weiterverarbeitet oder auch als Brennstoff verwendet bzw. verkauft werden können. Beim Wachstum dieser wertvollen Biomasse wird

außerdem viel CO_2 gebunden, was den Einsatz von Photobioreaktoren als ‚grüne‘ Technologie besonders attraktiv macht. Neben der Biomasseproduktion fungieren die Photobioreaktoren auch als Solarkollektoren für das Gebäude mit dem Algenfluid als Trägermedium. Die Wärmeenergie von den Photobioreaktoren wird parallel zu den photosynthetischen Wachstumsvorgängen der Mikroalgen durch gebäudeintegrierte Wärmeübertrager abgeführt, um einen Teil des Gebäudeenergiebedarfs für Warmwasser und Heizung zu decken. Das gesamte System stellt somit eine aktive und dynamische Fassade dar, die stark mit dem Gebäudebetrieb und dessen Energieversorgung gekoppelt ist. Die PBR-Fassadenpaneele dienen als ein regeneratives und dezentrales Energiesystem für das Gebäude.

Die Photobioreaktoren sind in Fassadenelementen integriert, sodass die Mikroalgen in einer 10 mm dünnen Fluidschicht zwischen Sicherheitsglasscheiben kultiviert werden (vgl. Schema in Abb. 2). Um effizient in der dünnen Reaktorschicht wachsen zu können, sollten die Mikroalgen nach einer kurzen Lichtexposition weg von der bestrahlten Reaktoroberfläche transportiert werden, weil sie danach 20-50ms keine weiteren Photonen absorbieren können (Leupold et al. 2013).

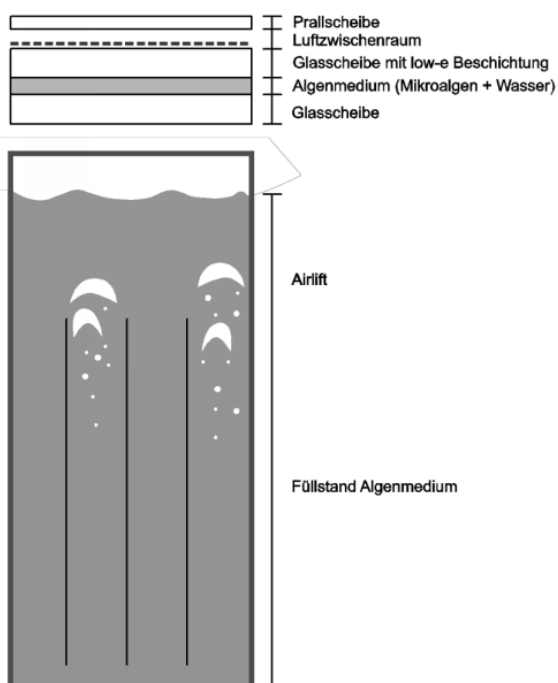


Abbildung 2: PBR-Paneel-Aufbau (Blattmann 2016)

Damit die Häufigkeit des Platzwechsels der Algenzellen von vorne nach hinten im Reaktor

erhöht und das Wachstum begünstigt wird, wird jeder fassadenintegrierte Photobioreaktor mit Druckluftstößen versorgt (der sogenannte Airlift-Betrieb). Die Luft wird in kurzen, periodischen Intervallen im Reaktorboden zugeführt, sodass der Injektionsimpuls und die aufsteigenden Luftblasen für eine ausreichende Zirkulation im Algenfluid sorgen. Eine Aufnahme einer aufsteigenden Luftblase im Reaktor infolge einer Luft-Eindüsung ist in Abbildung 3 zu sehen.

Um die Gesamteffizienz des Systems zu erhöhen, werden möglichst hohe Strömungsgeschwindigkeiten im Algenfluid bei einem möglichst kleinen Energieaufwand für die Druckluftimpulse angestrebt (Hindersin et al., 2013), (Leupold et al. 2013).



Abbildung 3: Aufnahmen des Airlifts in einem Kanal eines neuen Reaktorprototypen

Um eine verbesserte Effizienz neu konzipierter Photobioreaktoren zu erreichen, werden Strömungssimulationen für verschiedene Reaktorentwürfe durchgeführt. Dabei sollte ein Reaktorentwurf identifiziert werden, der sowohl höhere Strömungsgeschwindigkeiten im Reaktor begünstigt als auch eine hohe statische Robustheit aufweist (und somit auch kostengünstiger herstellbar ist).

KONZEPT

Die Algen benötigen Solarstrahlung und Kohlendioxid, um im Laufe des photosynthetischen Prozesses wachsen zu können. Um höhere Ausbeuten zu erreichen und die Wachstumsrate zu beschleunigen, braucht das Algenfluid auch eine bestimmte Durchmischung,

um für eine bessere Lichtverteilung der einfallenden Strahlung auf die einzelnen Algenzellen im Reaktor zu sorgen (Hindersin et al., 2013), (Leupold et al. 2013).

Diese Durchmischung im Reaktor, welche durch zugeführte Luftstöße nach dem Airlift-Prinzip (vgl. Abb. 3) realisiert werden, führt dazu, dass das Algenmedium infolge von jedem Luftstoß zur Bewegung angeregt wird und Strömungen im Reaktor entstehen. Darüber hinaus sorgen dann die aufsteigenden Luftblasen für weitere Bewegung der Algenflüssigkeit im Reaktor.

Das gesamte System stellt eine Zweiphasenmischung aus Luft und Algenfluid mit einem stark instationären Verhalten dar, welches dann durch die Reaktormodellierung und CFD-Simulationen abgebildet wird.

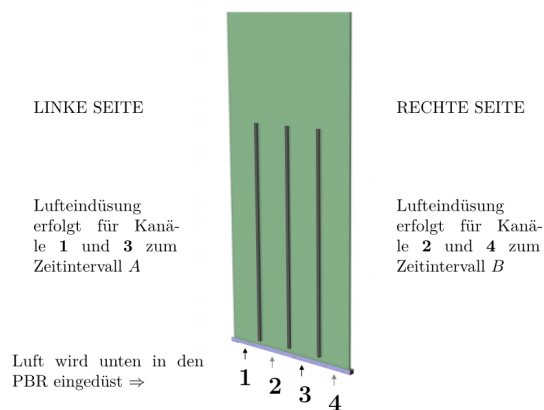


Abbildung 4: Airlift-Taktung im Photobioreaktor

Ein beispielhaftes Reaktormodell mit Erläuterung der eingesetzten Taktung des Airlifts wird in Abbildung 4 dargestellt. Um die aufzuwendende Energie für die Lufteindüsung gering zu halten und auch den Reaktor vor zu hohen Druckschwankungen zu schützen, wird bei einem Airlift-Zyklus Luft in nur zwei der vier Reaktorkanäle eingedüst. Der Airlift für die Kanäle 1+3 und 2+4 erfolgt dann im Wechsel entsprechend der festgelegten Intervalldauer der Lufteindüsung (vgl. Abb. 4).

Bei jedem Eindüszungszyklus werden 500 cm^3 Druckluft in 2 der 4 Kanäle für 0,5 Sekunden durch den Schlauchanschluss am Boden des Reaktors eingeführt. Es wird alle 4 Sekunden Luft in das System injiziert, sodass jeder Kanal alle 8 Sekunden wieder bedüst wird (vgl. Abb. 4). Die so am Reaktorboden zugeführte Luft steigt auf und entweicht durch kleine Öffnungen am oberen Rand des Reaktors.

METHODIK

Um die Strömungssimulationen von Reaktorvarianten durchzuführen, wird die CFD-Software OpenFOAM verwendet (Greenshields 2014), (Greenshields 2015). Die Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgt mit der Datenvisualisierungssoftware Paraview sowie Excel und Python zur Datenanalyse.

Zunächst wird ein ausführliches Review einschlägiger Literatur zur Modellierung von Zweiphasenströmungen in Reaktoren und Blasensäulen durchgeführt. Vgl. u.a. Becker et al. 1999, Clift et al. 1978, Hill 1998, Marschall 2011, Rusche 2002 und Ziegenhein et al. 2014.

Der PBR, welcher in einem Fassadenelement integriert wird, hat eine feste Höhe von 3,00 m und eine feste Breite von 1,35 m. Die Dicke des mit Algenfluid befüllten Zwischenraums beträgt 10 mm, der Füllstand 2,80 m. Während die Außenmaße des Reaktors durch die Maße des Fassadenelementes festgelegt sind, ist die Länge und Breite der strukturellen Elemente im Reaktor, der sogenannten ‚Trennsteg‘, variabel. I.d.R. ergeben sich durch die Einbeziehung der Trennsteg im Reaktor vier Kanäle mit einer Breite von jeweils ca. 32 cm.

Da eine Aussage zu den Geschwindigkeiten im gesamten Reaktor bei vertretbaren Rechenzeiten angestrebt wird, wird der Euler-Euler-Ansatz (Volume-of-Fluid-Methode, VoF) angewandt. Eine genauere Methode hätte einen wesentlich größeren Modellierungsaufwand sowie längere Rechenzeiten bedeutet, wodurch die Beschränkung der Untersuchung auf nur ein Ausschnitt des Reaktors erforderlich gewesen wäre.

Bei der Euler-Euler-Methode wird jede Phase (hier Luft und Algenfluid) als ein Kontinuum betrachtet und durch gemittelte Erhaltungsgleichungen modelliert. Im Zuge eines Mittelungsvorgangs kommt die Phasenfraktion zustande, die die Wahrscheinlichkeit wiedergibt, dass an einem beliebigen Punkt im Netz zu einer bestimmten Zeit eine Phase anzutreffen ist (Hill 1998), (Rusche 2002). Die VoF-Methode integriert eine Kopplung zwischen den Phasen in beiden Richtungen und ist ein zielführender Ansatz zur Berechnungen von Zweiphasenströmungen insbesondere bei höheren Phasenfraktionen (Rusche 2002).

Im Rahmen der dynamischen Simulationen wird die Algenfluidphase vereinfacht als Wasser betrachtet, da die Mikroalgen einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf die Strömungseigenschaften des Mediums bei der vorhandenen Algenkonzentration haben. Sobald die Algenkonzentration im System zu hoch würde, wäre dies durch die steigende Viskosität auch ein Problem für die Umwälzpumpen im Kreislauf zwischen PBR und dem Wärmeübertrager im Gebäude. Durch eine regelmäßige Ernte der Mikroalgen wird dem entgegengewirkt und somit sichergestellt, dass die Viskosität des Algenfluid praktisch gleich der von Wasser bleibt.

Außerdem werden der kleine Volumenstrom der CO₂-Zufuhr in den Reaktor (zur Algen-Photosynthese) sowie die Ein- und Ausströmung des Algenfluids in den Wärmeübertrager nicht berücksichtigt, weil die hierdurch auftretenden Geschwindigkeiten etwa eine Größenordnung kleiner sind als die durch die Druckluftstöße erzeugten Geschwindigkeitsgradienten.

Es soll an dieser Stelle betont werden, dass das Ziel dieser Untersuchung ist, verschiedene Reaktorgeometrien hinsichtlich der Höhe und Varianz der Strömungsgeschwindigkeiten im Reaktor zu vergleichen. Es ist nicht das Ziel, möglichst genau die Zweiphasenströmung mit exakter Phasengrenzfläche der Blasen beim Aufsteigen abzubilden.

Die Simulationen der Zweiphasenströmungen werden mit dem Solver twoPhaseEulerFoam durchgeführt, der prinzipiell für Gas-Flüssigkeitsströmungen mit dispersen Gasblasen in einer Flüssigkeit entwickelt wurde (Greenshields 2015), (Marschall 2011). Dieser Solver macht sich den PIMPLE-Algorithmus zunutze, der sich als eine Kombination der gängigen Algorithmen SIMPLE (von Patankar) und PISO (von Issa) versteht (Greenshields 2015), (Patankar 1980), (Issa 1985).

Strukturierte Berechnungsnetze von ca. 0,7 Millionen Zellen pro Reaktor werden für die Simulationen mithilfe der OpenFOAM-Utility blockMesh erzeugt. Grund für diese vergleichsweise geringe Zellenanzahl ist das hoch dynamische Verhalten der Strömung. Dies ergibt die Notwendigkeit eines sehr kleinen Zeitschritts bei der instationären Simulation, was zu einer entsprechend langen Rechenzeit führt und eine Begrenzung der Netzgröße erfordert.

Die Simulationen werden isotherm durchgeführt, da beim typischen PBR-Betrieb keine großen Temperaturdifferenzen innerhalb des PBR auftreten. Die beide Medien Luft und Algenflüssigkeit werden als nicht mischbare Phasen mit fester Zusammensetzung modelliert. Die biologischen Prozesse der Algenzellen beim Wachstum werden bei der Modellierung und den Simulationen nicht abgebildet. Es ergeben sich somit keine Reaktionen oder Phaseninteraktionen, außer beim Impulsaustausch bzw. dem phasenübergreifenden Impulstransport.

ERGEBNISANALYSE UND DISKUSSION

In diesem Abschnitt werden einige simulierte Reaktorvarianten und die dazugehörigen Ergebnisse vorgestellt und diskutiert. Eine Übersicht der vorgestellten Reaktorvarianten ist in Tabelle 1 zu finden.

Tabelle 1: Auswahl untersuchter Reaktorvarianten

Bezeichnung	Bemerkung
Var A	Kurze Trennsteg (2,0 m hoch)
Var B	Lange Trennsteg (2,6 m hoch)
Var C	Keine Trennsteg
Var D	Lange Trennsteg mit Unterbrechung mittig

Im Rahmen der Ergebnisanalyse werden gemittelte Verläufe der vertikalen Geschwindigkeiten (über die Reaktorhöhe) sowie Quergeschwindigkeiten über die Reaktortiefe (die sogenannten ‚Horizontalgeschwindigkeiten‘) über die Höhe des Reaktors für jede ausgewählte Variante präsentiert.

Bilder der Simulationsergebnisse werden für die Auswertung nicht herangezogen; es werden allerdings zwei beispielhafte Momentaufnahmen der Geschwindigkeit und der Phasenfraktion für die Variante B in Abbildungen 5 und 6 gezeigt, um einen Eindruck der visuellen Ergebnisse zu vermitteln.

Variante A

In Abbildung 7 sind die zeitlich über einen Eindüszungszyklus gemittelten Geschwindigkeitsverläufe der Variante A zu sehen. Beim Vergleich der Geschwindigkeitsprofile und der Simulationsbilder lässt sich feststellen, dass die

Blasen in den mittleren Kanälen schneller aufsteigen als in den seitlichen Kanälen.

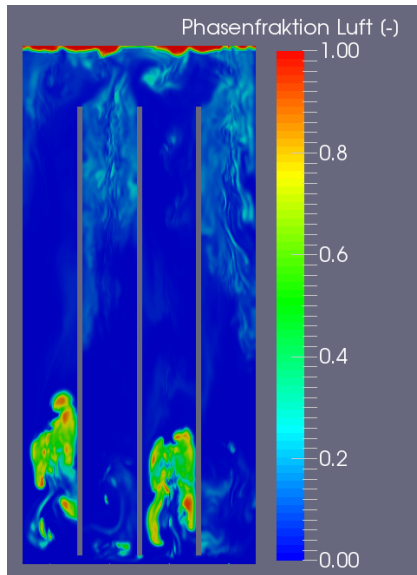


Abbildung 5: Phasenfraktion Luft bei 1s nach Luftindüsung im simulierten Reaktorprototypen Variante B

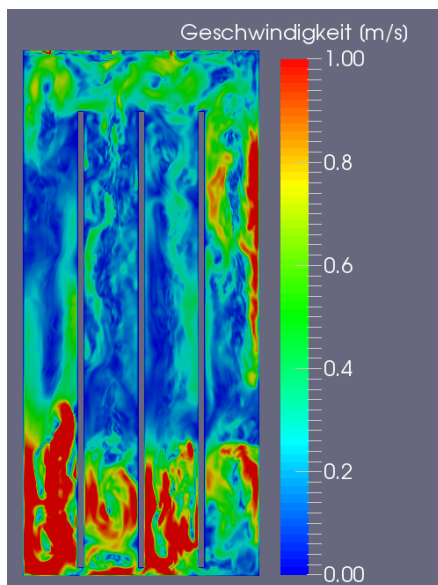


Abbildung 6: Geschwindigkeit bei 1s nach Luftindüsung im simulierten Reaktorprototypen Variante B

Dieses Verhalten ist dadurch bedingt, dass die mittleren Säulen jeweils mit zwei anderen Kanälen über die Verbindungsöffnungen am Boden des Reaktors verknüpft sind. Dadurch kann das Algenfluid aus den benachbarten Kanälen schneller nachströmen als bei den seitlichen Kanälen, die jeweils nur einen Nachbarkanal besitzen. Das erleichterte Nachströmen des Algenfluids aus den Nachbarkanälen führt dazu, dass die Verdrängungswirkung der Luftblasen auf das Fluid schneller ablaufen kann. Somit können auch die Luftblasen schneller aufsteigen.

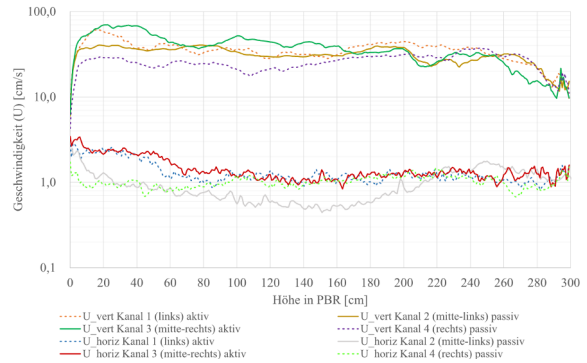


Abbildung 7: Verläufe der gemittelten Geschwindigkeiten im Reaktor über die Reaktortiefe bei Variante A

Auffällig ist dieser Effekt vor allem bei den Vertikalgeschwindigkeiten der passiven Kanäle (Kanäle ohne Luftindüsung) und des Kopfbereichs der Variante A.

Variante B

Abbildung 8 zeigt die Simulationsergebnisse der Variante B. Der Vergleich des Verlaufs der Geschwindigkeiten über die Reaktorhöhe lassen keine eindeutigen qualitativen Schlüsse bzgl. der Simulationsvarianten A und B zu, da die Profile ähnlich verlaufen. Eine genauere Aussage über die Geschwindigkeiten, die im Reaktor auftreten, ist der statistischen Auswertung aller Zellen in Abbildung 11 zu entnehmen.

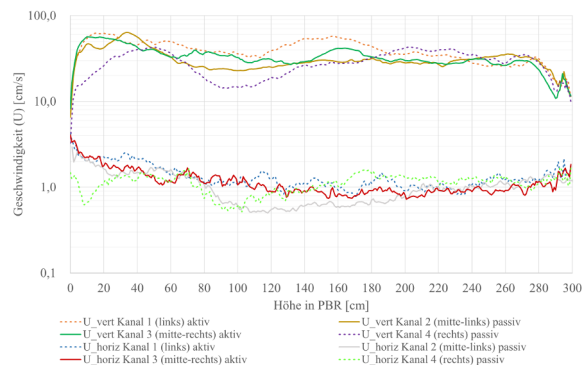


Abbildung 8: Verläufe der gemittelten Geschwindigkeiten im Reaktor über die Reaktortiefe bei Variante B

Der Grund für den kleinen, aber deutlichen statistischen Unterschied ist auf die Länge der Trennstufe zurückzuführen. Entgegen der Erwartung, dass die Ausbildung einer großen Strömungswalze im Kopfraum des Reaktors günstige Auswirkungen auf die Strömungsgeschwindigkeiten hätte, stellt sich anhand der Ergebnisse der Variante B heraus, dass die Stege auch die Aufrechterhaltung der zugeführten Druckluftimpulse in der oberen PBR-Hälfte begünstigen. Da die Bewegung des Algenfluids durch die Stege eingeschränkt wird, sorgt der Impuls des Druckluftstoßes und die

zugehörige Fluidverdrängung durch die Luftblasen für einen schneller ablaufenden Platzwechsel der Fluidteilchen.

Variante C

Im Gegensatz zu Varianten A und B hat Variante C keine Stege. Das resultierende Reaktormodell weist somit keine Aufteilung in Kanäle auf; das Algenfluid kann im Reaktor frei im PBR strömen. Die simulierten Geschwindigkeitsprofile sind in Abbildung 9 zu sehen.

Die Geschwindigkeiten der Varianten C sind etwas kleiner, was sich durch den Vergleich mit Variante B erkennen lässt. Das größere Fluidvolumen im PBR bei Variante C verhält sich auch träger gegenüber den zugeführten Druckluftimpulsen, weil diese auf insgesamt mehr Algenflüssigkeit verteilt werden.

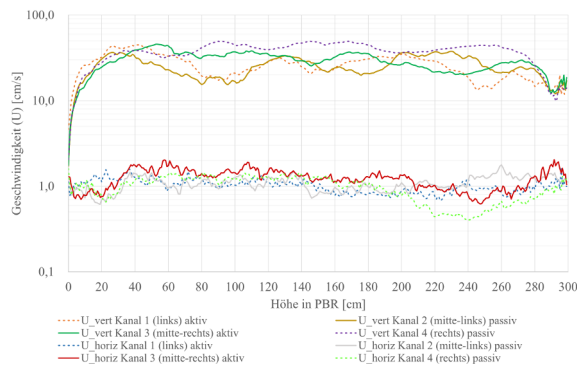


Abbildung 9: Verläufe der gemittelten Geschwindigkeiten im Reaktor über die Reaktortiefe bei Variante C

Des Weiteren erfolgt keine Eingrenzung der Strömung durch Stege, die den positiven Effekt haben, dass die Strömungsgeschwindigkeiten in einem Kanal länger aufrechterhalten werden, wie bei der Variante B stark ausgeprägt ist. Die kinetische Energie der Luftstöße wird bei jedem Injektionszyklus über das gesamte Fluidvolumen im Reaktor verteilt. Statt von höheren Geschwindigkeiten ist aber die Strömung der Variante C durch größere Strömungswalzen, mehr Durchmischung und eine allgemeine Zirkulation charakterisiert.

Variante D

Die simulierten Geschwindigkeiten der Variante D werden in Abbildung 10 dokumentiert. Anhand der Geschwindigkeitsprofile wird deutlich, dass ein Ausgleich in der oberen Hälfte des Reaktors aufgrund der Stegunterbrechungen stattfindet. Die Luftblasen können sich bei der Variante D beim Aufsteigen kanalübergreifend verteilen, sodass es bei dem einen oder dem anderen

Luftinjektionszyklus zu einer gleichzeitigen Anregung des Algenfluids in allen vier Kanälen in der oberen Reaktorhälfte kommen kann.

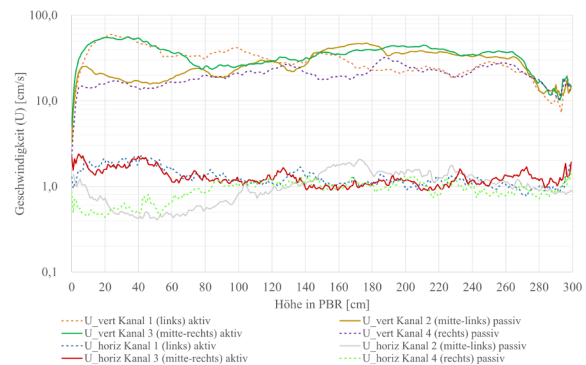


Abbildung 10: Verläufe der gemittelten Geschwindigkeiten im Reaktor über die Reaktortiefe bei Variante D

Durch die Induktionswirkung bestehender Geschwindigkeitsgradienten der Nachbarkanäle werden die Luftblasen der aktiven Kanäle (mit Eindüsung in einem Zyklus) zum Teil in die passiven Kanäle (ohne Eindüsung in einem Zyklus) gezogen. Die Saugwirkung der passiven Kanäle (insbesondere bei den mittleren Kanälen ausgeprägt) sorgt für eine ungleichmäßige Durchströmung der oberen Kanalhälften.

Vergleich der Varianten

Im letzten Schritt der Analyse werden alle Varianten statistisch ausgewertet, indem alle Zellenwerte über mehrere Zeitschritte zusammengefasst und gemittelt werden, um einen einfaches Vergleichsmaß der Varianten zu erhalten.

Da die Quergeschwindigkeiten über die Reaktortiefe von besonderer Bedeutung für das Wachstum der Algen sind (vgl. Abschnitt Konzept), ist ein Vergleich dieser Geschwindigkeiten naheliegend als Vergleichskriterium.

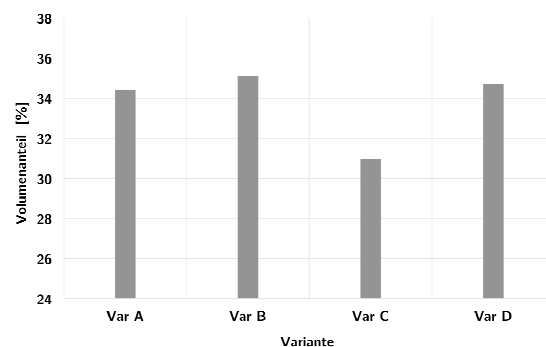


Abbildung 11: Vergleich der untersuchten Varianten anhand von dem Volumenanteil mit gemittelten Quergeschwindigkeiten über die Reaktortiefe größer als 1 cm/s

Abbildung 11 zeigt die Ergebnisse der statistischen Analyse, welche den gemittelten Volumenanteil mit Quergeschwindigkeiten größer als 1 cm/s vergleicht. (Je größer die Geschwindigkeiten, desto effizienter das Wachstum der Algen im Reaktor). Aus den Ergebnissen dieser Analyse lässt sich feststellen, dass Variante B im Schnitt die größten Quergeschwindigkeiten aufweist und wird daher ausgesucht als Vorzugsvariante.

Die Variante B hat außerdem die strukturellen Vorteile der längeren und ununterbrochenen Trennstege. (Die Trennstege dienen als Stützen für die Glasflächen, die starken Druckschwankungen ausgesetzt werden, wenn die Druckluft in den Reaktor eingedüst wird).

Validierung des Modells

Im Zuge des Projektes wird ein Prototyp der Variante B für Testzwecke angefertigt, der für eine überschlägige Modellvalidierung verwendet wird. Es werden Videoaufnahmen der Eindüsung in den Prototypen (Reaktorvariante B) gemacht und im Anschluss in Einzelbilder zerlegt. Indem jedem Bild mit dem gleichem fein aufgeteilten optischen Raster versehen wird, können die Bewegungen der Luftblasen und Fluidteilchen grob verfolgt werden.

Somit lässt sich stellvertretend für die Kanäle 2 und 4 annähernde Geschwindigkeitsverläufe in der Kanalmitte bei einer Höhe von ca. 1 m im Reaktor aufstellen. Die Geschwindigkeitsverläufe lassen sich dann mit den errechneten Werten aus den Simulationen vergleichen wie in Abbildungen 12 und 13 zu sehen sind.

Die Verläufe weisen eine gute Übereinstimmung hinsichtlich der Größenordnungen der Geschwindigkeiten im Reaktor auf, es gibt jedoch im Detail Abweichungen der Geschwindigkeitsschwankungen über die Zeit.

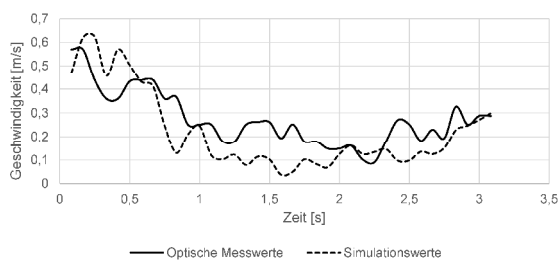


Abbildung 12: Vergleich der simulierten Werte der Variante B mittig im Kanal 2 mit denen von Kameraaufnahmen des Fluidverhaltens im ersten neuen Testreaktorprototypen

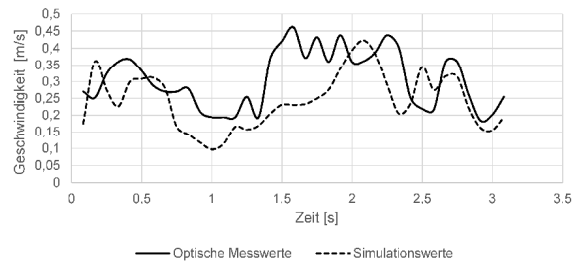


Abbildung 13: Vergleich der simulierten Werte der Variante B mittig im Kanal 4 mit denen von Kameraaufnahmen des Fluidverhaltens im ersten neuen Testreaktorprototypen

Wie bereits weiter oben erwähnt, ist das Ziel der Simulationen bzw. Strömungsmodellierung in erster Linie die Abschätzung und Vergleich von Geschwindigkeiten, nicht die genaue Abbildung der Schwankungen der einzelnen Fluidteilchen. Somit deutet diese erste Modellkontrolle auf ein zufriedenstellendes Ergebnis hin. Das Modell kann aber noch weiter verfeinert werden und es werden vollständige Stereo-PIV-Messungen am Reaktorprototypen angestrebt.

Nächste Schritte im Forschungsprojekt bestehen neben der Weiterentwicklung und Prüfung des Reaktors auch in der Ermittlung eines geeigneten Ansatzes zur PIV-Messung des gesamten Reaktors. Wenn vollständige Messwerte vorliegen, kann auch das Strömungsmodell vollständig validiert werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Mithilfe von Strömungssimulationen, die mit der Software OpenFOAM durchgeführt werden, werden verschiedene Reaktorvarianten hinsichtlich ihres strömungstechnischen Verhaltens untersucht, um einen verbesserten Reaktorentwurf für fassadenintegrierte Photobio-reaktoren zu identifizieren.

Es werden Simulationen mehrerer Varianten durchgeführt, um eine Aussage über die Strömungsbildung in jeder Simulationsvariante zu erhalten. Sowohl die Entwicklung der Geschwindigkeiten über die Reaktorhöhe als auch die numerischen Werte der Zellen im Reaktormodell werden ausgewertet. Durch die schrittweisen geometrischen Veränderungen der Trennstege sowie der Füllhöhe des Algenfluides im Reaktor wird eine Reaktorgeometrie ermittelt, die die Ausbildung hoher horizontaler Strömungsgeschwindigkeiten in der Algenfluidphase begünstigt und auch gleichzeitig ein robustes statisches Verhalten hinsichtlich der auftretenden Spannungen und Lasten aufweist.

Eine erste optische Modellvalidierung anhand eines Reaktorprototypen zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen den errechneten Simulationswerten und den Geschwindigkeiten im Reaktor.

LITERATUR

Blattmann, L. 2016. Primärenergetische Untersuchung von fassadenintegrierten Photobioreaktoren aus Glas, Bachelorarbeit Hochschule für Technik Stuttgart.

Becker, S., Bie, H. D., Sweeney, J. 1999. Dynamic flow behaviour in bubble columns, *Chemical Engineering Science* 54, S. 4929–4935.

Clift, R., Grace, J.R., Weber, M.E. 1978. *Bubbles, Drops, and Particles*, New York, Academic Press.

Greenshields, C.J. 2014. *OpenFOAM - User Guide - Version 2.3.1*, OpenFOAM Foundation.

Greenshields, C.J. 2015. *OpenFOAM - Programmers Guide - Version 3.0.1*. OpenFOAM Foundation.

Hill, D.P. 1998. *The Computer Simulation of Dispersed Two-Phase Flows*, Dissertation, University of London.

Hindersin, S., Leupold, M., Kerner, M., Hanelt, D. 2013. Irradiance optimization of outdoor microalgal cultures using solar tracked photobioreactors, *Bioprocess Biosystems Engineering* 36, S. 345–355.

Hindersin, S., Leupold, M., Kerner, M., Hanelt, D. 2013. Key parameters for outdoor biomass production of *Scenedesmus obliquus* in solar tracked photobioreactors, *Journal of Applied Phycology* 26, S. 2315–2325.

Issa, R. I. 1985. Solution of the Implicit Discretized Fluid Flow Equations by Operator Splitting, *Journal of Computational Physics* 62, S. 40–65.

Leupold, M., Hindersin, S., Kerner, M., Hanelt, D. 2013. The effect of discontinuous airlift mixing in outdoor flat panel photobioreactors on growth of *Scenedesmus obliquus*, *Bioprocess Biosystems Engineering* 36, S. 1653–1663.

Marschall, H. 2011. *Towards the Numerical Simulation of Multi-Scale Two-Phase Flows*,

Dissertation, Technische Universität München.

Patankar, S. V. 1980. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Washington, McGraw-Hill.

Rusche, H. 2002. *Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Flows at High Phase Fractions*, Dissertation, Imperial College London.

Ziegenhein, T., Rzehak, R., Lucas, D. 2014. Transient simulation for large scale flow in bubble columns, Artikel-Preprint to *Chemical Engineering Science*, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf.

DER DIGITALE ZWILLING IN DER ENERGETISCHEN GEBÄUDE- UND ANLAGENSIMULATION

C. Nytsch-Geusen¹, W. Kaul¹ und S. Kharraz²

¹Universität der Künste Berlin, Institut für Architektur und Städtebau, Berlin, Germany

²Technische Universität Berlin, Institut für Energietechnik, Berlin, Germany

Email: nytsch@udk-berlin.de, w.kaul@udk-berlin.de, sina@kharraz.com

KURZFASSUNG

Im internationalen Wettbewerb Solar Decathlon Europe 2014 (SDE 2014) wurde ein solares Plusenergiegebäude als Dachaufsatz für den Gebäudebestand entwickelt und baulich realisiert, welcher die ganzjährige Klimatisierung und Energieversorgung der Wohneinheit ermöglicht. Für dieses Gebäude wurde auf Grundlage der Modellierungssprache Modelica ein detailliertes 1:1 Systemmodell der Gebäudehülle, der Gebäudetechnik und der Gebäudeautomation als sogenannter „digitaler Zwilling“ erstellt. Die Korrektheit des digitalen Abbilds des realen Gebäudes soll über zahlreiche im Baukörper und in der Gebäudetechnik verteilte Sensoren überprüft werden, die an gleicher Stelle auch als virtuelle Sensoren im Simulationsmodell zu finden sind. In einer mehrjährigen energetischen Monitoring-Phase soll die Qualität des Simulationsmodells überprüft und seine Abbildungsgenauigkeit stetig verbessert werden. Der Beitrag stellt sowohl das reale Rooftop-Gebäude inkl. seinem Monitoring-Konzept sowie seinen digitalen Zwilling vor.

ABSTRACT

Within the international competition Solar Decathlon Europe 2014 (SDE 2014) a solar plus energy building as a rooftop living unit for the building stock was being developed and constructional realised, which is able to air-condition and supply it with energy all the year around. For this building, a detailed 1:1 system

model of the building envelope, the HVAC system and the building automation control system was formulated as a so called "digital twin" based on the modelling language Modelica. The correctness of the digital image from the real building should be verified with the help of numerous sensors, distributed in the building construction and the HVAC system, which are also present as virtual sensors at the same place in the simulation model. During a multi-annual energetic monitoring phase, the quality of the simulation model should be evaluated and its model precision continuously be improved. The contribution presents the real Rooftop building incl. the monitoring concept and also its digital twin.

EINLEITUNG

Im Lexikon der Gesellschaft für Informatik wird der digitale Zwilling als digitale Repräsentanz von Dingen aus der realen Welt definiert (GI Lexikon, 2018). Häufig wird der digitale Zwilling über ein Simulationsmodell repräsentiert, welches physische und funktionale Eigenschaften eines Systems aus der realen Welt präzise abbildet. Wird der digitale Zwilling mit realen Daten (Modellparameter, Randbedingungen des dynamischen Betriebs) simuliert, verhält er sich idealer Weise genauso wie sein Gegenstück aus der Realität. Nach der Definition im Gabler Wirtschaftslexikon, 2018 erfordert ein digitaler Zwilling drei Elemente: Das abzubildende reale Objekt, sein digitales Abbild im virtuellen Raum und Informationen, die beide miteinander verbinden. So kann z.B. in einem

realen Objekt mit einem Sensor eine physikalische Systemgröße ermittelt werden (z.B. die Durchflussmenge in einer Rohrleitung), welche im digitalen Zwilling über einen virtuellen Sensor ebenso bestimmt wird.

Digitale Zwillinge werden heute in der Entwicklung von Produkten in den Bereichen Luft- und Raumfahrt, Automotive und bei Produktionssystemen verwendet und begleiten idealerweise den gesamten Produktlebenszyklus. Für die Domäne des Bauwesens wird in Fraunhofer IBP, 2017 der digitale Zwilling als neuer Ansatz beschrieben, bei dem im Gebäudebetrieb dem realen Gebäude ein digitales Datenmodell zur Seite gestellt wird, welches BIM-Datenstrukturen nutzt, Schnittstellen zur Messdatenerfassung des Gebäudes besitzt und durch eine physikalisch begründete Simulation das historische, aktuelle und prognostizierte Gebäudeverhalten des echten Gebäudes beschreiben kann.

Der vorliegende Beitrag fokussiert auf die Erstellung und Verwendung von digitalen Zwillingen im Kontext der energetischen Gebäude- und Anlagensimulation. Als Basis der Erstellung des digitalen Zwillings wird die Modellierungssprache Modelica (Modelica, 2017) verwendet, welche durch ihren objektorientierten Ansatz gut geeignet ist, die Strukturen realer technischer Systeme wie z.B. dem Baukörper eines Gebäudes und die auf Einzelkomponenten basierende Anlagentechnik abzubilden (Nytsch-Geusen et al., 2012). Die Gleichungsorientierung von Modelica unterstützt die Abbildung des physikalischen und funktionalen Verhaltens des realen Gebäudesystems (das Gesamtsystem aus Baukörper und Anlagentechnik), insbesondere in einem detaillierten, äußerst realitätsnahen Simulationsmodell, dem digitalen Zwilling.

Der methodische Ansatz des digitalen Zwillings in der energetischen Gebäude- und Anlagensimulation wurde am Beispiel des Rooftop-Gebäudes aus dem SDE 2014-Wettbewerb prototypisch realisiert und getestet. Das Rooftop-Gebäude eignet sich besonders gut für diesen Zweck, da es einerseits eine ähnliche Gebäudetechnik sowie viele Merkmale des Energiemanagements von deutlich größeren Gebäuden aufweist (Energieproduktion von Strom und Wärme aus Solar- und Umweltenergie, Energiespeicherung in

elektrischen- und thermischen Speichern, dynamischer Wärme-, Kälte- und Strombedarf durch die Gebäudenutzung). Andererseits kann es durch seine Größe von nur 55 m² Nutzfläche in seinem energetischen Verhalten in einem Monitoring nahezu vollständig im Detail erfasst werden. Der Gebäudeentwurf liegt als dreidimensionales BIM-Modell vor und seine Baukonstruktion inkl. der genutzten Gebäudetechnik ist umfangreich dokumentiert (Team Rooftop, 2014). Das Rooftop-Gebäude wurde 2017/2018 auf dem Gelände des Hochschulcampus Berlin-Charlottenburg für Zwecke der Forschung und Lehre wiederaufgebaut und in Betrieb genommen und mit zusätzlicher Sensorik (u.a. für Temperatur, Feuchte, Durchfluss, Solarstrahlung, elektrische Leistung) versehen. Hierdurch sind gute Voraussetzungen für die Erstellung und Parametrierung des digitalen Zwillings in Modelica und seinem Vergleich mit dem realen Gebäude unter Einbeziehung echten Nutzerverhaltens gegeben.

ROOFTOP-GEBÄUDE



Abbildung 1: Konzept des Rooftop-Gebäudes als solarer Dachaufsatz für den Gebäudebestand (Quelle: Team Rooftop)



Abbildung 2: Gebautes Rooftop-Gebäude in Versailles, Frankreich während des SDE 2014 (Quelle: Team Rooftop)

Das Rooftop-Gebäude wurde als solarer Plusenergie-Dachaufsatz für Bestands-Wohngebäude innerhalb des internationalen Wettbewerbs SDE 2014 von einem Berliner

Team aus ca. 40 Studierenden der UdK Berlin und der TU Berlin konzipiert, geplant (vgl. Abb. 1) und baulich umgesetzt (vgl. Abb. 2).

Gebäudehülle

Die individuell verstellbaren, gedämmten und mit Fotovoltaik-Modulen belegten Fassadenelemente auf beiden Gebäudelängsseiten ermöglichen je nach Tages- und Jahreszeit und Gebäudenutzung die gezielte Nutzung passiver solarer Gewinne bzw. eine Sonnenschutzfunktion für den Innenraum oder einen optimierten Fotovoltaik-Ertrag durch eine einachsige Modul-Nachführung (vgl. Abb. 3).

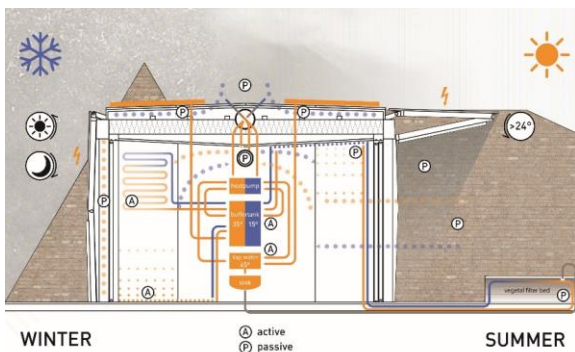


Abbildung 3: Konzept der tages- u. jahreszeitlich adaptiven Fassaden beim Rooftop-Gebäude (Quelle: Team Rooftop)

Der gesamte Baukörper ist als hochgedämmte Holzleichtbaukonstruktion mit hoher Energieeffizienz ausgeführt. Die U-Werte der Fassade, der Dach- und der Bodenelemente liegen im Bereich von 0,112 bis 0,134 W/m²K, die der Glasschiebetüren mit Dreifachverglasung in der der Süd- und Nordfassade bei 1,1 W/m²K.

Die insgesamt 55 m² Nutzfläche des Gebäudes teilt sich in einen großen Wohnraum inkl. offenen Küchenbereich, einem Schlafzimmer und einem dazwischenliegenden kleinen Bad auf. Innerhalb eines in der Mitte liegenden Kernmoduls wird die zentrale Gebäudetechnik (Wärmepumpe, thermische und elektrische Speicher) zusammengefasst (vgl. Abb. 4).

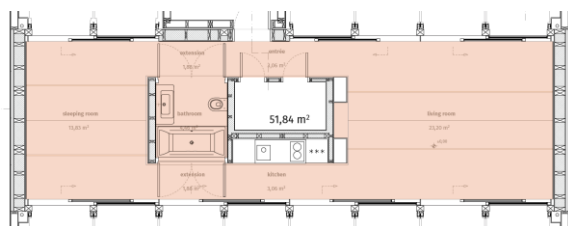


Abbildung 4: Grundriß und funktionale Aufteilung des Rooftop-Gebäudes (Quelle: Team Rooftop)

Gebäudetechnik

In Abb. 5 ist die energetische Gebäudetechnik des Rooftop-Gebäudes visualisiert. Die Dach- und Fassadenfläche des Gebäudes sind mit insgesamt 84 Dünnschicht-Fotovoltaikmodulen mit einer Gesamtleistung von 9,6 kW_{peak} bedeckt. Zwei Drittel der Module ist starr auf dem unbeweglichen Dach montiert und ein Drittel auf den verstellbaren Fassadenelementen. Über eine reversible Luft/Wasser-Wärmepumpe der Firma Viessmann (Type LWZ 304 SOL) mit 4,3 kW Heizleistung (A2/W35) und 3,6 kW Kühlleistung (A35/W7), einem internen Warmwasserspeicher von 235 Litern und einem externen thermischen Pufferspeicher von 200 Litern kann das Gebäude über eine Fußbodenheizung im Winter beheizt und über Kühldecken im Sommer aktiv gekühlt werden. Eine kleine thermische Solaranlage mit 2 Vakuumröhrenkollektoren mit einer Gesamtfläche von 3,2 m² dient zur Warmwasserbereitung und in der Übergangszeit zur Unterstützung der Heizfunktion der Wärmepumpe (vgl. Anlagenschaubild in Abb. 6).

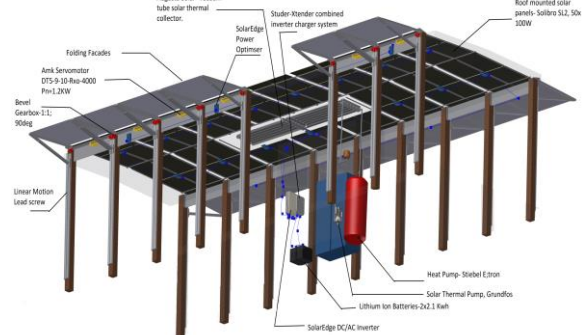


Abbildung 5: Energetische Gebäudetechnik des Rooftop-Gebäudes (Quelle: Team Rooftop)

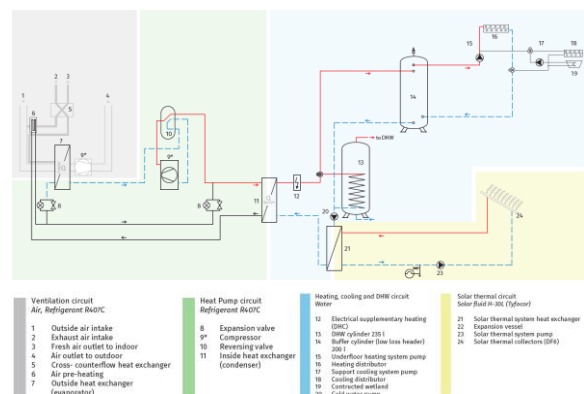


Abbildung 6: Thermisches Energieversorgungssystem des Rooftop-Gebäudes (Quelle: Team Rooftop)

Eine elektrische Batterie mit ca. 5 kWh nutzbarer Kapazität ermöglicht ein Energiemanagement zwischen PV-Stromproduktion, Einspeisung und Entnahme aus dem öffentlichen Stromnetz sowie Eigenbedarf an Wärmepumpen- und Haushaltstrom.

Die Gebäudeleittechnik im Rooftop-Gebäude basiert auf einem OpenHAB-Server in Kombination mit einem Raspberry Pi. Das OpenHAB-Framework zur Gebäudeautomation (<https://openhab.org>) erlaubt eine Integration der Erfassung und Ansteuerung untereinander nicht standardisierter Gebäudetechnikkomponenten auf einer abstrakten Softwareebene, auf der die übergeordnete Steuerungs- und Regelungslogik des Gebäudes implementiert ist.

Wiederaufbau am Hochschulcampus Berlin-Charlottenburg u. energetisches Monitoring

Im Laufe des Jahres 2017 wurde des Rooftop-Gebäude auf dem Gelände des Hochschulcampus Berlin-Charlottenburg wiederaufgebaut (vgl. Abb. 7), wo es zukünftig von der UdK Berlin zusammen mit der TU Berlin für Forschungs- und Lehrzwecke genutzt wird.



Abbildung 7: Wiederaufbau des Rooftop-Gebäudes auf dem Hochschulcampus Berlin-Charlottenburg

Beim Wiederaufbau wurden eine Reihe zusätzlicher Sensoren im Baukörper, im Innenraum und für die Gebäudetechnik ergänzt, um den Zustand des gesamten Gebäudesystems im energetischen Monitoring umfangreich zu erfassen und so eine Vielzahl von Vergleichswerten für das Simulationsmodell des digitalen Zwillinges zu erhalten. Das Außenklima wird über Sensoren für die Lufttemperatur und -feuchte, die Solarstrahlung und die Windgeschwindigkeit und -richtung gemessen. Das Innenraumklima wird über eine Vielzahl

verteilter kombinierter Temperatur- und Feuchtesensoren erfasst. Im Baukörper selbst sind ebenfalls Temperatur- und Feuchtesensoren integriert, so dass auch bauphysikalische Zustände im Monitoring ermittelt werden können (vgl. Abb. 8).



Abbildung 8: Messeinrichtung zur Erfassung der Bauteiltemperaturen und -feuchten in drei Positionen des Querschnitts der Fußbodenkonstruktion

Die thermohydraulischen Kreisläufe der Fußbodenheizungen, Kühldecken und der thermischen Solaranlage sind mit Durchflussmessern und Sensoren zur Erfassung der Vor- und Rücklauftemperaturen ausgestattet, wodurch eine separate Bilanzierung dieser thermischen Teilsysteme möglich ist. Der Zustand der reversiblen Wärmepumpe und der beiden thermischen Speicher wird ebenfalls über Temperatursensoren sowie weiteren Signale, die den Betriebsmodus beschreiben, im Monitoring erfasst. Die Fotovoltaikanlage, die Wechselrichter und die Hausbatterie liefern zahlreiche elektrische Strom-, Spannungs- und Leistungssignale, die zur Energiebilanzierung genutzt werden können.

DIGITALER ZWILLING

Für das Rooftop-Gebäude wurde auf Grundlage von Modelica ein detailliertes Systemmodell der Gebäudehülle, der Gebäudetechnik und der Gebäudeautomation als „digitaler Zwilling“ erstellt. Die Geometrie und die räumliche Gliederung der Gebäudehülle (thermische Zonierung, Anzahl und Position der Wände, Türen und Fenster) sowie die Struktur der Anlagentechnik (z.B. hydraulisches Schema der Heiz- und Kühlkreisläufe) ist hierbei in möglichst

großer Ähnlichkeit zum realen Gebäude im Modelica-Modell nachempfunden.

Modelica-Modellbibliotheken

Grundlage der Modellerstellung ist die kombinierte Nutzung von drei Modellbibliotheken, der Modelica-Standard-Library (<https://github.com/modelica/ModelicaStandardLibrary>), der aus der Annex 60-Bibliothek (Wetter et al., 2015) hervorgegangenen IBPSA 1-Library und der BuildingSystems-Bibliothek (Nytsch-Geusen et al., 2016), in welcher die IBPSA 1-Library integriert ist. Das Simulationsmodell des digitalen Zwillings verwendet insgesamt 41 unterschiedliche Modellklassen aus diesen drei Bibliotheken sowie 4 anwendungsspezifische Modellklassen auf höherer Abstraktionsebene.

Gesamtsystem

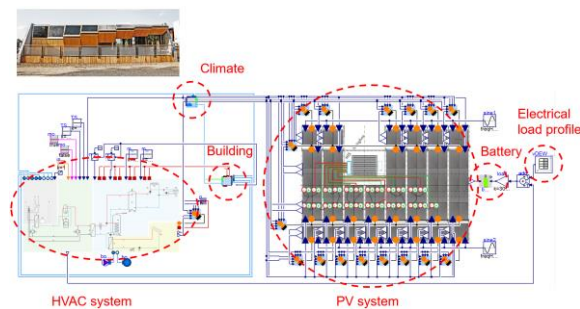


Abbildung 9: Übergeordnetes Systemmodell des Rooftop-Gebäudes

In Abb. 9 ist das übergeordnete Modelica-Systemmodell für das gesamte Rooftop-Gebäude dargestellt. Es besteht aus den Teilmodellen des Außenklimas (Climate), des Gebäudes (Building), des Heizungs- und Klimatisierungssystems (HVAC) und des Fotovoltaiksystems (PV system), der elektrischen Batterie (battery) und dem elektrischen Lastprofil für den Haushaltsstrombedarf (Electrical load profile). Die Gliederung des komplexen Gesamtmodells in diese Teilmodelle trägt zur Übersichtlichkeit der Struktur des digitalen Zwillings bei und ermöglicht die einfache Wiederverwendung dieser immer noch komplexen Teilmodelle in einem anderen Zusammenhang.

Teilsystem Gebäude

Das Teilmodell für die Gebäudehülle ist in Abb. 10 illustriert. Das Gebäudemodell ist in vier thermische Zonen (Zone models) differenziert, entsprechend den vier Räumen des realen Rooftop-Gebäudes.

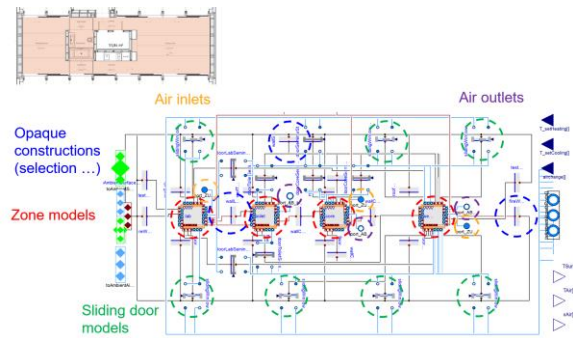


Abbildung 10: Mehrzoniales Teilmodell der Gebäudehülle

Zwischen den Zonen und als Abgrenzung zur Gebäudeumgebung befinden sich die nichttransparenten Baukonstruktionen (Opaque constructions) und die gläsernen großflächigen Schiebetüren auf der Nord- und Südseite des Gebäudes (Sliding door models). Weiterhin enthält das Gebäudemodell Schnittstellen zu den drei Zuluft- (Air inlets) und drei Abluftkanälen (Air outlets), mit denen die Verbindung zu dem Teilmodell der Heizungs- und Klimatechnik hergestellt wird.

Teilsystem Heizungs- und Klimatechnik

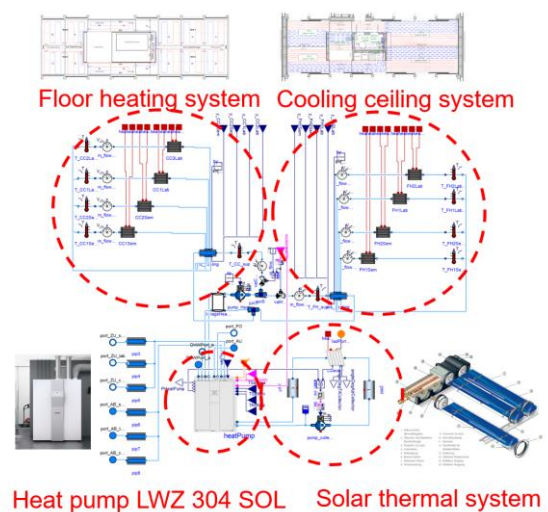


Abbildung 11: Teilmodell der Heizungs- und Klimatechnik

Im Teilmodell der Heizungs- und Klimatechnik sind alle gebäudetechnische Komponenten, die thermische Energie bereitstellen, zusammengefasst (vgl. Abb. 11). Es enthält jeweils vier thermohydraulische Modelle für die Kreisläufe der Fußbodenheizungen (Floor heating system) und der Kühldecken (Cooling ceiling system), weiterhin des herstellerspezifischen Wärmepumpenmodells (Heat pump LWZ 304 SOL), den thermischen Pufferspeicher, die Luftkanalmodelle sowie der thermischen Solaranlage (Solar thermal system).

Teilsystem Fotovoltaikanlage

Das Teilmodell der Fotovoltaikanlage (Abb. 12) repräsentiert die Stromerzeugung über die 84 MPP-geregelte Dünnschichtmodule.

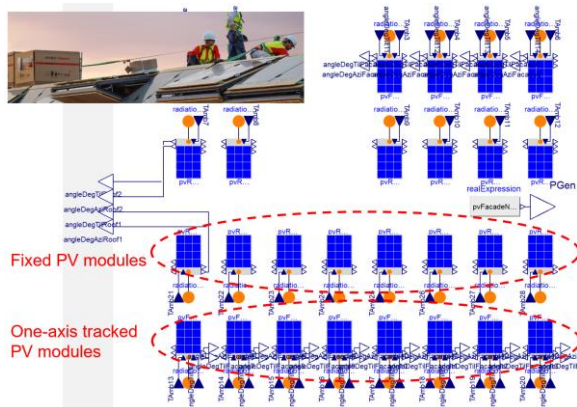


Abbildung 12: Teilmodell der Fotovoltaikanlage

Hierbei werden unterschiedliche Arten von Modulmodellen unterschieden: starre Dachmodule, deren Orientierung (Neigung- und Azimutwinkel) über feste Parameter festgelegt sind und 1-achsig nachgeführte Fassadenmodule, welche pro Fassadenelement eine zusätzliche zeitvariable Eingangsgröße, den Neigungswinkel, aufweisen. So wird auf Systemebene über individuelle Modelle zur Strahlungsumrechnung der jeweils passende Strahlungswert dem Fassadenmodul zugewiesen.

Vergleich reales Gebäude u. digitaler Zwilling

Für einen genauen Vergleich müssen das reale Gebäude und sein digitaler Zwilling auch vergleichbare Systemvariablen besitzen. Hierzu wurden im Simulationsmodell an gleicher Stelle der realen Sensoren virtuelle Sensoren ergänzt, wodurch ein direkter Vergleich berechneter mit gemessenen Werten erfolgen kann.

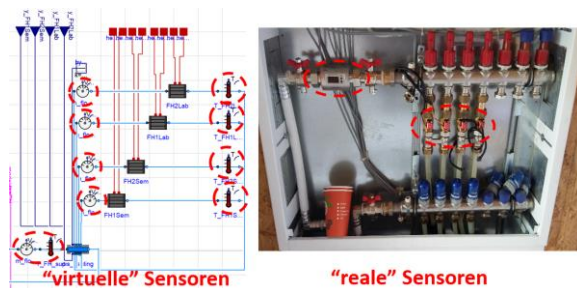


Abbildung 13: Sich entsprechende Sensoren im digitalen Zwilling und im realen Gebäude

Abbildung 13 zeigt beispielsweise die einander entsprechenden Temperatur- und Durchflusssensoren im digitalen Zwilling (links) und im Heizkreisverteiler des realen Gebäudes.

ERGEBNISANALYSE UND DISKUSSION

Messungen am realen Gebäude

In einem mehrjährigen energetischen Monitoring soll die Güte des Simulationsmodells an Hand der Messdaten des realen Gebäudes überprüft und in seiner Abbildungsgenauigkeit stetig verbessert werden. Auf diese Weise soll ein hochwertiges Gebäude- und Anlagenmodell eines realen Gebäudes inkl. seiner Nutzungscharakteristik entstehen, welches z.B. für die energetische Systemanalyse, für des Innenraumklima- und Anlagenmonitoring und für die Entwicklung von prognosebasierten Betriebsführungsstrategien verwendet werden kann.

Im Dezember 2017 wurde das Fußbodenheizungssystem des Gebäudes in Betrieb genommen und erste Messungen zur Erfassung des Innenraumklimas begonnen. Abb. 14 zeigt exemplarisch die gemessene Lufttemperatur im Seminarraum in einer Winterwoche bei laufender Wärmepumpe im Heizmodus, Abb. 15 die gemessene Lufttemperatur während einer Frühlingswoche bei ausgeschalteter Wärmepumpe.

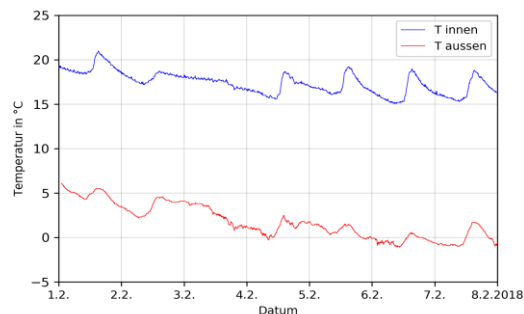


Abbildung 14: gemessene Innenlufttemperatur im Seminarraum des Rooftop-Gebäudes und Außenlufttemperatur während einer Winterwoche (1.2. bis 8.2.2018)

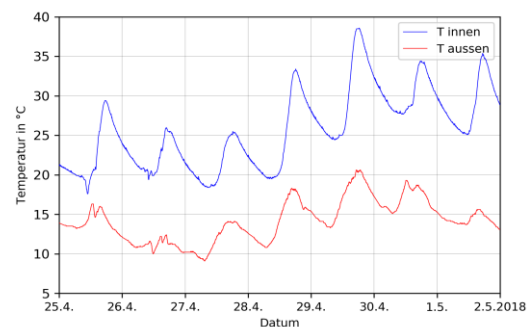


Abbildung 15: gemessene Innenlufttemperatur im Seminarraum des Rooftop-Gebäudes und Außenlufttemperatur während einer Frühlingswoche (25.4. bis 2.5.2018)

Die Messwerte der Winterwoche zeigen an Hand der zwischen 15 und 21 °C schwankenden Raumtemperatur, dass die Leistungsregelung

der Fußbodenheizung noch nicht optimal eingestellt ist. Der Verlauf der Raumtemperatur im Frühling verdeutlicht, dass das frei schwingende Innenraumklima auf Grund des hohen Dämmstandards der Gebäudehülle bei nicht vorhandener Abschattung der Fassaden (die adaptiven Fassadenelemente waren zurzeit der Messkampagne noch nicht montiert) zum Überhitzen neigt (Spitzenwerte bis 38 °C).

Simulationsanalyse (digitaler Zwilling)

Für das Modelica-Simulationsmodell des digitalen Zwillings wurde als Plausibilitätstest eine Jahressimulation mit Dymola 2018 FD1 mit einem Meteonorm-Wetterdatensatz für den Standort Berlin-Tempelhof durchgeführt, wofür auf einem aktuellen PC ca. 1 Stunde Rechenzeit erforderlich ist. In diesem Simulationsszenario wird das Gebäude im Winter beheizt, aber noch nicht im Sommer aktiv gekühlt.

Abb. 16 zeigt den jährlichen Verlauf der Solarstrahlung sowie der Außenluft- und Himmelstemperatur, welche für die Energiebilanz des Gebäudes, die Effizienz der Luft-Wasser-Wärmepumpe und dem solaren Ertrag der PV-Anlage entscheidend sind.

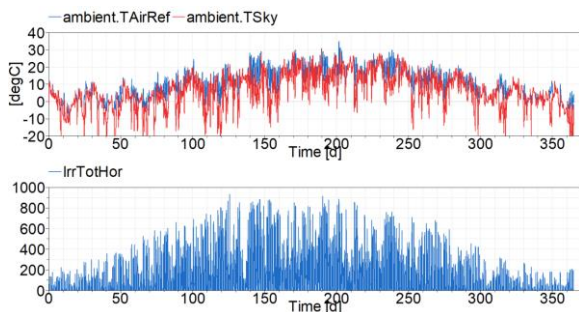


Abbildung 16: Klimarandbedingungen der Simulation, Außenluft- und Himmelstemperatur (oben) sowie Gesamtstrahlung horizontal (unten)

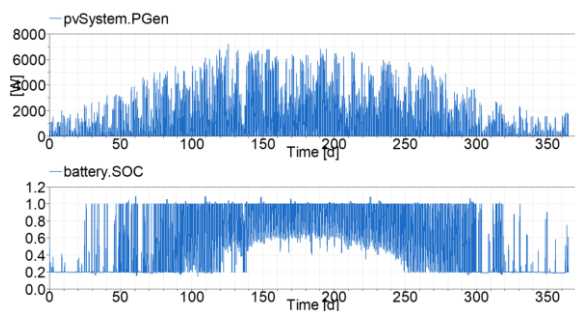


Abbildung 17: Simulierte Leistung des PV-Generators (oben) sowie Ladezustand (SOC) der Batterie (unten)

Abb. 17 verdeutlicht den hohen Energiegewinn der PV-Anlage im Sommer und die deutlich reduzierte Stromproduktion in der Heizperiode,

weshalb die Hausbatterie jahreszeitlich sehr unterschiedliche Ladezustände zeigt. Abb. 18 zeigt die jährliche Entwicklung der Lufttemperaturen im Seminarraum und im Laborbereich sowie die benötigte Heizleistung in beiden Räumen, wobei während der Simulationsrechnung die verstellbaren Fassadenelemente immer geöffnet und die Schiebetüren geschlossen waren.

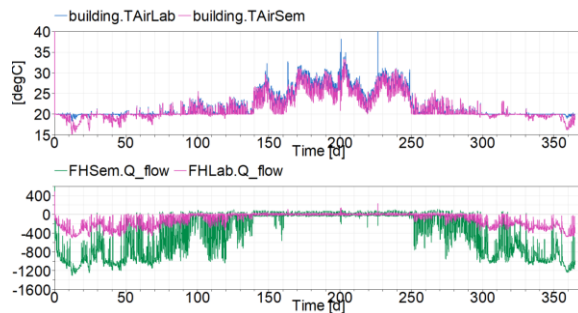


Abbildung 18: Simulierte Raumlufttemperaturen (oben) und abgegebene Leistung der Fußbodenheizungen (unten)

Die sommerlichen hohen Innenlufttemperaturen zeigen, wie wichtig eine abgestimmte Lüftungs- und Verschattungsstrategie für das Rooftop-Gebäude ist.

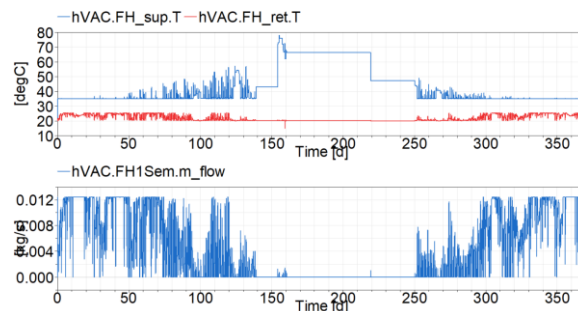


Abbildung 19: Simulierte Vor- u. Rücklauftemp. (oben) und Massenstrom eines Fußbodenheizkreislafs (unten)

Der Verlauf der Vor- und Rücklauftemperaturen in Abb. 19 zeigt, dass die solare Vorwärmung des Heizkreislaufes im Frühling zu einem höheren Temperasturniveau als die 35°C Solltemperatur für die Wärmepumpe. Der Massenstrom in der Fußbodenheizung unbd damit auch die Heizleistung ist außerhalb der Heizperiode i.d.R. null, was auch Abb. 18 widerspiegelt. Die genauere Betrachtung einer Woche im März noch in der Heizperiode in Abb. 20 veranschaulicht das Energiemanagement der Hausbatterie. Während am Vormittag die Batterie noch geladen werden kann, wird danach der Überschussstrom ins Netz eingespeist. Am Abend wird zunächst die Batterie entladen, bevor während der Nacht Strom nach Entladung der Batterie aus dem Netz Strom zum Betrieb der Wärmepumpe bezogen wird.

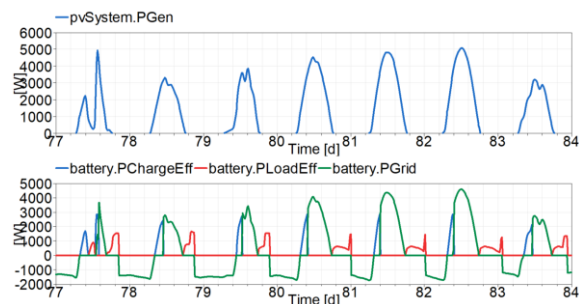


Abbildung 20: Simulierte Leistung des PV-Generators (oben), elektr. Ladeleistung (blau) und elektrische Last (rot) an der Batterie sowie Netzbezug/-einspeisung (grün) in einer Frühlingswoche (unten)

ZUSAMMENFASSUNG

Auf Grundlage bestehender Modelica-Modellbibliotheken wurde ein digitaler Zwilling in Form eines detaillierten, gleichartig strukturierten Simulationsmodells eines realen Forschungsgebäudes (Rooftop-Gebäude des SDE 2014) modelliert. In diesem Simulationsmodell ist eine Vielzahl an virtuellen Sensoren integriert, welche als physikalischen Sensoren ebenfalls im realen Gebäude wiederzufinden sind. Hierdurch ist eine direkte Vergleichbarkeit des realen und des virtuellen Systems gegeben.

Die Messkampagne im realen Gebäude hat Ende 2017 mit einem noch beschränkten Umfang an Sensoren begonnen, deren Art und Anzahl im Jahr 2018 für die Gebäudehülle, das Innenraumklima und das gesamte Spektrum der Gebäudetechnik stetig erweitert werden wird. In der zweiten Jahreshälfte 2018 werden dann voraussichtlich erstmals ausreichend Messdaten zur Verfügung stehen, um das reale Gebäude und seinen digitalen Zwilling umfassend zu vergleichen.

AUSBLICK

Es ist geplant, in der jetzt begonnenen mehrjährigen Messkampagne möglichst viele mit dem digitalen Zwilling vergleichbare Systemgrößen aufzuzeichnen, um dessen Modellqualität und Prognosefähigkeit kontinuierlich zu verbessern. Hierbei sollen insbesondere auch die Einflüsse des Nutzerverhaltens des Gebäudes auf dessen Energiebilanz detailliert analysiert werden.

DANKSAGUNG

Ein Teil der in diesem Beitrag dargestellten Forschungsergebnisse wurden im Projekt

WaveSave – Planung und Steuerung von dezentralen Energiesystemen in Gebäuden zur nachhaltigen, ressourcenschonenden wirtschaftlichen Strom- u. Wärmeversorgung erarbeitet (Förderkennzeichen: 03ET1312B, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie).

LITERATUR

Fraunhofer IBP 2017. Digital Twin: https://www.bau.fraunhofer.de/content/dam/bau/de/documents/BAU2017/IBP_261_DigitalTwins_rz_web.pdf (abgerufen am 3.5.2018)

GablerWirtschaftslexikon 2018. Digitaler Zwilling: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/digitaler-zwilling-54371> (abgerufen am 3.5.2018)

GI-Lexikon 2018. Digitaler Zwilling: <https://gi.de/informatiklexikon/digitaler-zwilling> (abgerufen am 3.5.2018)

Modelica 2017. Modelica – A unified object-oriented language for system modeling. Language specification. Version 3.4, Modelica Association.

Nytsch-Geusen, C.; Huber, J.; Ljubijankic, M.; Rädler, J. 2012: Modelica BuildingSystems - Eine Modellbibliothek zur Simulation komplexer energietechnischer Gebäudesysteme. Conference Proceedings BAUSIM 2012, Berlin, Deutschland.

Nytsch-Geusen, C.; Banhardt, C.; Inderfurth, A.; Mucha, K.; Möckel, Jens; R., Jörg; Thorade, M.; Tugores, C. 2016. BuildingSystems – Eine modular hierarchische Modell-Bibliothek zur energetischen Gebäude- und Anlagensimulation. Conference Proceedings BAUSIM 2016 IBPSA. Dresden, Deutschland.

Team Rooftop 2014, Deliverable 6 & 7 im Solar Decathlon Europe 2014. Wettbewerbsdokumentation des Team Rooftop-Projekts. Universität der Künste Berlin und Technische Universität Berlin, Deutschland.

Wetter, M.; Fuchs, M.; Grozman, P.; Helsen, L.; Jorissen, F.; Lauster, M.; Müller, D.; Nytsch-Geusen, C.; Picard, D.; Sahlin, P.; Thorade, M. 2015. IEA EBC Annex 60 Modelica Library - An international collaboration to develop a free open-source model library for buildings and community energy systems. Proceedings Building Simulation Conference 2015, Hyderabad, Indien.

MODELLIERUNG EINER SOHLPLATTENKÜHLUNG MIT TRNSYS UND UNTERSUCHUNG DER EFFIZIENZ AM BEISPIEL EINES KLEINEN MEHRFAMILIENHAUSES

A. Radermacher¹ und A. Maas¹

¹Universität Kassel, Fachgebiet Bauphysik, Kassel, Germany

KURZFASSUNG

Im Rahmen des Nachweises zum sommerlichen Wärmeschutz nach DIN 4108-2 ist die Berücksichtigung einer passiven Kühlung möglich. Die dabei zum Einsatz kommenden Systeme weisen einen geringen Energiebedarf auf, da Energie ausschließlich zur Förderung des Kühlmediums aufgewendet wird. Sie können z. B. mithilfe eines Flächenheizsystems in Kombination mit einer Sohlplattenkühlung realisiert werden. Die Effizienz solcher Systeme ist bislang nicht hinreichend überprüft. Im Rahmen einer Dissertation wird die Sohlplattenkühlung für ein kleines Mehrfamilienhaus untersucht. Eine Parameterstudie anhand thermisch-dynamischer Simulationen mit TRNSYS stellt die Möglichkeiten und Grenzen des Systems heraus. Der folgende Beitrag zeigt Ergebnisse zur Einhaltung der normativen Anforderungen und zur Effizienz der Sohlplattenkühlung.

ABSTRACT

When analysing the heat protection in summer by the German standard DIN 4108-2, it is possible to take into account passive cooling systems. Such systems are characterized by a low energy demand because energy is only required for transporting the heat transfer medium. One example is the use of thermally active building components combined with cooling via the base plate. The efficiency of such systems is not proved sufficiently yet. Within the scope of a dissertation the base plate cooling is analysed for a small multi-family house. A parametric study by thermal dynamic simulations with TRNSYS shows the possibilities and limits of the system. This paper shows the results of

achieving the normative requirements and the efficiency of the base plate cooling.

EINLEITUNG

Um dem erhöhten Einsatz einer aktiven Kühlung von Gebäuden entgegenzuwirken, sollte das Minimieren der Wärmebelastung im Sommer mittels passiver Kühlsysteme einen hohen Stellenwert bei der Planung energieeffizienter Gebäude aufweisen. Verschiedene Untersuchungen zeigen jedoch, dass Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Systeme maßgeblich von der Auslegung der Anlagen abhängen und hier häufig Fehler vorliegen (vgl. Radermacher, 2013 und Bockelmann et al., 2010). Es fehlt jedoch an konkreten Planungsgrundlagen, unter welchen baulichen, klimatischen, geologischen und nutzungstechnischen Randbedingungen die Systeme einen hohen Nutzen darstellen.

Die passive Kühlung gemäß DIN 4108-2 umfasst Systeme, bei denen Energie ausschließlich zur Förderung des Kühlmediums erforderlich ist. Dies können beispielsweise thermisch aktivierte Bauteile mit Nutzung eines Sohlplattenkühlers oder Erdwärmeübertragers sein oder Systeme mit Kühlung über indirekte Verdunstung, auch als adiabate Kühlung bekannt. Insbesondere wasserführende thermisch aktivierte Bauteile bieten sich zur passiven Kühlung an. Zu ihren positiven Eigenschaften zählen u. a. die geringen Zusatzinvestitionen, wenn sie ohnehin als Beheizungssystem zum Einsatz kommen, und das für Erdwärmesysteme geeignete Temperaturniveau. Auch im Wohnungsbau ist ein zunehmendes Interesse an solchen Systemen zu beobachten (vgl. Plate, 2016). Als Bauteilkühlsysteme sind sowohl

Deckensysteme, wie die Betonkernaktivierung, als auch die Fußbodenheizung einsetzbar.

Bei der Sohlplattenkühlung handelt es sich um Rohrregister in oder unterhalb der Bodenplatte, in denen Wasser fließt, welches der Raumluft im Gebäude Wärme entzieht und diese an das Erdreich abgibt. Das Prinzip ist in Abbildung 1 für den Sommerbetrieb dargestellt. Vorteile sind das Vermeiden aufwändiger Bohrungen sowie die Verwendung des für das Kellergeschoss ohnehin auszuhebenden Erdreichs zur Wärmeabfuhr, sodass relativ geringe Zusatzinvestitionen erforderlich sind.

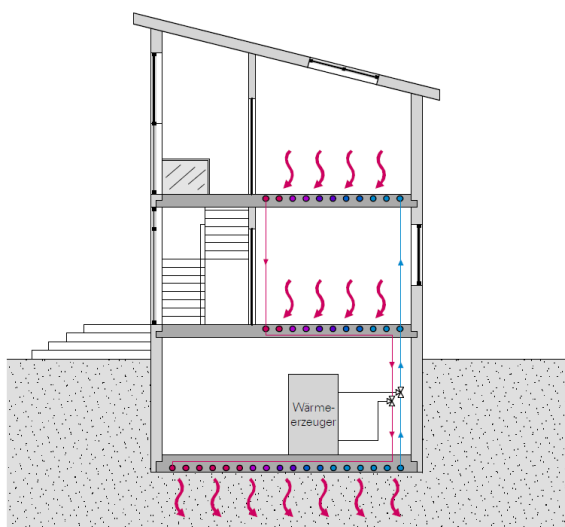


Abbildung 1: Prinzip der Bauteilaktivierung mit Kühlung über die Sohlplatte. Im Winter kann das System der Beheizung dienen.

Unter welchen Randbedingungen eine Bauteilaktivierung kombiniert mit einer Sohlplattenkühlung einen hohen Nutzen aufweist, sollen thermische Simulationen für ein kleines Mehrfamilienhaus zeigen. Die Untersuchungen erfolgen in Form von Parameterstudien mithilfe der Simulationsumgebung TRNSYS. Die Simulationen werden auf Basis der Randbedingungen gemäß DIN 4108-2 durchgeführt und somit anhand der Anforderungsgröße der Übertemperaturgradstunden ausgewertet.

GRUNDLAGEN DES SOMMERLICHEN WÄRMESCHUTZES

DIN 4108-2 formuliert Mindestanforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz und verfolgt das Ziel, durch bauliche Maßnahmen weitgehend sicherzustellen, dass keine

unzumutbar hohen Innentemperaturen entstehen. Bei den Parametern, die den sommerlichen Wärmeschutz im Wesentlichen bestimmen, handelt es sich um Sonnenschutz, Nutzungsart, Klimaregion, Bauart, Luftwechsel und Fenstergröße. Die Berücksichtigung passiver Kühlsysteme ist beim Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes seit der letzten Novellierung der Norm im Jahr 2013 möglich. Neben dem vereinfachten Sonneneintragskennwerte-Verfahren besteht die Möglichkeit eines detaillierten Nachweises durch thermisch-dynamische Gebäudesimulation unter Anwendung vorgegebener Randbedingungen. Die Norm fordert dabei die Einhaltung eines Grenzwertes der Übertemperaturgradstunden Gh_x . Diese geben die Summe der Differenzen zwischen den Stundenwerten der operativen Raumtemperatur θ_{op} und einer Grenz- bzw. Bezugstemperatur $\theta_{b,op}$ an, sofern die operative Temperatur diese überschreitet. Für die Übertemperaturgradstunden gilt somit folgende Gleichung:

$$Gh_{\theta_{b,op}} = \sum_{i=1}^{8760} (\theta_{op} - \theta_{b,op}) \cdot 1h \Big|_{pos.} \quad (1)$$

Die Grenztemperatur liegt je nach vorliegender Klimaregion A, B oder C des Standortes in Deutschland bei 25 °C, 26 °C oder 27 °C. Bei dem Grenzwert der Übertemperaturgradstunden wird nach Wohn- und Nichtwohngebäuden unterschieden. Für Wohngebäude sind maximal 1200 Kh/a, für Nichtwohngebäude maximal 500 Kh/a zulässig.

SIMULATIONSMODELL

Insbesondere im Wohnungsbau bietet sich eine Sohlplattenkühlung an, da die – aufgrund der guten Komforteigenschaften und der Vorteile des niedrigen Temperaturniveaus – ohnehin häufig einbaute Fußbodenheizung ohne hohe Mehrinvestitionen im Sommer zur Kühlung eingesetzt werden kann. Im Bürobau liegen hingegen häufig hohe Geschosshöhen vor, womit die Wirksamkeit nachlässt. Daher wird ein kleines Mehrfamilienhaus für die Simulationen herangezogen, welches mit nur sechs Wohneinheiten und drei Geschossen einen sinnvollen Anwendungsfall darstellt. Es ist in Abbildung 2 als Grundriss und in Abbildung 3 perspektivisch abgebildet. Die Außenmaße basieren auf (Klauß et al., 2010). Das MFH

wurde jedoch statt als zweiseitig bebautes MFH als freistehendes konstruiert und hinsichtlich der Fensterflächenanteile modifiziert. Da der Grundriss symmetrisch aufgebaut ist, wird nur eine Gebäudehälfte in der Simulation abgebildet. Die Auswertungen erfolgen für die westlich orientierten Wohnungen (linke Gebäudehälfte).

Hinsichtlich des Gebäudemodells erfolgt eine Variation der Parameter Bauart, Sonnenschutz, Luftwechsel und der Anzahl der Geschosse.

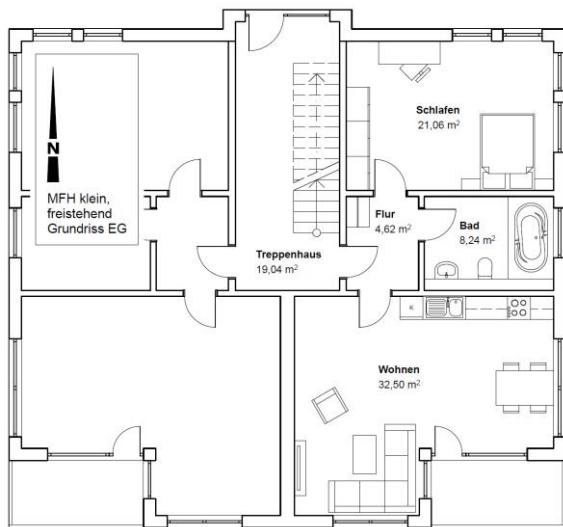


Abbildung 2: Grundriss Erdgeschoss des kleinen freistehenden Mehrfamilienhauses, erstellt und modifiziert auf Basis von (Klauß et al., 2010).



Abbildung 3: Südostansicht des kleinen freistehenden Mehrfamilienhauses, erstellt und modifiziert auf Basis von (Klauß et al., 2010).

Auf anlagentechnischer Seite werden Rohrdicken, Rohrabstände sowie Massenströme variiert. Die Positionierung der Rohre in den Geschossdecken erfolgt im Estrich mit dem Zweck einer Fußbodentemperierung, welche im Winter der Beheizung dient. Die thermisch

aktivierten Geschossdecken werden mithilfe des TRNSYS-Types 360 „floor heating and hypocaust“ abgebildet. Für die Modellierung der thermisch aktivierten Sohlplatte existiert aktuell keine adäquate TRNSYS-Komponente. Daher wird die Sohlplattenkühlung anhand des Erdkollektor-Types 710 modelliert. Das Berechnungsmodell dieses Types beruht auf zweidimensionaler Wärmeleitung im Erdreich und einer instationären Energiebilanz für die Kopplung mit dem Wärmeträgerfluid, gelöst mit Finite-Differenzen-Schemen.

Die Modellgenauigkeit wurde durch die Entwickler durch Messungen überprüft, vgl. (Hirsch et al. 2016) und (Janßen et al. 2016). Der Type 710 wird üblicherweise für die Position im unbebauten Gelände verwendet, lässt jedoch eine Verknüpfung an die Gebäudeunterseite zu. Abbildung 4 zeigt die kombinierten relevanten Types des TRNSYS-Modells schematisch.

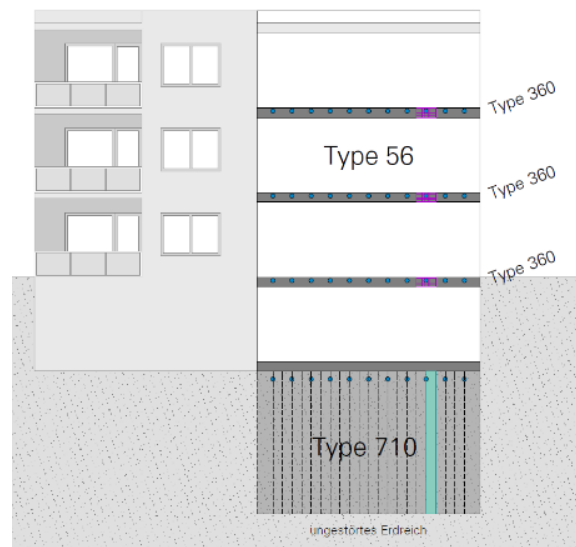


Abbildung 4: Schematische Darstellung der kombinierten relevanten Types. Type 56: Gebäudemodell, Type 360: Bauteilaktivierung, Type 710: Erdkollektor.

Hinsichtlich der standortspezifischen Randbedingungen erfolgen die Simulationen für die drei Klimaregionen A, B und C anhand von TRY-Klimadatensätzen des Deutschen Wetterdienstes sowie für verschiedene Erdreichparameter.

Für die Parameterstudie wird zunächst ein Basisfall festgelegt. Anschließend werden davon abweichend verschiedene Parameter variiert und dem Basisfall gegenübergestellt. Die Randbedingungen dieses Basisfalls sind in Tabelle 1 dokumentiert.

Tabelle 1: Randbedingungen des Basisfalls.

Kategorie	Erläuterung
Erdreichparameter	$\lambda = 1,5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, $\rho = 2000 \text{ kg}/\text{m}^3$, $c_p = 1 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
Rohrdurchmesser außen	Sohlplattenkühlung $d = 25 \text{ mm}$
	Bauteilaktivierung $d = 16 \text{ mm}$
Rohrabstände	Rohrabstand der Sohlplattenkühlung 30 cm
	Rohrabstand der Bauteilaktivierung 15 cm
Massenstrom Sohlplatte	Variierend je nach Bedarf 375, 750, 1125 oder 1500 kg/h, wenn $\theta_i > 23 \text{ }^\circ\text{C}$ in einer Zone und $\theta_{e,\text{Tagesmittel}} > 12 \text{ }^\circ\text{C}$ (Heizgrenze)
Massenstrom Bauteilaktivierung	250 kg/h
Wärmeschutz der Bauteile	Außenwand: $U = 0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
	Kellerdecke: $U = 0,66 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
	Bodenplatte: $U = 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
	Fenster: $U_w = 1,3 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, $g = 0,55$
Bauart	mittlere ($C_{\text{wirk}}/A_G = 90 \text{ Wh}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$)
Heiztemperatur (Annahme ideale Heizung)	Wohnungen: $\theta_{i,\text{soll}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
	Keller: $\theta_{i,\text{soll}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$
Sonnenschutz	Variation Abminderungsfaktor F_c Sonnenschutz zwischen 0 und 1
Grundlüftung	$n_{\text{Grund}} = 0,5 \text{ h}^{-1}$
Taglüftung (6:00 Uhr bis 23:00 Uhr)	erhöhte Taglüftung mit $n = 3 \text{ h}^{-1}$ bei Überschreitung $\theta_i > 23 \text{ }^\circ\text{C}$ und $\theta_i > \theta_e$, sonst n_{Grund}
Nachtlüftung (23:00 Uhr bis 6:00 Uhr)	ohne erhöhte Nachtlüftung (nur n_{Grund})
Interne Wärmeeinträge	Interne Wärmeeinträge von $100 \text{ Wh}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$
Klimadaten	Testreferenzjahr „mittleres Jahr“ Klimaregion 04 Potsdam
Geschosszahl	3 (EG, OG und DG)

MÖGLICHKEITEN UND GRENZEN DES TRNSYS-MODELLS

Bevor eine Auswertung der Parameterstudie stattfindet, erfolgt eine kritische Betrachtung des TRNSYS-Simulationsmodells. Hinsichtlich der Modellierung erdberührter Bauteile beinhalten die verfügbaren TRNSYS-Komponenten leider keine zufriedenstellende Lösung. Eine realistische Temperaturrandbedingung für erdberührte Bauteile lässt sich schwer definieren, da das Erdreich üblicherweise als

ungestört betrachtet wird. Ein Einfluss der Erdreichtemperatur durch das Gebäude selbst kann mithilfe der Standardkomponenten nicht abgebildet werden. Auch Berechnungen mit Zusatzkomponenten (z. B. TESS-Types) lieferten nicht den erwarteten Effekt der Erdreicherwärmung durch das Gebäude. Eine Abbildung der geothermisch aktivierten Bodenplatte anhand des Types 360 war ebenso nicht möglich, bzw. führte zu sprunghaften Temperaturverläufen in der Bodenplatte.

Aus diesem Grund wurde stattdessen das Erdkollektormodell des Types 710 für die Bodenplatte verwendet. Trotz Verknüpfung an die Bodenplatte des Gebäudemodells äußert sich allerdings nicht der erwartete deutliche Einfluss der Eigenschaften des unteren Gebäudeabschlusses auf das Erdreich und die Effizienz. Jedoch ist im Gegensatz zu anderen getesteten Modellen eine anfängliche Erdreicherwärmung erkennbar. Tabelle 2 zeigt die Entwicklung der Übertemperaturgradstunden des kleinen MFH über einen Zeitraum von zehn Jahren. In den ersten Jahressimulationen ist eine Erhöhung der Erdreichtemperaturen zu beobachten mit der Folge steigender Übertemperaturgradstunden; nach fünf Jahren entstehen nahezu gleichbleibende Temperaturverläufe. Eine Erdreicherwärmung besteht somit nur zu Beginn der Berechnungen. Aufgrund der stark nachlassenden Erwärmung von unter 6 % nach dem dritten Jahr, erfolgen die Parameterstudien jeweils nur für drei Jahre – auch mit Hinblick auf die erforderliche Rechenzeit.

Tabelle 2: Veränderung der Übertemperaturgradstunden über einen Zeitraum von 10 Jahren für den Basisfall bei einem F_c -Wert des Sonnenschutzes von 0,7.

Jahr	1	2	3	4	5
Gh ₂₆ [Kh/a]	266,9	489,1	586,3	619,7	631,5
Steigerung ggü. Vorjahr [%]	-	83,2	19,9	5,7	1,9

Jahr	6	7	8	9	10
Gh ₂₆ [Kh/a]	634,9	636,6	637,2	637,7	637,7
Steigerung ggü. Vorjahr [%]	0,5	0,3	0,1	0,1	0,0

Da das Simulationsmodell nicht optimal auf das Kühlsystem abgestimmt ist, lassen sich nicht alle Effekte abbilden. Es können keine sicheren Aussagen zum Einfluss der

Bodenplattenkonstruktion auf die Effizienz getroffen werden, da Berechnungen geringfügige Differenzen ergaben. Dennoch lassen sich Angaben zur Effizienz und zu den Einflüssen anderer Parameter treffen.

ERGEBNISSE DER PARAMETERSTUDIE

Im Folgenden werden für verschiedene Parametervariationen die Übertemperaturgradstunden in Abhängigkeit vom Abminderungsfaktor des Sonnenschutzes F_c dargestellt. Zusätzlich ist der Grenzwert der Übertemperaturgradstunden für Wohngebäude mit 1200 Kh/a eingetragen. So ist auf einfache Weise sichtbar, welche Qualität ein Sonnenschutz aufweisen müsste, damit die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz eingehalten werden. Außenliegende Sonnenschutzvorrichtungen weisen üblicherweise F_c -Werte von 0,25 (Jalousie/Raffstore, 45°-Stellung) bis 0,50 (Vordächer/Markisen) auf, innenliegende Werte von 0,65 (weiß/hoch reflektierend) bis 0,9 (dunkle Farben/höhere Transparenz).

Die Berechnungen erfolgen für die westlich orientierten Wohnungen. Die Abweichungen der Übertemperaturgradstunden zwischen den drei Geschossen sind relativ gering, wobei das Erdgeschoss erwartungsgemäß aufgrund der Angrenzung an das kühlere Kellergeschoss die geringsten Übertemperaturgradstunden aufweist. Im Wohnzimmer im 1. Obergeschoss kommt es gegenüber dem Wohnzimmer im Dachgeschoss in den meisten Fällen zu leicht höheren Übertemperaturgradstunden. Schlafzimmer, Bad und Flur weisen aufgrund der Ausrichtung und geringeren Fensterflächenanteile sehr geringe Übertemperaturgradstunden auf und unterschreiten stets den Anforderungswert nach DIN 4108-2. Das Wohnzimmer des 1. OG stellt somit den kritischsten Raum dar, weshalb die folgenden Auswertungen nur diesen Raum betreffen. Dabei beziehen sich die Ergebnisse immer auf das dritte Jahr der Berechnungen. Mit der Angabe „(Basis)“ ist jeweils kenntlich gemacht, welcher Fall dem in Tabelle 1 beschriebenen Basisfall entspricht.

Insgesamt betrachtet ist eine hohe Effizienz des passiven Kühlsystems der Sohlplattenkühlung festzustellen. Die erste in Abbildung 5 dargestellte Parametervariation zeigt

verschiedene Variationen des Luftwechsels. Zudem sind dieselben Luftwechselkonfigurationen für den Wohnraum ohne Sohlplattenkühlung in grau zu sehen. Dies macht deutlich, welchen hohen Nutzen die Sohlplattenkühlung hier aufweist.

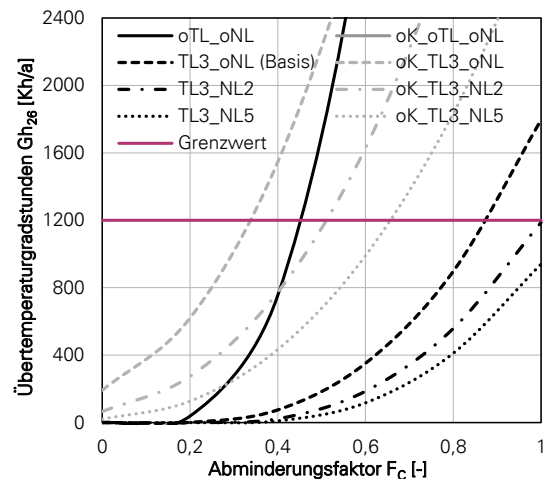


Abbildung 5: Übertemperaturgradstunden G_{h26} in Kh/a für verschiedene Luftwechselkonfigurationen – mit und ohne Sohlplattenkühlung. Abkürzungen: oTL = ohne Taglüftung ($n_{Grund} = 0,5 \text{ h}^{-1}$); oNL = ohne Nachtlüftung ($n_{Grund} = 0,5 \text{ h}^{-1}$); TL3 = erhöhte Taglüftung ($n_{Tag} = 3 \text{ h}^{-1}$); NL2 [5] = erhöhte Nachtlüftung ($n_{Nacht} = 2 \text{ h}^{-1}$ [5 h^{-1}]); oK = ohne Kühlung.

Der Fall „ohne Kühlung, ohne Tag- und Nachtlüftung“ ist in der Grafik nicht sichtbar, da die Übertemperaturgradstunden bereits bei einem F_c -Wert von 0 derart hoch sind, dass sie außerhalb der Ordinatengrenze liegen. Wird jedoch die Sohlplattenkühlung verwendet, so können die Anforderungen noch mit einem F_c -Wert von maximal ca. 0,45 eingehalten werden. Die Anwendung einer erhöhten Taglüftung in Kombination mit der Sohlplattenkühlung senkt die Übertemperaturgradstunden maßgeblich, sodass die Anforderungen bereits mit einem F_c -Wert von 0,85 eingehalten werden, bei zusätzlicher Nachtlüftung sogar bei fehlendem Sonnenschutz. Insofern kann die Aussage getroffen werden, dass die Sohlplattenkühlung eine fehlende Möglichkeit zur Nachtlüftung kompensieren kann und dass sie kombiniert mit einer Tag- und Nachtlüftung die Belastung durch hohe Raumtemperaturen bei fehlendem Sonnenschutz stark senken kann.

Eine leichte Bauart des Gebäudes ($C_{Wirk}/A_G = 49 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) wirkt sich, wie zu erwarten, ungünstig auf den Nutzen der Sohlplattenkühlung aus. Da hier ausnahmsweise der Unterschied zwischen Ober- und

Dachgeschoss verhältnismäßig hoch ist, werden die Ergebnisse beider Geschosse in Abbildung 6 dargestellt. Im Dachgeschoss sinkt der erforderliche maximale F_C -Wert von 0,85 bei mittlerer Bauart auf etwa 0,65 bei leichter Bauart. Eine schwere Bauart ($C_{\text{Wirk}}/A_G = 131 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) verbessert die Effizienz, sodass ein F_C -Wert von ca. 0,9 für das Einhalten der Anforderungen ausreichend wäre.

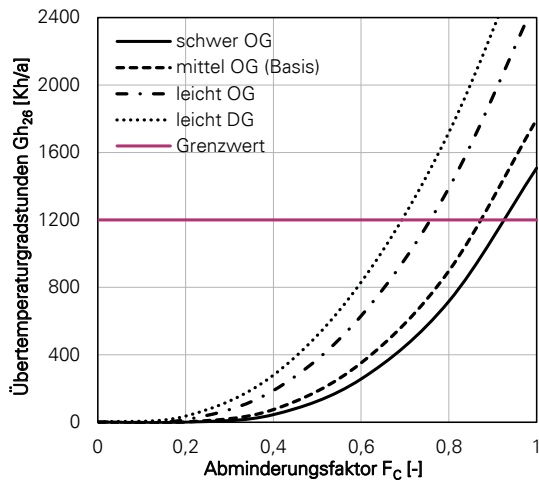


Abbildung 6: Übertemperaturgradstunden G_{h26} in Kh/a bei Variation der Bauart. Aufgrund des hohen Unterschieds zwischen OG und DG bei leichter Bauart, sind hier beide abgebildet.

Durch eine hohe Geschosshöhe des Gebäudes wird die Wirksamkeit der Sohlplattenkühlung stark beeinträchtigt. Dies hängt vor allem mit dem zur Verfügung stehenden Massenstrom in den einzelnen Geschossdecken zusammen. Die Untersuchung des Einflusses erfolgte nach folgendem Zusammenhang: Der Massenstrom in der Sohlplatte beträgt bis zu 1500 kg/h . Das zirkulierende Wärmeträgerfluid (Wasser) teilt sich anteilig auf die Geschossdecken auf, sodass bei einer Geschosshöhe von 3 ein Massenstrom von 500 kg/h je Geschossdecke verfügbar ist. Die mittlere Austrittstemperatur aus den thermisch aktivierten Decken entspricht dann der Eintrittstemperatur in die Sohlplatte. Eine höhere Geschosshöhe führt zu einem geringeren verfügbaren Massenstrom je Geschossdecke und erhöht zudem die Eintrittstemperatur in die Sohlplatte. Der Einfluss auf die Übertemperaturgradstunden ist in Abbildung 7 zu sehen. Bei einer Geschosshöhe von 10 liegt der erforderliche F_C -Wert bei knapp über 0,50.

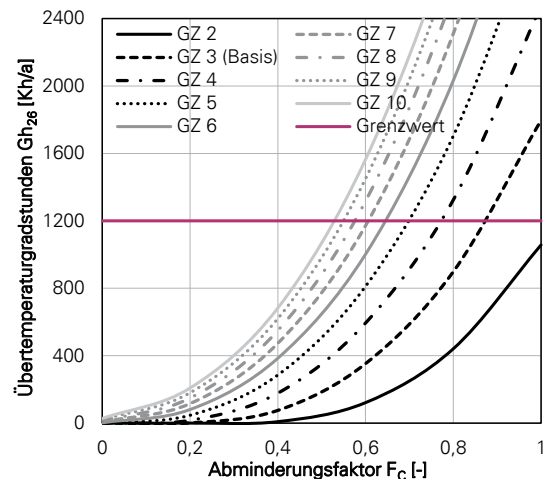


Abbildung 7: Übertemperaturgradstunden G_{h26} in Kh/a für verschiedene Geschosshöhen (GZ).

Eine Verringerung des maximal verfügbaren Massenstroms auf 1000 kg/h hat einen eher geringen Einfluss. Zusätzlich wurde untersucht, wie sich eine abweichende Regelung des Massenstroms auswirkt, bei der dieser konstant 1500 kg/h beträgt, sobald die Raumtemperatur einer Zone auf über 23 $^{\circ}\text{C}$ steigt. Hierbei steigen die Übertemperaturgradstunden leicht an, wie in Abbildung 8 zu sehen. Anzumerken ist hier, dass dadurch auch der Pumpenenergiebedarf steigt, da die Pumpe stets auf höchster Stufe betrieben wird.

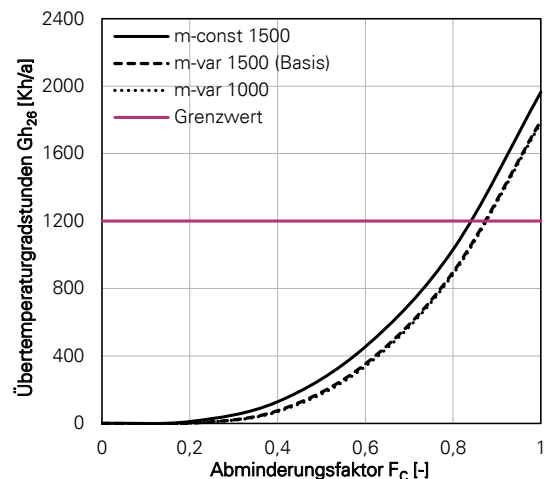


Abbildung 8: Übertemperaturgradstunden G_{h26} in Kh/a bei Variation des Massenstroms in der Sohlplatte.

Abkürzungen: m-const 1500: Der Massenstrom beträgt bei aktiver Sohlplattenkühlung konstant 1500 kg/h . m-var 1500: Er variiert je nach erforderlichem Massenstrom zwischen 4 Stufen.

Einen hohen Einflussfaktor auf die Wirksamkeit der Sohlplattenkühlung stellt die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs dar. Es

wurden vier Varianten untersucht, wobei neben der Wärmeleitfähigkeit auch Rohdichte und spez. Wärmekapazität variiert wurden, um damit verschiedene Gesteinsarten nach VDI 4640 Blatt 1 zu repräsentieren. In Tabelle 3 sind die untersuchten Erdreichparameter dokumentiert. Abbildung 9 zeigt die Übertemperaturgradstunden der vier Varianten.

Tabelle 3: Kennwerte der untersuchten Varianten der Erdreischeigenschaften.

Variante	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spez. Wärmekapazität c_p [kJ/(kg·K)]
E05	0,5	2000	0,75
E15	1,5	2000	1,00
E25	2,5	2200	1,00
E35	3,5	2400	1,00

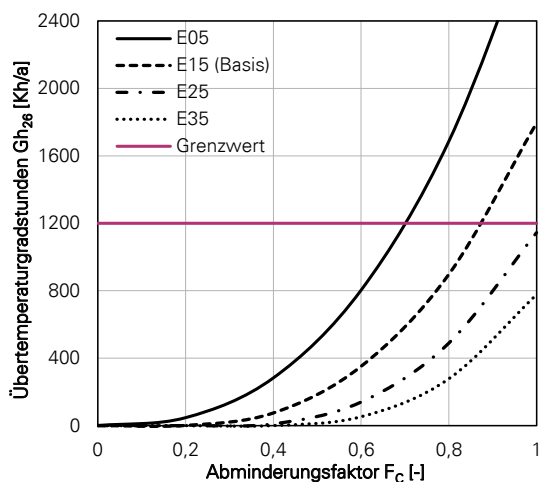


Abbildung 9: Übertemperaturgradstunden G_{h26} in Kh/a für verschiedene Erdreischeigenschaften. Kürzel s. Tabelle 3.

Bei einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit von nur 0,5 W/(m·K), was z. B. trockenen Lockergesteinen wie trockenem Ton/Schluff, Sand oder Kies entspricht, sinkt die Wirksamkeit der Kühlung, sodass für die Einhaltung der Anforderungen statt einem F_c -Wert von 0,85 (Basisfall mit $\lambda = 1,5$ W/(m·K)) ein Wert von maximal 0,7 erforderlich ist. Dies unterstreicht die Wichtigkeit der Kenntnis der vorliegenden Erdreichparameter. Liegen sehr trockene Gesteine in einem Baugrund vor, so ist zu überprüfen, ob dennoch eine Sohlplattenkühlung in Frage kommt oder ob andere Erdreichkühlsysteme eine Alternative darstellen. Liegen höhere Wärmeleitfähigkeiten vor steigt die Wirksamkeit, da die Wärme aus dem

Gebäude gut an das Erdreich abgeführt werden kann. Eine zusätzliche Verbesserung der Wirksamkeit wäre durch Grundwasserströmungen erreichbar. Dies wurde im Rahmen der Arbeit jedoch nicht untersucht.

Ein weiterer zu untersuchender Zusammenhang war die Wirksamkeit des Kühlsystems für andere Klimaregionen, insbesondere bei Jahren mit extremen Sommern. In Abbildung 7 sind die Übertemperaturgradstunden für die drei repräsentierenden Testreferenzjahre zu sehen, jeweils für mittlere Jahre und für Jahre mit extremen Sommern. Dabei entsprechen die Klimadaten folgenden Klimaregionen und jeweiligen Bezugswerten der operativen Innentemperatur $\theta_{b,op}$ nach DIN 4108-2:

- TRY 02, Rostock: Klimaregion A, $\theta_{b,op} = 25$ °C
- TRY 04, Potsdam: Klimaregion B, $\theta_{b,op} = 26$ °C
- TRY 12, Mannheim: Klimaregion C, $\theta_{b,op} = 27$ °C

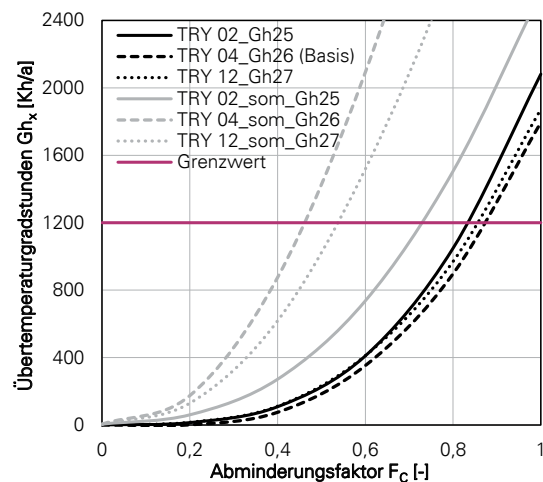


Abbildung 10: Übertemperaturgradstunden G_{hx} in Kh/a für drei verschiedene Testreferenzjahre, jeweils für mittlere Jahre und Jahre mit extremen Sommern (Abkürzung „som“).

Die drei Klimaregionen weisen im Falle der Normaljahre einen ähnlichen Verlauf der Übertemperaturgradstunden auf. Dies würde sich natürlich ändern, wenn für alle drei Datensätze derselbe Bezugswert der operativen Innentemperatur zugrunde gelegt würde. Da die Norm jedoch von einem adaptiven thermischen Komfortempfinden des Menschen ausgeht, ist der Bezugswert jeweils unterschiedlich.

Im Falle der extremen Sommer variieren die Übertemperaturgradstunden stark. Insbesondere der TRY-Datensatz 04 führt zu einer maßgeblichen Steigerung des

Überhitzungsrisikos im Vergleich zum Normaljahr. Hier ist ein F_c -Wert von etwa 0,45 erforderlich, um die Anforderung einzuhalten.

Neben sommerheißen Testreferenzjahren existieren auch Datensätze, die eine Prognose für das zukünftige Klima beinhalten. Entsprechende Untersuchungen zur Sohlplattenkühlung werden aktuell noch fertiggestellt und daher an dieser Stelle nicht dokumentiert.

Die Berechnungen zu Rohrdicken und -abständen ergaben bislang geringfügige Differenzen hinsichtlich der Übertemperaturgradstunden. Auswertungen zu unterschiedlichen Energiebedarfen aufgrund der Druckverluste befinden sich in Bearbeitung.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Sohlplattenkühlung zeigt sich im Rahmen der Parameterstudie als effizientes System der passiven Kühlung, welches einen geringen Energiebedarf aufweist. Berechnungen der Arbeitszahlen, welche sich aus der Wärmeaufnahme des Erdreichs und dem Pumpenstrombedarf ergeben, führten zu Werten von etwa 30 für einzelne der vorgestellten Fälle. Hier sind weitere Berechnungen erforderlich.

Kritisch anzumerken ist, dass das Simulationsmodell die Sohlplattenkühlung nicht optimal abbilden kann. Die Entwicklung einer TRNSYS-Komponente, die die Wärmeleitungsvorgänge zwischen Erdreich, Gebäude und den wasserführenden Rohre ganzheitlich berücksichtigt, ist erstrebenswert.

Dennoch konnten die Parameterstudien verschiedene Einflüsse wiedergeben und quantifizieren. Die besten Ergebnisse werden erzielt, wenn zusätzlich zur Sohlplattenkühlung ein außenliegender Sonnenschutz sowie eine Tag- und Nachtlüftung zum Tragen kommt. In einigen Fällen, wie z. B. hohen Geschosshöhen, leichter Bauart oder ungünstigen Erdreichparametern, sollte von einer Sohlplattenkühlung tendenziell abgesehen werden, insbesondere bei Fehlen eines außenliegenden Sonnenschutzes, wie es bei Wohngebäuden häufig die Regel ist. Hier können ggf. andere passive Kühlsysteme zum Einsatz kommen.

LITERATUR

- Bockelmann, F.; Fisch, N. M.; Kipry, H. 2010. Erdwärme für Bürogebäude nutzen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (BINE-Fachbücher).
- DIN 4108-2:2013-02. Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.
- Hirsch, H.; Hüsing, F.; Rockendorf, G. 2016. Modellierung oberflächennaher Erdwärmeübertrager für Systemsimulationen in TRNSYS. In: Proceedings BauSIM 2016. Dresden, S. 653–659.
- Janßen, S.; Hirsch, H. 2016. TRNSYS Type 710. Thermisches Modell eines horizontalen Erdwärmekollektors. Institut für Solarenergieforschung ISFH, Janßen Energieplanung.
- Klauß, S.; Kirchhof, W. 2010. Entwicklung einer Datenbank mit Modellgebäuden für energiebezogene Untersuchungen, insbesondere der Wirtschaftlichkeit. Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V. Kassel.
- Pfafferoth, J.; Kalz, D.; Koenigsdorff, R. 2015. Bauteilaktivierung. Einsatz - Praxiserfahrungen - Anforderungen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Plate, J. 2016. Kühlen mit dem Flächenheizsystem: Möglichkeiten und Grenzen, online verfügbar unter <https://www.haustec.de/kaelte-klima/klimatechnik/kuehlen-mit-dem-flaechenheizsystem-moeglichkeiten-und-grenzen> (zuletzt geprüft am 04.05.2018).
- Radermacher, A. 2013. Das Erdreich als Wärmequelle und Wärmesenke - Eine Analyse aus der projektübergreifenden Begleitforschung der Forschungsinitiative EnOB. Universität Kassel.
- VDI 4640:2010-06. Thermische Nutzung des Untergrunds - Blatt 1: Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte.

REGELSTRATEGIE FÜR EINEN WÄRMEPUMPENBETRIEB EINER VERBUNDANLAGE MIT MITTELTIEFEN ERDWÄRMESONDEN

V. Ritter^{1,2}

¹ Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, Hochschule Darmstadt, Germany

² Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, Germany.

ABSTRACT, DEUTSCH

Die Bereitstellung von Heizwärme verursacht bei Bestandsbauten immer noch hohe Treibhausgasemissionen. Mit geothermisch gekoppelten elektrischen Wärmepumpen können diese deutlich reduziert werden. Allerdings ist die Nutzung von oberflächennahe Geothermie in dicht bebauten Städten beschränkt möglich. Es wurden daher untersucht, ob mit mitteltiefe Erdwärmesonden die Anzahl an Sonden reduziert werden kann und ob durch eine Regelung mit Priorisierung im Verbundbetrieb von mehreren Gebäuden eine weitere Steigerung des Wirkungsgrades möglich ist. Es konnte gezeigt werden, dass mit mitteltiefen Erdwärmesonden generell höhere Wirkungsgrade erzielt werden, selbst bei reduzierter totalen Laufmeterlänge. In Kombination mit verbesserter Regelung im Verbundbetrieb von Gebäuden ist im Vergleich zu oberflächennaher Geothermie eine Stromreduktion bis zu 33% möglich, wobei dies den deutlich höheren Investitionskosten gegenübergestellt werden muss. Unter idealen Annahmen können diese Mehrkosten aber nach etwa 9 Jahren amortisiert werden, bei schlechteren Rahmenbedingungen nach ca. 20 Jahren.

ABSTRACT, ENGLISCH

Heating existing buildings in temperate climate causes high greenhouse gas emissions (GHG). The operation of geothermally coupled electric heat pumps can reduce GHG emissions, if renewable energy systems generate the electricity. The use of geothermal energy from shallow subsurface is limited in densely populated cities. This paper studies whether the number of probes can

be reduced by medium-depth borehole heat exchangers. Furthermore, the paper studies whether a control with prioritization in the combined operation of several buildings further increases the efficiency. The results show higher efficiency with medium-depth geothermal probes generally, even with reduced total running meter length. In combination with improved control of buildings, an electricity reduction of up to 33% is possible compared to near-surface geothermal systems. This requires higher investment costs. Assuming ideal boundary conditions, the amortization time of the addition cost are 9 years, but become approximately 20 years if boundary conditions are less optimal.

HINTERGRUND

Besonders durch das Heizen von Gebäuden und das Bereiten von Warmwasser entstehen in den kalten und gemäßigten Klimazone hohe Treibhausgasemissionen, wenn dabei fossile Brennstoffe verwendet werden (O., et al., 2014). Um diese Emissionen deutlich zu reduzieren, können elektrische Wärmepumpen eingesetzt werden, vorausgesetzt der elektrische Strom wurde mit regenerativen Quellen erzeugt (IWES/IBP, 2017). Die Stromproduktion aus regenerativen Quellen stellt in Europa im Winter immer noch eine Herausforderung dar (Burger, 2018). Allerdings ist ein weiterer Ausbau der Kraftwerke zur Stromerzeugung aus regenerativen Quellen geplant [Bundesregierung] und schreitet z.T. kräftiger voran, als ursprünglich geplant [PV]. Zwar kann man mit einer weiteren Absenkung der Treibhausgasemissionen im Bereich der Stromgewinnung rechnen, allerdings sollte das mittelfristige Ziel beim Wärmepumpenbetrieb in Gebäuden bleiben einen möglichst hohen jährlichen

Wirkungsgrad zu erzielen, der auch durch eine so genannte Jahresarbeitszahl (Quaschning, 2016) ausgedrückt wird. Diese JAZ beschreibt den Wirkungsgrad der Gesamtanlage mit seinen verschiedenen Komponenten (Bauer, Freeden, Jacobi, & Neu, 2018). Isoliert nur die Wärmepumpe betrachtet kann der so genannte Coefficient of Performance (COP) als Indikator des Effizienzniveaus einer Wärmepumpe genutzt werden. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Modelle werden über den jährlichen mittleren COP miteinander verglichen, was eine gewisse Vereinfachung darstellt, da andere Stromverbraucher nicht berücksichtigt werden, die ebenfalls notwendige Teile der Anlage sind (Pumpen, Steuerungseinheiten, etc.).

Verschiedene Faktoren können helfen die Wärmepumpe effizient mit hohem Wirkungsgrad zu betreiben. Ein Aspekt ist sicher die Gerätequalität und die Hydraulik des Gesamtsystems (Bergmann & Erhorn, 2017). In dieser Arbeit wird der Fokus aber auf den so genannten Temperaturhub zwischen Wärmequelle und Wärmesenke gelegt, der ebenfalls den Wirkungsgrad beeinflussen kann. Dieser Hub wird üblicherweise über einen Kompressor (Verdichter) erzeugt, der hierfür elektrischen Strom benötigt. Je geringer der Hub ist, desto weniger Strom muss für die gleiche Wärme investiert werden. Eine Effizienzsteigerung kann generell erreicht werden, wenn als Abgabesystem (Wärmesenke) mit relativ niedrigen Vorlauftemperaturen auskommt, d.h. eine Flächenheizung oder ein Niedertemperatur Heizkörper eingesetzt werden kann. Niedertemperatur Heizkörper können häufig nachträglich in Altbauten alternativ zu den bestehenden Heizkörpern eingebaut werden und erlauben, die benötigte Leistung mit einer deutlich geringeren Vorlauf-temperatur zu erreichen. Fußbodenheizungen kommen seltener in Altbauten zum Einsatz, da die lichte Raumhöhe beim nachträglichen Einbau verringert wird und relativ hohe Investitionskosten entstehen können. Bei der Wahl der Wärmequelle stehen bei der Planung von Wärmepumpenanlagen häufig unterschiedliche Quellen zur Auswahl. Dies können u.a. die Außenluft, das Grundwasser, Abwasser, aber auch die Geothermie oder Abwärme aus Prozessen sein. Jede dieser Quellen besitzt unterschiedliche Temperaturen, die sich auch unterschiedlich stark im Jahresverlauf ändern. Mit der Wahl der Wärmequelle leitet sich das mögliche Kältemittel in der Wärmepumpe ab, wodurch wiederum die Temperatur

vor dem Verdichter abhängt, was schließlich wiederum den Temperaturhub und den Strombedarf beeinflusst. Daher ist die Wahl der Wärmequelle mitentscheidend für den Strombedarf im Betrieb.

Im Gegensatz zu Neubauten im Umland von Städten sind bei der Auswahl an mögliche Wärmequellen sind besonders Gebäude in verdichteten Innenstädten eingeschränkt. Geothermische Anlagen werden in Innenstädten eher selten bei energetischen Gebäude- oder Quartierssanierungen eingesetzt. Ein Hauptgrund ist der Flächenbedarf, den oberflächennahe Geothermie mit Sondenfeldern benötigt. Dieser Flächenbedarf könnte durch den Einsatz von mitteltiefen Sonden reduziert werden, da sie gleiche Leistung wie ein oberflächennahes Sondenfeld bei geringerer Grundfläche bieten. In Erdwärmesondenfeldern kann generell über die aktive Einspeisung von überschüssiger Wärme im Sommer das Sondenfeld regeneriert werden und im idealen Fall sogar Wärme bis zu einem gewissen Grad gespeichert werden (Formhals, Schulte, Welsch, & Sass, 2017). Mit steigender Tiefe einer Erdwärmesonde sinkt allerdings die Möglichkeit der aktiven Regeneration bzw. der saisonalen Wärmespeicherung, da die Umgebungstemperaturen steigen. Weiterhin werden die Gebäude eines Stadtquartiers selten in Verbundanlagen gedacht, sondern es steht die Einzelversorgung im Vordergrund, auch aufgrund der Eigentumsverhältnisse. In dieser Arbeit sollen die Unterschiede zwischen oberflächennahen und mitteltiefen Erdwärmesonden in vereinfachten Modellen im Betrieb verglichen und andererseits die Verbesserungen des Wirkungsgrades bei einem Verbundbetrieb betrachtet werden, der darauf abzielt möglichst wenig Lastspitzen zu erzeugen.

METHODE

Für die Auswertung wurden die Ergebnisse aus thermische Simulationen genutzt die mit der Software TRNSYS Version 18 durchgeführt wurden. (Transsolar, TRNSYS Version 18, 2018). Diese Software erlaubt transiente Simulationen von Anlagen und Gebäuden, was besonders bei der Simulation von geothermischen Anlagen wichtig ist, die über längere Zeiträume Wärmeübertragungen stattfinden. Es wurden neben den Standardkomponenten im Modell weitere vorgefertigte Komponenten der TESS-Bibliothek genutzt

(Transsolar, TESS library, 2018), um die Eigenschaften der Erdwärmesonden und Wärmepumpen berechnen zu können.

Modelle und Szenarien allgemein

Die Untersuchung umfasst 6 Szenarien. Im Szenario 1-3 wird die Wärme zentral und im Szenario 4-6 dezentral erzeugt. In Szenario 1 wird eine Verbundanlage mit oberflächennahen Erdwärmesonden simuliert. Szenario 2 werden mitteltiefe Sonden mit 400 m und im Szenario 3 mit 650 m Tiefe simuliert. Im Szenario 5 wird die Regelstrategie für die Gebäude geändert und im Szenario 6 die Sondenanzahl absichtlich unterdimensioniert. Weitere Einzelheiten zu den Szenarien finden sich in den späteren Beschreibungen zu den „Modell Szenarien“

Gewisse Gemeinsamkeiten existieren in allen Modellen der untersuchten Szenarien. In allen Modellen sind stets zwei Gebäude abgebildet, die sich in Ihrer Nutzung als Wohn- und Bürogebäude voneinander unterscheiden. Es sind hierfür Profile basierend auf der DIN V 18599 hinterlegt worden, d.h. die Gebäude besitzen unterschiedliche Nutzungszeiten, Betriebszeiten der Anlagen, interne Lasten durch die Nutzer, Luftwechselraten und die Wunschtemperaturen in den Innenräumen. Als Vereinfachung wurde angenommen, dass sich die Gebäude in Ihrer baulichen Struktur nicht voneinander unterscheiden, d.h. beide Gebäude besitzen identische physikalische Eigenschaften der Gebäudehülle, Glasanteile und innere thermische Gebäudekapazität. Auch der Standort Potsdam und die Nord-Süd Ausrichtung ist bei beiden Gebäuden identisch. Auf Verschattung durch umliegende Bauten o.ä. wurde zur Vereinfachung verzichtet. In weiteren Studien soll dies noch weiter differenziert werden, um realistischer Gebäudequartiere abbilden zu können. In dieser Studie wurde auf Varianten zur energetischen Gebäudequalität verzichtet, um deren Einflüsse auf die Auslegung und den Betrieb der Anlagentechnik zu vermeiden.

Es wurde angenommen, dass im Wohngebäude jede der 60 Personen in den 15 Wohneinheiten durchschnittlich einen Warmwasserbedarf von etwa 28 Liter pro Tag verursacht. Zur Berücksichtigung des Energiebedarfs für die Bereitung des Warmwassers wurde im Wohngebäudemodell vereinfacht ein gemittelt Verbrauchprofil genutzt (Diefenbach, Großklos, Grafe, Müller, & Born, 2017). Es wurde angenommen, dass das Stadtwasser hier mit 10 °C geliefert wird. Die

Wärme für das Warmwasser wird in allen Modellen direkt dem entsprechenden Speicher als über den Tag hinweg veränderliche Last wie in Abbildung 2 dargestellt entzogen. Weitere Differenzierungen dieser Kurve sind möglich (z.B. Unterscheidung Sommer/Winter, Ferienzeiten etc.), werden aber in diesem Modell nicht berücksichtigt. Es ist eine Routine hinterlegt, dass das Wasser im Speicher einmal pro Woche auf 60°C erhitzt wird.

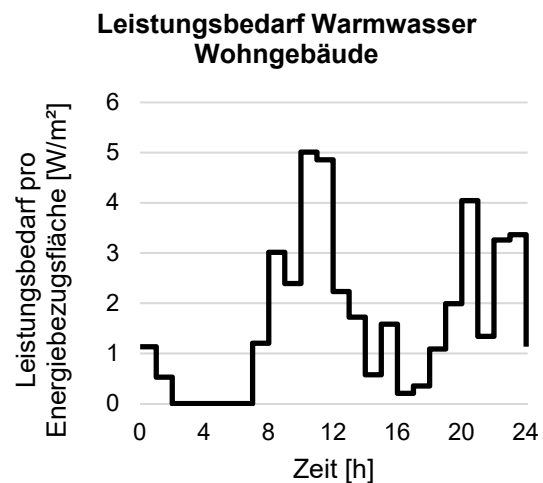


Abbildung 1 Vereinfachte Annahme zum Leistungsbedarf durch Warmwasser im Wohngebäude

Für eine erste Dimensionierung der Heizanlage in den Gebäuden wurde zunächst der theoretische Heizwärmebedarf pro Gebäude berechnet, der sich bei einer Auslegungstemperatur von 20 °C einstellt. Werden beide Gebäude mit den oben genannten Nutzungsprofilen simuliert, ergebend sich jährliche Heizwärmebedarfe pro Energiebezugsfläche von ca. 55 kWh beim Bürogebäude, respektive ca. 52.5 kWh beim Wohngebäude. Hinzu kommen 15 kWh pro Energiebezugsfläche für Warmwasserbedarf im Wohngebäude, respektive 6 kWh beim Bürogebäude. In Bezug auf die Spitzen des Heizleistungsbedarfs liegt das Wohngebäude bei etwa unter 85 kW pro Energiebezugsfläche und das Bürogebäude bei 75 kW, worüber die maximale Leistung der Wärmepumpen definiert werden. Diese vereinfachten Berechnungen erlauben eine gewisse Vordimensionierung weiterer Komponenten im Modell, wie z.B. der Heizkörper. Deren Vorlauftemperatur wurde auf 55 °C gesetzt. Es wurden für die Heizkreise geregelte Pumpen simuliert die auf zwei Stufen fahren können, je nachdem welcher Leistungsbedarf im Gebäude besteht. Die Stufen werden über simulierte Raumthermostate bestimmt, die Grenztemperatur diese bestimmen.

Im Wohngebäude wurde ein ΔT von 4 K während der Nachtauskühlung angenommen, respektive im Nichtwohngebäude ein ΔT von 2 K.

Entgegen Anlagen, die mit relativ kleinen Pufferspeichern auskommen, damit im System geringe Bereitschaftsverluste entstehen (Viessmann, 2011), ist zur Systemstabilisierung der modellierten Verbundanlage zum Teil ein deutlich größerer Warmwassertank als Leistungspuffer nötig geworden. Dies war nötig, da sich Spitzenlasten von beiden Gebäuden und Warmwasserbedarf zum Teil überschneiden und kurzzeitig Leistungsbedarfe von mehr als 120 kW erzeugen, was bei kleinen Pufferspeichern zu einer Über- und ggf. Fehldimensionierung der Wärmepumpe führen würde.

Vereinfachte Annahmen

Allen Wärmepumpen wurde in den Modellen die gleiche synthetische Leistungskurve hinterlegt. Diese Leistungskurven basieren grundsätzlich auf der Formel des Coefficient of Performance (COP):

$$COP = \xi \cdot \frac{T_1}{T_1 - T_2} = 0.5 \cdot \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

T_2 stellt dabei die Temperatur der Wärmequelle, T_1 die Temperatur der Wärmesenke und ξ die Effizienz der Maschine dar. Für ξ wurde eine vereinfachten Annahme getroffen, dass die Effizienz der Maschine über alle Temperaturbereiche konstant bei 0.5 liegt. Obwohl bei realen Anlagen sich der ξ -Beiwert abhängig von Temperaturen und Leistung der Anlage verändert, wurde diese Vereinfachung gewählt, damit eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Szenarien untereinander möglich wird. Der Verlauf der Leistungskurven ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Software TRNSYS interpoliert während der Simulation über diese Stützpunkte der Kurven die situationsbedingten Wirkungsgrade.

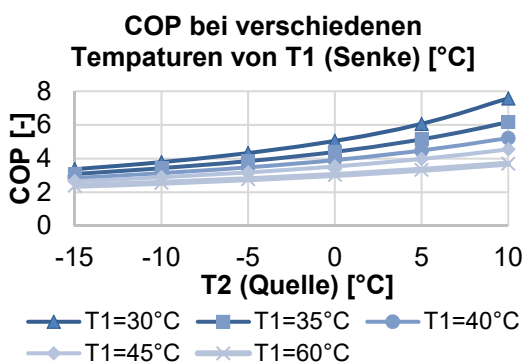


Abbildung 2 Vereinfachte Annahme der in den Simulationen hinterlegten Betriebsweise der Wärmepumpen

Bei allen betrachteten Konfigurationen der Erdwärmesonden wurden die physikalischen Eigenschaften des Untergrunds der Modelle identisch gehalten. Es wurde eine relativ geringe Wärmeleitfähigkeit von 4.68 J/(h·m·K) und eine Wärmekapazität von 2100 kJ/(m³·K) angenommen. Diese Eigenschaften des Untergrundes sind wiederum Vereinfachungen, die bei realen Anlagen deutlich anders ausfallen können. Diese Vereinfachungen dienen erneut der Reduzierung von Einflussparametern, um eine Vergleichbarkeit der Modelle untereinander weiterhin zu erlauben. Es wurden Testweise auch andere Eigenschaften des Untergrundes zu Wärmeleitfähigkeiten und Wärmekapazität hinterlegt, die aber an den relativen Unterschieden zwischen den Modellen wenig änderten. In den geplanten Erweiterungen des Modells werden zukünftig diese Besonderheiten genauer untersucht.

Allgemein werden in keinem betrachteten Szenario die Wärmeübertragungen von den horizontalen Leitungsabschnitten berücksichtigt. Dies stellt eine weitere Vereinfachung dar, die in zukünftigen Modellen mitberücksichtigt werden muss, da üblicherweise auch hier Wärmeübertragungen stattfinden. Da in allen betrachteten Szenarien horizontale Leitungen existieren (entweder von der zentralen Heizanlage bis zu den Gebäuden oder von den Sondenpunkten bis zu den Gebäuden), werden diese Wärmeübertragungen in Ihrer Größenordnung als relativ ähnlich eingeschätzt, besonders wenn isolierte Rohre verwendet werden (Jin Luo, 2013). Weiterhin werden diese Wärmeübertragungen in den Modellen ähnlich hoch eingeschätzt, da bei den mitteltiefen Erdwärmesonden die Rücklauftemperaturen aus den Sonden zwar höher als bei den oberflächennahen Sonden liegen (d.h. relativ höhere Wärmeübertragung pro Leitungslänge), aber die Laufmeter der horizontalen Leitungslängen geringer ausfallen.

Der Strombedarf der Pumpen wurde in den Modellen nicht kalkuliert. Besonders bei Effizienten Wärmepumpenanlagen kann der Strombedarf der Solepumpen deutlich den Gesamtstrombedarf beeinflussen. Daher stellen die Simulationsergebnisse zum Wirkungsgrad auch nur Angabe zur Effizienz der Wärmepumpen dar und nicht Jahresarbeitszahlen des Gesamtsystems. Dies wird ebenfalls in einem zukünftigen Modell näher untersucht werden. Allgemein wird erwartet, dass

es bei den Anlagen mit größeren Volumenströmen und Leitungslängen zu höheren Bedarfen kommen könnte.

Modell Szenario 1

Im ersten untersuchten Szenario wurde angenommen, dass eine zentrale Wärmepumpe mit 160 kW Spitzenleistung beide Gebäude mit Wärme versorgt. Bei der Auslegung wurde ermittelt, dass der jährliche Wärmeentzug aus den Sonden etwa 260 MWh beträgt. Diese Wärme liefern 32 oberflächennahe Erdwärmesonden mit 100 m als Quelle. Gewisse Eigenschaften eines Sondenfeldes können mit der verwendeten Komponente Type 557d in TRNSYS nicht abgebildet werden. Dies betrifft vor allem die gegenseitigen Einflüsse zwischen den einzelnen Erdwärmesonden in Sondenfeldern. Da die saisonale Speicherung von Wärme in dieser Arbeit aber nicht im Fokus stand und die Sonden auch nicht mit Wärme beladen wurden, sind die Sonden als unbeeinflusst angenommen worden. Dies entspricht einer Situation in der die Sonden in ausreichendem Abstand zueinander platziert sind. Eine Übersicht zum Modell bietet Abbildung 4. Darin zu erkennen sind die beiden Gebäude oben links und deren Randbedingungen durch deren Nutzung aber auch der Struktur mit Fensteranteil. Bei der Versorgung der Gebäude mit Wärme wird in diesem Modell nicht nach Priorität an Wärmebedarf unterschieden, d.h. beiden Gebäuden wird Wärme über die Heizflächen sofort zugeführt, sobald ein Bedarf besteht, was zu gewissen Lastspitzen im Warmwasserspeicher (Type 158) führen kann, den die Wärmepumpe mit Leistungsspitzen ausgleichen muss. Folglich erfahren auch die Sonden Entzugsspitzen, die durch höheren Massenstrom durch die Sonden erzeugt werden. In deren Folge kann Wärme nicht ideal im Untergrund nachströmen, was zu einem Temperaturabfall bei der Sonde führen kann.

Modell Szenario 2 und 3

Das Modell ähnelt stark dem von Szenario 1, außer dass hier mitteltiefe Erdwärmesonden anstelle von oberflächennahen Sonden angenommen werden. Die absolute Laufmeterlänge der Sonden beträgt wie in Szenario 1 ebenfalls total 3200 m. Im Szenario 2 werden entsprechend 8 x 400 m Sonden und in Szenario 3 entsprechend 5 x 640 m Sonden angenommen. Aufgrund des angenommenen geothermischen Gradienten von 3 K pro 100 m entstehen mit mitteltiefen Sonden

generell höhere Rücklauftemperaturen als in Szenario 1.

Modell Szenario 4

Da es das allgemeine Ziel dieser Arbeit ist, Lösungen für den dicht bebauten Stadtraum zu ermitteln, geht man in den folgenden Szenarien weiter von 5 x 640 m Sonden aus. Im Gegensatz zu den vorherigen Szenarien mit angenommener zentraler Wärmeerzeugung, wird in diesem Szenario und im Szenario 5 die Wärme dezentral in den jeweiligen Gebäuden erzeugt. Es befindet sich im Wohngebäude eine Wärmepumpe mit 85 kW und in Bürogebäude eine Wärmepumpe mit 75 kW Heizleistung. Die beiden Wärmepumpen sind je an einen Warmwasserpufferspeicher gekoppelt, um Lastspitzen zu vermeiden. Das Volumen der einzelnen Wasserspeicher ist halb so groß wie die angenommenen Speicher in Szenario 1 und Szenario 2. Eine Übersicht zum Modell bietet Abbildung 3.

Modell Szenario 5

Das letzte untersuchte Szenario gleicht im wesentlichen Aufbau dem Szenario 4. Modifiziert wurde in diesem Szenario die Regelung, so dass eine Priorisierung der Wärmeerzeugung erfolgt. Diese Strategie verfolgt das Ziel, Spitzenentzüge aus den Sonden zu verringern und einen kontinuierlicheren Wärmeentzug zu ermöglichen, um höhere Rücklauftemperaturen aus der Sonde zu garantieren. Ziel ist es also den gleichzeitigen Betrieb der beiden Wärmepumpen zu vermeiden. Als Regelgröße wurden die Innenraumtemperaturen der beiden Gebäude berücksichtigt und immer der Wärmepumpe höhere Priorität zugesprochen, bei dessen Gebäude die Innenraumtemperatur geringer ausfällt. Zu beachten ist, dass die Innenräume immer noch je nach Bedarf Wärme erhalten, die über den Pufferspeicher gedeckt wird, d.h. thermische Behaglichkeit weiter bestehen bleibt. Die Pufferspeicher wurden daher so dimensioniert, dass die Gebäude auch ohne Wärmepumpenbetrieb für einige Stunden versorgt werden können.

Zusammenfassend wurden folgende Szenarien untersucht:

Tabelle 1: Zusammenfassung der untersuchten Szenarien

	Anzahl der Sonden und Tiefen	Art der Wärmepumpenversorgung	Regelungsstrategie
Szenario	1	32 x 100 m	Zentral
	2	8 x 400 m	Zentral
	3	5 x 640 m	Zentral
	4	5 x 640 m	Dezentral
	5	5 x 640 m	Dezentral
	6	4 x 640 m	Dezentral

ERGEBNISANALYSE UND DISKUSSION

Alle Szenarien wurden nach den folgenden Kriterien ausgewertet:

- Mittlerer jährlicher COP des Wärmepumpenbetriebs, der über die Wärmebereitstellung an den Speicher im Verhältnis zum Strombedarf berechnet ist.
- Strombedarf der Wärmepumpe als Resultat aus den Randbedingungen in den Simulationen und den in Abbildung 1 dargestellten Profilen der Wärmepumpe;
- Wärmebereitstellung an Speicher, bedingt durch den Wärmebedarf im Speicher;
- Wärme an Gebäude, die durch den Fußboden an das Gebäude bereitgestellt wird.

Die von der Wärmepumpe gelieferte Wärme für Warmwasser ist in allen Szenarien identisch mit 167.8 GJ pro Jahr. Die übrigen Ergebnisse der Szenarien sind in Tabelle 1 dargestellt.

Szenario 1

In diesem Szenario wird der niedrigste COP der Simulationen erreicht. Dieses Szenario Ergebnis kann als Vergleich dienen, da üblicherweise Anlagen mit oberflächennahen Sonden gebaut werden (hier 32 x 100 m Sonden).

Zusammenfassend sind folgende Ergebnisse entstanden:

Tabelle 2: Ergebnisse der Szenarien

	mittlerer COP der WP [-]	Strombedarf der WP [GJ]	Wärme geliefert an Speicher [GJ]	Wärme geliefert an Gebäude [GJ]	
Szenario	1	3.83	300.8	1152.7	823.8
	2	4.29	268.9	1152.7	823.8
	3	4.73	243.9	1152.7	823.8
	4	5.75	222.5	1279.0	847.5
	5	6.24	203.0	1266.1	830.4
	6	5.89	214.9	1266.2	830.3

Szenario 2-3

Die Ergebnisse der Szenarios zeigen, wie stark die Quelltemperatur Einfluss auf das Gesamtergebnis haben kann. Der COP verbessert sich je tiefer die Sonden angesetzt werden und entsprechend sinkt der Strombedarf der Wärmepumpe. Im Szenario 2 ist der Strombedarf ca. 11 % und im Szenario 3 etwa 19 % geringer. Es wird in diesen Szenarien gleichviel Wärme an Gebäude und Speicher wie im Szenario 1 geliefert.

Szenario 4

Im Vergleich zu den vorherigen Szenarien mit einer zentralen Wärmepumpe und einem Speicher kann eine deutliche Verbesserung des mittleren COPs erreicht werden, wenn dezentral zwei Wärmepumpen mit zwei Speichern gefahren werden. Allerdings verursachen die Pufferspeicher zusätzliche ungewollte Wärmeübertragungen, wodurch der Strombedarf im Vergleich zu den Szenarien 1-3 steigt. Daher sinkt der Strombedarf nur um ca. 26 % gegenüber Szenario 1, trotz des deutlich besseren mittleren COPs.

Szenario 5

In Regelung nach der Priorisierung des Wärmebedarfs erhöht erneut den mittleren COP In diesem Szenario werden die Wärmepumpen nacheinander fahren und somit treten geringere Lastspitzen in der Sonde auf. Die Sonde kühlt sich dadurch über das Betriebsjahr weniger stark aus. In diesem Szenario kann eine Reduktion des Strombedarfs von ca. 33 % gegenüber Szenario 1 festgestellt werden.

Szenario 6

Die etwas zu klein dimensionierte Sondenanlage führt zu einem geringeren mittleren COP als im vorherigen Szenario. Allerdings kann weiterhin liegt dieser Wirkungsgrad immer noch höher als in Szenario 1 bis 4. Der Strombedarf sinkt hier immerhin noch um 29 % gegenüber Szenario 1.

Vereinfachte Kostenbetrachtung

Die vereinfachte Kostenbetrachtung dient als erste Einschätzung, wie sich die Unterschiede bei den Investitions- und Betriebskosten von Szenario 2-6 zu denen von Szenario 1 verhalten. Szenario 1 wird hier als Basisszenario angesetzt. Die Unterschiede bei den Investitionskosten entstehen maßgeblich durch die unterschiedlichen Bohrkosten der Sondenanlage. Es wird davon ausgegangen, dass die Investitionskosten bei den übrigen Komponenten ähnlich hoch ausfallen. (Wärmepumpe, Speicher, Verteilstränge, Abgabeflächen, etc.). Wartungskosten und mögliche Subventionen werden nicht mit einkalkuliert. Da im Vergleich zu realen Anlagen sowohl die Bohrkosten der Sonden anders ausfallen können und die Kostenentwicklung des Stroms bei den Betriebskosten in den kommenden Jahren unbekannt ist, besteht bei dieser Kostenanalyse ein immanenter Fehler zu realen Anlagen, der nicht bestimmt werden kann. Welsch et al. haben genauere Kostenbetrachtungen zu mitteltiefen Erdwärmesonden durchgeführt (Welsch, et al., 2018).

Bei dieser Betrachtung wurde vereinfacht pro Laufmeter bei oberflächennäher Geothermie 65 €, bei mitteltiefen Sonden bis 400 m 90 € und darüber hinaus 100 € angesetzt. Weiterhin wurde angenommen, dass die Investitionskosten vollständig bei der Errichtung vorhanden sind, d.h. es fallen in keinem Szenario Zinszahlungen für Kredite an. Für den Betrieb der Wärmepumpe wurden im ersten Jahr 0.21 € pro kWh Strom angesetzt. Es wurden drei mögliche Entwicklungen der Strompreisänderungen angenommen, bei denen Kostensteigerung um 1.3 %, 2.8 % und 4.3 % hinterlegt sind (Enseling & Loga, 2013).

Die Amortisationszeiten der höheren Investitionskosten fallen je nach angesetzten Annahmen sehr unterschiedlich aus. Diese sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Zeiten in Jahre bis sich die Mehrkosten der Investition durch die sinkenden Betriebskosten im Vergleich zu Szenario 1 amortisieren.

		Szenario				
		2	3	4	5	6
Stromkostensteigerung	1.3%	35	29	22	20	9
	2.8%	30	25	20	18	9
	4.3%	27	23	18	17	8

ZUSAMMENFASSUNG

Mit den gezeigten Ergebnissen aus Tabelle 2 werden die möglichen Reduktionen des Strombedarfs im Betrieb deutlich, die mit mitteltiefen Erdwärmesonden in Kombination mit verbesserten Regelung von Wärmepumpenanlagen im Verbund theoretisch möglich sind. Eine wie hier untersuchte Regelung ist allerdings nur möglich, wenn die zu versorgenden Gebäude einerseits gewisse thermische Kapazität durch die Baumasse besitzen und andererseits der Einbau eines dezentralen Pufferspeichers möglich ist, sodass ein verzögerter Wärmepumpenbetrieb möglich wird. Leichtbauten ohne solche Puffer kühlen sich zu rasch aus, sodass ein verzögerter Betrieb generell schwierig bis unmöglich ist. Diese Pufferspeicher verursachen allerdings höhere ungewünschte Wärmeübertragungen an die Umgebung, wodurch ein ungewollter zusätzlicher Strombedarf entsteht. Bei schlechter Auslegung würden dadurch alle Effizienzsteigerungen kompensiert. Diese ungewollten Übertragungen können aber durch bessere Isolation verringert werden. Tabelle 3 verdeutlicht, dass die Amortisationszeit der Mehrkosten von mitteltiefen Anlagen deutlich reduziert werden kann, wenn die totale Sondenlänge etwas unterdimensioniert wird, was zwar die Betriebskosten leicht erhöht, die Investitionskosten aber deutlich senkt. Dies ist weiterhin wichtig, da das Ziel dieser Untersuchung auch eine Reduzierung der notwendigen Grundfläche für die Sondenanlage ist. Unter der Annahme von 10 m Distanz zwischen den Sonden (in der Praxis bei Sondenfeldern z.T. geringer (Verein Deutscher Ingenieure, 2010)), ist ohne Randabstand in Szenario 6 ein Feld von 10 m x 10 m notwendig. Im Gegensatz hierzu benötigt man für die Sonden in Szenario 1 eine Fläche von mehr als 50 m x 40 m, d.h. die 20-fache Fläche.

LITERATURVERZEICHNIS

- Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., & Neu, T. (2018). *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*. Berlin, Germany: Springer Spektrum.
- Bergmann, A., & Erhorn, H. (2017). *Energieeffizienz elektrisch angetriebener Wärmepumpen - Praxisergebnisse aus dem Monitoring*. Holzkirchen: Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP.
- Burger, B. (2018). *Power generation in Germany - assessment of 2017*. Freiburg: Fraunhofer Solar Energy Systems ISE.
- Diefenbach, N., Großklos, M., Grafe, M., Müller, A., & Born, R. (2017). *Modellentwicklung zur Analyse des zeitlichen Ausgleichs von Energieangebot und -nachfrage im Wohngebäudesektor*. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt IWU.
- Enseling, A., & Loga, T. (2013). *Sensitivity analysis of the cost-optimal methodology implementation for Germany; Study on behalf of Buildings Performance Institute Europe (BPIE)*. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt.
- Fachhochschule Nordwestschweiz, I. E. (2012). *Gebäudetechnik – Systeme integral planen*. Zürich: Faktor Verlag.
- Formhals, J., Schulte, D. O., Welsch, B., & Sass, I. (2017). SKEWS (Solargekoppelter kristalliner Erdwärmesondenspeicher): Wärmespeicherprojekt der TU Darmstadt am Campus Lichtwiese. *European Geosciences Union General Assembly 2017*. Vienna.
- IWES/IBP, F. (2017). *Wärmewende 2030. Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor*. Studie im Auftrag von Agora Energiewende.
- Jin Luo, J. R. (2013). Modeling and experiments on energy loss in horizontal connecting pipe of vertical ground source heat pump system. *Applied Thermal Engineering*, 55 - 64.
- O., L., Ürge-Vorsatz, D., Ahmed, A. Z., Akbari, H., Bertoldi, P., Cabeza, L. F., . . . Vilariño, a. M. (2014). *Buildings in: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, US: Cambridge University Press.
- Quaschnig, V. (2016). *Understanding Renewable Energy Systems*. London: Earthscan .
- Transsolar. (2018). *TESS library*. Abgerufen am 10. 8 2018 von http://trnsys.de/docs/komponenten/komponenten_tess_de.htm
- Transsolar. (2018). *TRNSYS Version 18*. Abgerufen am 10. 8 2018 von http://trnsys.de/docs/trnsys/trnsys_uebersicht_de.htm
- Verein Deutscher Ingenieure. (2010). *Richtlinienreihe VDI 4640 "Thermische Nutzung des Untergrunds"*. Berlin: Beuth Verlag.
- Viessmann. (2011). *Planungshandbuch Wärmepumpe*. Allendorf Eder: Viessmann.
- Welsch, B., Göllner-Völker, L., Schulte, D. O., Bär, K., Sass, I., & Schebek, L. (15. 4 2018). Life cycle assessment, Economic assessment, Borehole thermal energy storage, Seasonal heat storage, District heating, Solar thermal energy. *Applied Energy*, S. 73-90.

MODELLIERUNG UND VALIDIERUNG VON SIMULATIONSANSÄTZEN FÜR DIE AUSSENLIEGENDE LUFTTEMPERIERUNG

C. Schmidt¹, H. Altgeld¹, B. Groß¹, S. Maas² und F. Scholzen²

¹ IZES gGmbH (Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme), Saarbrücken, Germany

² Université du Luxembourg, Fakultät für Naturwissenschaften, Technologie und Kommunikation, Luxembourg, Luxembourg

KURZFASSUNG

Das Forschungsprojekt „LEXU II“ beschäftigt sich mit der praxisnahen Entwicklung und Erprobung von außenliegenden Wand- und Lufttemperierungssystemen. Hierbei dienen wasserführende Rohrleitungen, eingebettet in eine Putzschicht, zwischen Bestandswand und einem Wärmedämm-Verbundsystem als niederexergetisches Temperierungssystem. Erweitert man diesen Aufbau um einen Luftspalt zwischen thermisch aktiver Schicht und der Dämmung, so kann die außenliegende Wandtemperierung zu einer außenliegenden Lufttemperierung erweitert werden. Diese ermöglicht eine bedarfsgerechte Zulufttemperierung. Für die außenliegende Lufttemperierung wurden bereits erste Simulationsmöglichkeiten erarbeitet. In dem hier vorliegenden Beitrag geht es um die Validierung von praktikablen Modellierungsansätzen durch einen Vergleich mit Messdaten von einer Laborwand.

An outlying wall tempering is the main part of the research project „LEXU II“. The outlying wall tempering is a panel heating that is attached between the existing wall and the new thermal insulation. By the creation of an air duct between the thermally active layer and the insulation, the outlying wall tempering can be extended to an outlying air heating. External air can be heated or cooled and provided to the room as tempered fresh air. For both components (outlying wall tempering and outlying air tempering) simulation tools were adapted/developed. The simulation results were validated with measurements at laboratory walls. The last part of the project is the realisation of the components at a real building.

EINFÜHRUNG

Im Forschungsprojekt „Low Exergy Utilization – Einsatz von außenliegender Wandtemperierung bei der Gebäudesanierung“ (*kurz LEXU II*) mit dem Förderkennzeichen 0327370Y werden verschiedene Anwendungen von Außenwand-Temperierungssystemen theoretisch und experimentell bis hin zum Feldtest untersucht. In einem vorgeschalteten Projekt LEXU (Fkz. 0327370T) wurden die Grundfunktionen, einschließlich geeigneter Realisierungen derartiger Sanierungen, untersucht. Die Anwendungsziele sind vor allem Altbauten mit einem hohen U-Wert der Bestandswände. Um eine Wärmezufuhr mit einem sehr niedrig temperierten Heizfluid (i.e. Nutzung von Heizquellen mit niedriger Exergie) zu ermöglichen, wird zusätzlich zu einem außen aufzubringenden Wärmedämm-Verbundsystem (*kurz WDVS*) zuerst eine Flächentemperierung auf die Außenwand aufgebracht. Dieser Wandaufbau wird im Rahmen des Projektes als außenliegende Wandtemperierung (*kurz aWT*) bezeichnet. Die aWT ist die Hauptkomponente innerhalb des Projektes, siehe u.a. Luther & Altgeld, 2002 und Schmidt et al., 2017. In einem Arbeitspaket wurde als niederexergetische Erweiterung der aWT eine außenliegende Lufttemperierung (*kurz aLT*) entwickelt, vergleiche Luther, 2008 und Luther, 2013 (Schema siehe Abb. 1). In Schmidt et al., 2016 wurden erste Modellierungsansätze für die aWT und die aLT in TRNSYS (siehe Klein et al., 2012) beschrieben und auch eine erste Validierung durchgeführt. Dabei wurden für die aLT zwei Modellierungsansätze in TRNSYS erarbeitet und

mit eigenen Berechnungen und Messungen von einer Laborwand verglichen. Es handelte sich einerseits um die Unterteilung des Luftkanals in mehrere Luftknoten, um einen Temperaturverlauf zu ermitteln (Mehrzonenmodell) und andererseits um den Einsatz eines Types für hinterlüftete Fassaden (Type 1230).

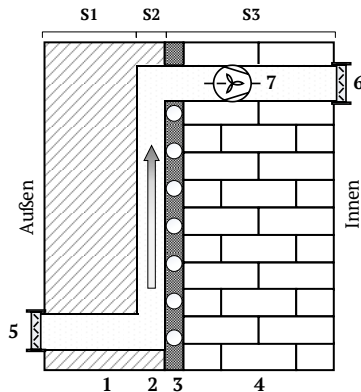


Abbildung 1: Schema der aLT: Außenwand (4), eingeputzte Kapillarrohrmatten (3), Luftkanal (2), WDVS (1), Lufteinlass (5), Luftauslass (6) und Ventilator (7)

Ein Fazit des Beitrags war, dass generell beide Methoden zur energetischen Abbildung der Vorgänge im Luftspalt der aLT geeignet sind, der Eingabeaufwand für das Mehrzonenmodell jedoch viel zu hoch ist und der Ansatz somit nicht praktikabel ist für umfangreichere Simulationenaufgaben oder die Abbildung eines Gebäudes mit mehreren Teilflächen der aLT. In diesem Beitrag soll detaillierter auf die Validierung von Type 1230 (in Kombination mit Type 56 für Multizone Buildings) zur Simulation der aLT eingegangen werden. Problematisch am Einsatz von Type 1230 erscheint, dass bei einer Gebäudesimulation die thermische Hülle des Gebäudes aufgeteilt werden muss, zwischen Type 1230 und Type 56. Dies macht die Auswertung komplizierter und auch die komplette Simulation aufwändiger und fehleranfälliger. Als Alternative zu Type 1230 wurde daher ein zusätzlicher Ansatz erarbeitet, der die Simulation der aLT alleine mit Type 56 ermöglichen soll. Dieser Ansatz beruht auf der Berechnung von belüfteten Zwischenräumen aus DIN EN 13363 und soll in diesem Beitrag durch einen Vergleich mit Ergebnissen von Type 1230 und durch einen Vergleich mit Messergebnissen an einer Laborwand bewertet werden.

MODELLIERUNGSKONZEPT IN TRNSYS

Die aLT kann generell, entsprechend Abb. 1 in drei Schichten unterteilt werden: S1 (WDVS),

S2 (Luftspalt) und S3 (Bestandskonstruktion mit aWT). Die den Luftspalt durchströmende Außenluft nimmt einen Teil des durch die Konstruktion fließenden Wärmestroms auf und wird in Folge dessen temperiert. Wichtig für die Modellierung in TRNSYS ist, dass die Wärmetransportvorgänge innerhalb der Wandkonstruktion und gegenüber der Umgebung abgebildet werden können. Es handelt sich hierbei explizit nur um eine wärmetechnische bzw. energetische Simulation der aLT. Der Feuchtetransport wird nicht betrachtet. Eine Strömungssimulation der aLT fand begleitend zum Aufbau der Laborwand statt. Es wird demzufolge von einer homogenen Strömung innerhalb des Luftkanals ausgegangen. Auf die Modellierung über das Mehrzonenmodell, entsprechend Schmidt et al., 2016 wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen. Stattdessen kommen zwei andere Ansätze zum Einsatz. Einerseits die Modellierung der aLT unter Verwendung von TRNSYS-Type 1230 und andererseits die Modellierung über eine Berechnung in Anlehnung an DIN EN 13363.

Einsatz von Type 1230

Bei Type 1230 handelt es sich um ein Type zur Modellierung von hinterlüfteten Fassaden, siehe Thornton, 2007. Mit Hilfe des Types kann eine vorgehängte Fassade, bestehend aus einem äußeren Teil, einem Luftspalt und einer Verknüpfung zu Type 56, siehe Abb. 2, modelliert werden.

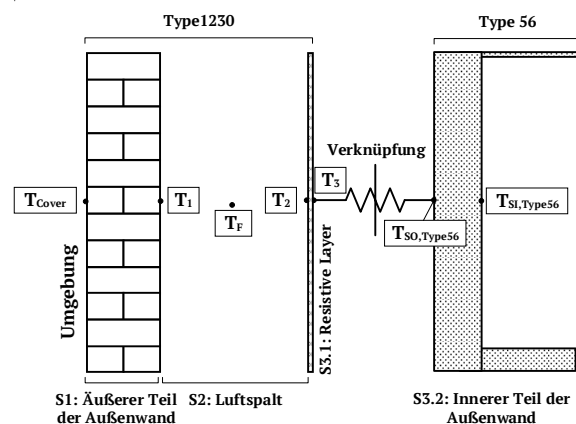


Abbildung 2: Schema des Aufbaus von Type 1230 mit den einzelnen Schichten S1 bis S3 und der Verknüpfung zu dem Gebäudemodell in TRNSYS (Type 56)

Die Verknüpfung zum Gebäudemodell in TRNSYS (Type 56) erfolgt über einen sogenannten resistiven Layer (fiktiver, masseloser Layer zur Verknüpfung). Die

gesamte Außenwand muss somit unterteilt werden in einen Teil, der in Type 1230 modelliert wird (S1 bis S3.1) und einen Teil, der in Type 56 „verbleibt“ (S3.2). Für eine komplette Gebäudesimulation würde dies bedeuten, dass die thermische Hülle aufgeteilt wird zwischen Außenwänden ohne aLT (in Type 56) und Außenwänden mit aLT (Type 56 und Type 1230). Dies macht die Simulation durch eine Vielzahl von zusätzlichen Verknüpfungen aufwändiger und fehleranfälliger; vor allem in Kombination mit einer Segmentierung bei der Nutzung von aktiven Schichten im inneren Teil der Außenwand (Type 56). Positiv bei Type 1230 ist, dass der Wärmeübergang im Luftspalt detailliert modelliert wird und sich das Type somit im Prinzip sehr gut für die Modellierung der aLT eignet, siehe Thornton, 2007.

Berechnung nach DIN EN 13363 und Abbildung in Type 56

Parallel zu der Modellierung mit Type 1230 wurde auch eine Berechnung der aLT mit den Gleichungen für belüftete Zwischenräume nach DIN EN 13363-2 und Modellierung von äquivalenten Vorgängen in Type 56 untersucht. Es handelt sich hier um einen kombinierten Ansatz aus einem analytischen Modell und der Verwendung eines TRNSYS-Types zur Abbildung der realen Vorgänge.

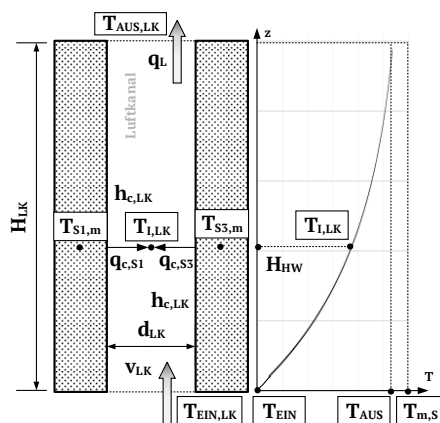


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Kenndaten des belüfteten Zwischenraums (links) und des Temperaturprofils im Inneren (rechts) unter der Annahme, dass die eindringende Luft erwärmt wird. Erstellt in Anlehnung an Bild 5 aus DIN EN 13363; mit eigener Nomenklatur

Ausgehend von der Annahme, dass die mittlere Strömungsgeschwindigkeit der Luft im Luftkanal bekannt ist, lassen sich das Temperaturprofil und die Wärmeübergangskoeffizienten entsprechend Norm DIN EN 13363-2, Kapitel 5.3.3 berechnen. Eine schematische Darstellung der Kenndaten des Modells ist in Abb. 3 dargestellt. Dabei hängt

das Temperaturprofil über die Höhe des Luftkanals (H_{LK}) sowohl von der Strömungsgeschwindigkeit (v_{LK}), als auch von den Wärmeübergangskoeffizienten (h_{c,LK}) ab. Die folgenden Berechnungsschritte ergeben sich entsprechend der Norm. Die Temperatur der Luft in der Höhe z im Luftkanal berechnet sich aus:

$$T_{LK}(z) = T_{m,S} - (T_{m,S} - T_{EIN,LK}) \cdot e^{-z/H_{HW}} \quad (1)$$

Mit:

H_{HW}: charakteristische Höhe (Halbwertshöhe, siehe unten)

T_{EIN,LK}: Temperatur der eindringenden Außenluft

T_{m,S}: durchschnittliche Temperatur der Schichten S1 und S3: $T_{m,S} = (T_{S1,m} + T_{S3,m})/2$

Die Halbwertshöhe bezeichnet die Höhe des Luftkanals, in der sich die mittlere Lufttemperatur (T_{I,LK}) zwischen Ein- und Austritt einstellt und wird bestimmt durch:

$$H_{HW} = \frac{\rho_{LK} \cdot c_{LK} \cdot d_{LK} \cdot v_{LK}}{2 \cdot h_{c,LK}} \quad (2)$$

Mit:

ρ_{LK}: Dichte der Luft bei T_{I,LK}

c_{LK}: Spez. Wärmekapazität der Luft

d_{LK}: Dicke des Luftkanals

v_{LK}: Mittlere Luftgeschwindigkeit im Luftkanal

h_{c,LK}: Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient für den belüfteten Zwischenraum (h_{c,LK}) berechnet sich als eine Näherung aus dem Wärmeübergangskoeffizient für einen geschlossenen Zwischenraum (h_{g,LK}):

$$h_{c,LK} = 2 \cdot h_{g,LK} + 4 \cdot v_{LK} \quad (3)$$

Mit:

h_{g,LK}: Wärmeübergangskoeffizient des geschlossenen Zwischenraums nach Norm

$$h_{g,LK} = Nu_{LK} \cdot \frac{\lambda_j}{s_j} \quad (4)$$

Mit:

λ_j: Wärmeleitfähigkeit der Luft im Luftkanal

Nu_{LK}: Nusselt-Zahl nach DIN EN 673

Die Nusselt-Zahl Nu für eine vertikale Platte mit stehender Luft ergibt sich zu:

$$Nu_{LK} = 0,035 \left[\frac{9,81 \cdot d_{LK}^3 \cdot 15 \cdot \rho_j^2}{283 \cdot \mu_j^2} \cdot \frac{\mu_j \cdot c_j}{\lambda_j} \right]^{0,38} \quad (5)$$

Mit:

μ_j: Dynamische Viskosität der Luft

Die Temperatur am Ende des Luftkanals wird folgendermaßen berechnet:

$$T_{AUS,LK} = T_{m,S} - (T_{m,S} - T_{EIN,LK}) \cdot e^{-H_{LK}/H_{HW}} \quad (6)$$

Die Wärmeäquivalent-Temperatur bzw. die mittlere Temperatur der Luft im Zwischenraum wiederum wird bestimmt durch:

$$T_{I,LK} = T_{m,S} - \frac{H_{HW}}{H_{LK}} (T_{AUS,LK} - T_{EIN,LK}) \quad (7)$$

Der flächenspezifische Wärmestrom von den beiden Oberflächen des Luftkanals an die Luft berechnet sich aus:

$$q_{c,S1} = h_{c,LK} \cdot (T_{I,LK} - T_{S1,m}) \quad (8)$$

$$q_{c,S2} = h_{c,LK} \cdot (T_{I,LK} - T_{S3,m}) \quad (9)$$

Der gesamte Wärmestrom vom Zwischenraum an die Luft berechnet sich zu:

$$q_L = q_{c,S1} + q_{c,S3} \quad (10)$$

Bzw.:

$$Q_L = (q_{c,S1} + q_{c,S3}) \cdot A_{Kanal} \quad (11)$$

Mit:

A_{Kanal} : Luftüberströmte Fläche des Luftkanals

Die Berechnung dieser Schritte kann in TRNSYS mit Hilfe mehrere Gleichungen im Simulation Studio erfolgen. Modelliert wird die aLT in Type 56 durch Erzeugung eines eigenen Luftknotens (kurz Airnode) für den Luftkanal, siehe Abb. 4. Die Bestandswand mit der thermisch aktiven Schicht wird als Grenzwall zwischen Airnode 1 (Innenraum) und Airnode 2 (Luftkanal) definiert. Die Außenwand von Airnode 2 ist dann „nur“ noch das WDVS. Die Airnode 2 wird auf die Wärmeäquivalent-Temperatur $T_{I,LT}$ temperiert. Die berechnete Temperatur am oberen Ende des Luftkanals $T_{AUS,LK}$ kann dem Innenraum (Airnode 1) als temperierte Frischluft, über ein sogenanntes „Ventilation-Type“ zur Verfügung gestellt werden. Durch das Setzen der Wärmeäquivalent-Temperatur für die Airnode 2 und der Wärmeübergangskoeffizienten ($h_{c,LK}$) für alle Flächen der Airnode 2 werden äquivalente Wärmeströme innerhalb der Airnode generiert. Es wird somit keine Temperaturerhöhung über den Luftkanal modelliert und auch kein Lufteintritt von außen verknüpft, sondern „nur“ eine Wärmeäquivalent-Temperatur berechnet, die zu äquivalenten Wärmeströmen von den Oberflächen an die Luft und durch die Konstruktion führt (Konvektion, Strahlung und Wärmeleitung wird in TRNSYS modelliert).

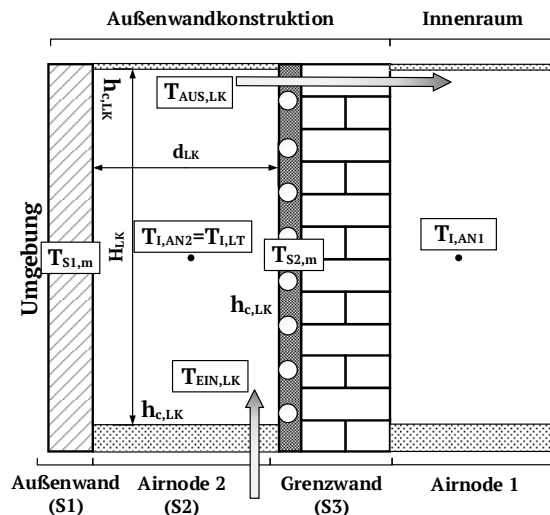


Abbildung 4: Übertragung des Schemas aus DIN EN 13363 auf die Modellierung in TRNSYS-Type 56 unter Verwendung von zwei Luftknoten (Airnodes).

Fazit Modellierung

Generell ermöglichen die beiden Ansätze die Modellierung der aLT in TRNSYS, erfordern jedoch einer Validierung für eine abschließende Bewertung. Bei beiden Modellen wird derzeit der Wärmeübergang im Lufteinlass/Luftauslass sowie der Einfluss des Ventilators und der Filter und Klappen nicht betrachtet. Die Stabilität des Berechnungsansatzes nach DIN EN 13363 ist für instationäre Simulationen noch zu überprüfen, da bisher nur quasi-stationäre Betriebszustände modelliert wurden. Im Folgenden erfolgt die Überprüfung der beiden Modelle anhand einer im Maßstab 1:1 errichteten Laborwand der aLT.

LABORWAND

Aufbau/Struktur

Ziel der errichteten Laborwand war eine gleichmäßige Luftverteilung (homogenes Geschwindigkeitsprofil) über die komplette Kanalbreite zu erzeugen und die Wärmeströme detailliert messen zu können, um so die Modellierungsansätze für die Wärmetransportvorgänge im Luftkanal validieren zu können. Nach Überprüfung der Homogenität der Strömungsverhältnisse der Luft über die Kanalfäche wurde anhand von real zu erwartenden Luftmengenströmen die erreichbare Wärmeübertragung messtechnisch bestimmt und den Simulationsergebnissen gegenübergestellt. Ein Querschnitt durch die Laborwand ist in Abb. 5 dargestellt. Durch eine Öffnung am Fuß der Laborwand wird Umgebungsluft angesaugt. Diese überströmt die

aktive Schicht und verlässt die Laborwand am oberen Ende.

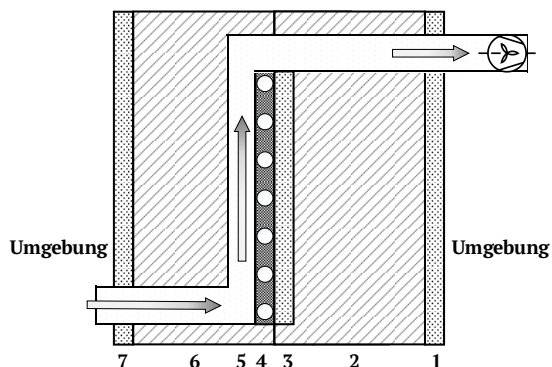


Abbildung 5: Querschnitt durch die Laborwand mit den einzelnen Schichten entsprechend Tabelle 1; nicht maßstäblich

Tabelle 1: Schichtaufbau der Laborwand der aLT entsprechend Abb. 5

Nr.	Beschreibung	Dicke
1	MDF-Trägerplatte	19 mm
2	Styropor-Dämmung (WLG035)	160 mm
3	MDF-Platte (Halterung für Matten)	10 mm
4	Kapillarrohmatte im Spezialputz	10 mm
5	Luftkanal mit Abstandshaltern	20 mm
6	Styropor-Isolierung (WLG035)	150 mm
7	MDF-Trägerplatte	19 mm

Messungen

Es wurden 34 quasistationäre Betriebszustände untersucht, die im Folgenden mit den Simulationsergebnissen der modellierten Laborwand verglichen werden sollen. In Tabelle 2 sind die Variationsbereich der Versuchsparameter dargestellt.

Tabelle 2: Variationsbereich der Versuchsparameter an der Laborwand

Name	MIN	MAX
Luftvolumenstrom	13 m ³ /h	52 m ³ /h
Luftgeschwindigkeit	0,13 m/s	0,45 m/s
Spez. Massenstrom aWT	12 kg/(m ² h)	54 kg/(m ² h)
Ges. Massenstrom aWT	28 kg/h	129 kg/h
aWT-Vorlauftemperaturen	35°C	60°C
$\Delta T (T_{aWT, ein} - T_{Luft, ein})$	16 K	40 K

Für die Messung der Temperaturen im Wasser und in der Luft kommen auf den Temperaturbereich kalibrierte Pt100-Temperatursensoren, Klasse A in Vierleiter-Technik zum Einsatz. Der Wasser-Massenstrom wird mit einem Coriolis-Massenstromsensor gemessen. Der Luft-Volumenstrom wurde mit einem Balgengaszähler ermittelt und zusätzlich mit einer Volumenstrom-Messdüse. Die Ermittlung des Messunsicherheitsbudgets ist derzeit in Bearbeitung. Der absolute Messfehler des Massenstrom-sensors liegt bei 0,3 – 1%. Die

Genauigkeit der eingesetzten Klasse A Pt100-Sensoren liegt bei $< \pm(0,15+0,002 \cdot t)$ und der Messfehler des eingesetzten Balgengaszählers liegt bei $\pm 1\%$.

ERGEBNISANALYSE

Übereinstimmung Messung - Simulation

In der folgenden Auswertung wird die Übereinstimmung zwischen den Messdaten von der Laborwand und den beiden Modellierungsansätzen für die folgenden Größen ausgewertet:

- Wasserseitiger Wärmestrom (Q_W)
- Luftseitiger Wärmestrom (Q_L)
- Wärmeverlustkoeffizient (H_{LK})
- Wärmeübertragerkennzahl ($U_{WÜT}$)

Als Input werden den Simulationsmodellen die Umgebungsbedingungen (Temperatur, Druck und Feuchte), die Massenströme und die Eintrittstemperaturen (beides Luft & Wasser) übergeben. Die Darstellung erfolgt mit Hilfe von *Boxplots*, da diese Art der Auswertung einen schnellen Überblick bietet, in welchen Bereich die Übereinstimmung liegt. Die Box in der Abbildung entspricht dem Bereich, in dem die mittleren 50 % der Übereinstimmungen liegen. Der mittlere Strich stellt den Median dar. Dabei wird die Übereinstimmung von Messwert und Simulationsergebnis ermittelt. Neben der prozentualen Darstellung mit Hilfe der Boxplots wird, auf Grund der geringen Losgröße (34 Messreihen) auch noch die absolute Häufigkeit der Übereinstimmung dargestellt. Bei dem Wärmeverlustkoeffizient können drei Berechnungswege miteinander verglichen werden. Einerseits kann die Energiebilanz für die Laborwand aufgestellt werden und die Differenz zwischen wasserseitigem (Q_W) und luftseitigem (Q_L) Wärmestrom als Verlustwärmestrom definiert werden. Wird dieser Verlustwärmestrom auf die Temperaturdifferenz bezogen, lässt sich der entsprechende Wärmeverlustkoeffizient (H_{LK}) berechnen, siehe Gl. 12.

$$H_{LK} = \frac{(Q_W - Q_L)}{(T_{I,LK} - T_{amb})} \quad (12)$$

Bei den beiden Simulationsmodellen werden die Wärmeverluste als Output generiert. Daneben kann der Wärmeverlustkoeffizient der Laborwand anhand von Materialkennwerten ermittelt werden (stationäre U-Wert-Berechnung). Entsprechend Schmidt et al., 2016 und Polifke & Kopitz, 2009

wird zusätzlich der charakteristische U-Wert „U_{WÜT}“ der aLT als (Wasser/Luft)-Wärmeübertrager berechnet und verglichen.

$$U_{WÜT} = C_L \cdot N / A_{Kanal} \quad (13)$$

Mit:

C_L: Wärmekapazitätsstrom [W/K]

N: Wärmeübertragerkennzahl []

Auswertung Wasserseitiger Wärmestrom (Q_W)

Die Ergebnisse für Q_W können Abb. 8 und Abb. 9 entnommen werden. Bei der Nutzung von Type 1230 liegen alle Übereinstimmungen im Bereich +/- 20% um den Messwert. Der Median der Übereinstimmung liegt bei 101%. Zusätzlich liegen 25 von 34 Messwerten im Bereich +/- 10%. Die häufigste Übereinstimmung liegt bei ca. 91%. Bei dem Modell nach DIN EN 13363 liegen 33 von 34 Übereinstimmungen im Bereich +/- 20%. Ein Wert (Messreihe 8) liegt außerhalb. Der Median der Übereinstimmung liegt bei 91%. Zusätzlich liegen 24 von 34 Messwerten im Bereich +/- 10%. Die häufigste Übereinstimmung liegt bei rund 93%. Insgesamt liegen die Ergebnisse von DIN EN 13363 leicht unterhalb der Ergebnisse von Type 1230, die durchschnittliche Abweichung ist somit geringfügig höher. Tendenziell liegen die Simulationsergebnisse eher unter den Messergebnissen (Übereinstimmung <100%).

Auswertung Luftseitiger Wärmestrom (Q_L)

Die Ergebnisse für Q_W können Abb. 11 und Abb. 12 entnommen werden. Bei der Nutzung von Type 1230 liegen 33 von 34 Übereinstimmungen im Bereich +/- 10%. Ein Wert (Messreihe 8) liegt außerhalb. Der Median der Übereinstimmung liegt bei 100%. Zusätzlich liegen 32 von 34 Messwerten im Bereich +/- 5%. Die häufigste Übereinstimmung liegt bei rund 101%. Beim Modell nach DIN EN 13363 liegen alle Übereinstimmungen im Bereich +/- 10% um den Messwert. Der Median der Übereinstimmung liegt bei 102%. Zusätzlich liegen 28 von 34 Messwerten im Bereich +/- 5%. Die häufigste Übereinstimmung liegt bei ca. 103%. Insgesamt liegen die Ergebnisse von DIN EN 13363 leicht oberhalb der Ergebnisse von Type 1230, die durchschnittliche Abweichung ist somit geringfügig höher. Tendenziell liegen die Simulationsergebnisse eher über den Messergebnissen (Übereinstimmung >100%).

Auswertung Wärmeverlustkoeffizient (H_{LK})

Die Ergebnisse für H_{LK} können Abb. 10 entnommen werden. Beim Wärmeverlustkoeffizient weisen die Werte, die aus der Energiebilanz der Laborwand berechnet wurden die höchsten Schwankungen auf. Dies ist erklärbar, da hier die Abweichungen von allen Messwerten für die Wärmeströme „versteckt“ sind. Für Messreihe 8 ist hier ein sehr hoher Ausschlag erkennbar. Über alle 34 Messreihen ergibt sich hier ein mittlerer Wert von ca. 1,5 W/K. Die Werte nach der U-Wert-Berechnung liegen konstant bei einem Wert von rund 1 W/K. Die simulierten Werte mit Type 1230 liegen im Mittel bei ca. 2,7 W/K und die nach DIN EN 13363 bei rund 1,6 W/K. Die Differenz zwischen den Verlustkoeffizienten muss noch weiter untersucht werden, auch wenn die Werte absolut nur etwa 10% des Energiestroms in der Konstruktion ausmachen.

Auswertung Wärmeübertragerkennzahl (U_{WÜT})

Die Ergebnisse für U_{WÜT} können Abb. 13 entnommen werden. Insgesamt ergibt sich hier eine gute Kongruenz zwischen der Messung und den beiden Simulationsmodellen. Der mittlere Wert für U_{WÜT} über alle 34 Messreihen liegt bei rund 5,0 W/m²K. Bei der Simulation mit Type 1230 ergibt sich ebenfalls ein mittlerer Wert von ca. 5,0 W/m²K. Der mittlere Wert bei der Simulation mit der Berechnung nach DIN EN 13363 liegt bei ca. 4,3 W/m²K.

Gesamtfazit

Bei Betrachtung der wesentlichen Energieströme, von der Kanaloberfläche an die Luft (Q_L) und von der aktiven Schicht in die Konstruktion (Q_W) liegen 82% aller simulierten Ergebnisse im Bereich +/- 10% um den jeweiligen Messwert. Nur acht Werte liegen über einer Abweichung von 15%. Die maximale Abweichung liegt bei rund 21%. Bei dieser Messreihe (Nr.8) liegt die Vermutung nahe, dass es sich um einen Messfehler handelt, vgl. Abb. 10. Ebenso verhält es sich mit der Messreihe 21. Darüber hinaus liegen jedoch rund 60% aller Simulationsergebnisse im Bereich +/- 5% um den jeweiligen Messwert. Unter Einbeziehung der Messunsicherheit kann hier also insgesamt von einer sehr guten Übereinstimmung gesprochen werden.

Wasserseitiger Wärmestrom (Q_w)

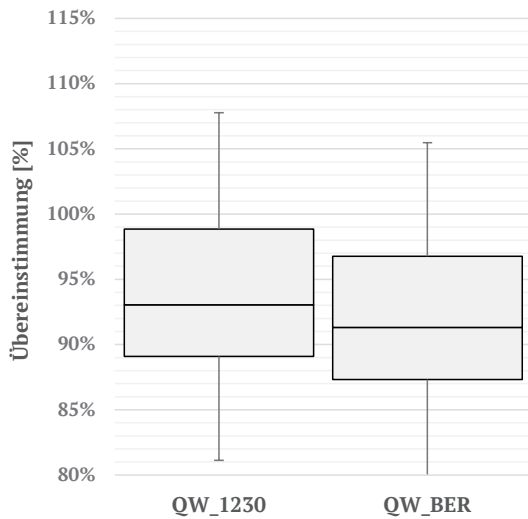


Abbildung 8: Boxplot der Übereinstimmung von Q_w von Messung und Simulation mit Type 1230 (QW_1230) resp. DIN EN 13363 (QW_BER)

Luftseitiger Wärmestrom (Q_L)

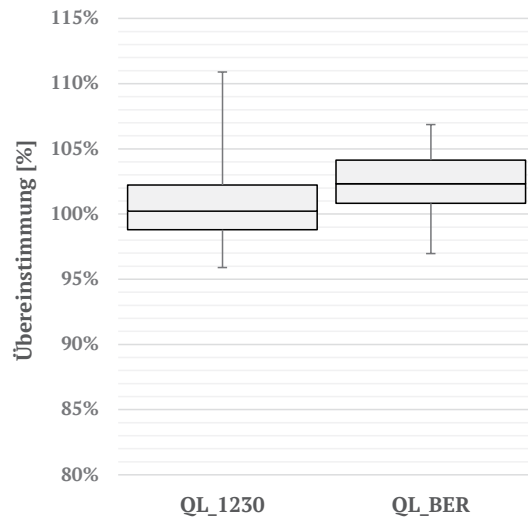


Abbildung 11: Boxplot der Übereinstimmung von Q_L von Messung und Simulation mit Type 1230 (QL_1230) resp. DIN EN 13363 (QL_BER)

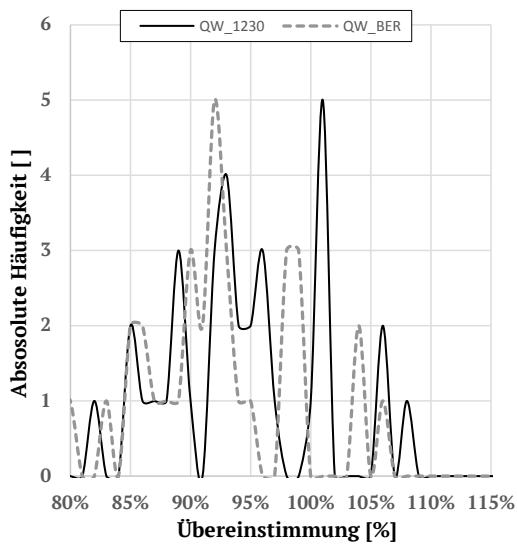


Abbildung 9: Übereinstimmung von Q_w von Messung und Simulation nach mit Type 1230 (QW_1230) resp. DIN EN 13363 (QW_BER)

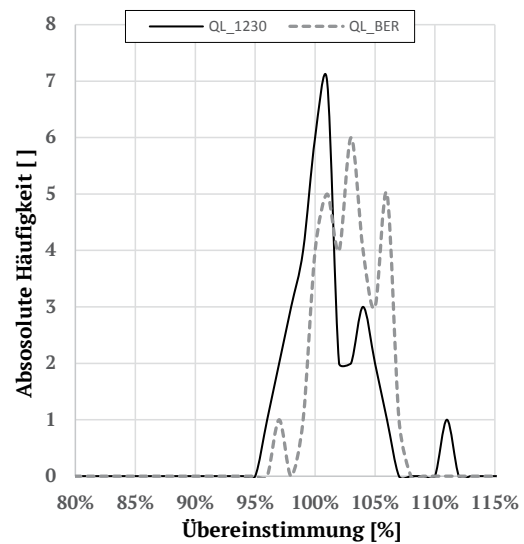


Abbildung 12: Übereinstimmung von Q_L von Messung und Simulation mit Type 1230 (QL_1230) resp. DIN EN 13363 (QL_BER)

Wärmeverlustkoeffizient (H_{Lk})

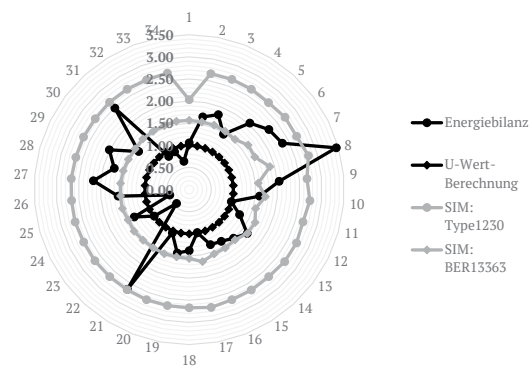


Abbildung 10: Vergleich der Wärmeverlustkoeffizienten $[W/K]$ der Laborwand für alle vier Berechnungen und alle 34 ausgewerteten Messreihen

Wärmeübertragerkennzahl ($U_{w\dot{U}T}$)

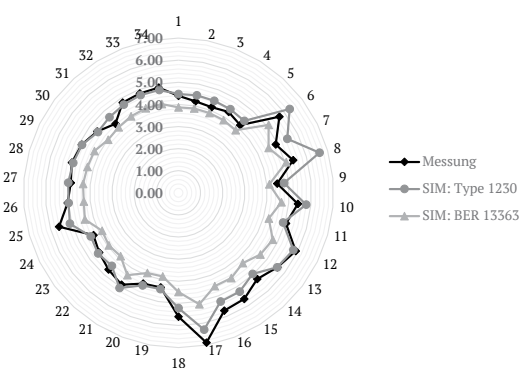


Abbildung 13: Vergleich von $U_{w\dot{U}T} [W/m^2K]$ für die Messung und die beiden Simulationsmodelle über alle 34 Messreihen

ZUSAMMENFASSUNG

Für die aLT wurde eine praktikable Modellierungsmöglichkeit mit der Software TRNSYS gesucht. Durch einen Vergleich mit Messwerten einer Laborwand konnten zwei Ansätze identifiziert und in den Grenzen von Tabelle 3 validiert werden. In einem der beiden Ansätze kann die aLT in die Gebäudesimulation mit Type 56 eingebunden werden, ohne die Nutzung zusätzlicher Types. Insgesamt sind die aufgetretenen Abweichungen akzeptabel für die energetischen Betrachtungen innerhalb des Projektes. Für eine isolierte Betrachtung der aLT bietet sich das Type 1230 an, für eine gekoppelte Gebäudesimulation eher der Einsatz des Modells nach DIN EN 13363.

AUSBLICK

Abschließend wurde in dem Projekt eine Feldtestfläche der aLT umgesetzt. Hier versorgt die aLT einen dahinterliegenden Raum mit temperierter Frischluft. Aus Frostschutzgründen wurde die aWT in diesem Fall mit Glykol statt Wasser befüllt. Beide Modellierungsansätze werden nochmal anhand der Messdaten von der Feldtestfläche validiert bzw. die Modellierungsansätze überarbeitet (v.a. instationäres Verhalten und Wärmeverluste). Generell soll das Verhalten der aLT in der Praxis detailliert untersucht werden (u.a. natürliche Konvektion, Tauwasserbildung, Regelung). Hierfür wurde die aLT in ein innovatives Energieversorgungskonzept, mit PVT-Hybridkollektoren, Eisspeicher und Wärmepumpe integriert. Weitere Informationen können der Projekt-homepage www.projekt-lexu.de entnommen werden.

DANKSAGUNG

Die Projekte LEXU und LEXU II wurden gefördert durch die Bundesrepublik Deutschland. Zuwendungsgeber ist das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie; Fördernummer: 0327370Y/T. Wir möchten uns an dieser Stelle für die finanzielle Unterstützung bedanken. Für den Hinweis bzgl. DIN EN 13363 möchten wir uns bei Frau Marion Hiller bedanken.

LITERATUR

DIN EN 673 2011, Glas im Bauwesen – Bestimmung des Wärmedurchgangs-

koeffizienten, Deutsche Fassung EN 673:2011

DIN EN 13363-2 2005, Sonnenschutz-einrichtungen in Kombination mit Verglasungen, Deutsche Fassung EN13363-2:2005

Klein, S.A, Beckman, W.A., Mitchell, J.W., Duffie, J.A., Freeman, T.A. 2012. TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program, SEL, University of Wisconsin, Madison, USA.

Luther, G. 2008: „Integrierte außenliegende Wandheizung – ein Verfahren zur Nutzung der...“ Patentschrift, DE10 2008 009 553 A1, <http://www.fze.uni-saarland.de/Speicher.htm>

Luther, G. 2013: Außenliegende Luftheizung, Konzept, Modellierung und Analysen. Fachbericht für das Projekt LEXU II, Universität des Saarlandes, FSt. Zukunftsenergie, Saarbrücken; <http://www.fze.uni-saarland.de/Speicher.htm>

Luther, G., Altgeld, H. 2002: Die außenliegende Wandheizung, In: Gesundheits-Ingenieur-Haustechnik-Bauphysik-Umwelttechnik 2002 (1), S. 8-15

Polifke, W., Kopitz, J. 2009: Wärmeübertragung: Grundlagen, analytische und numerische Methoden, 2.Auflage 2009, München, ISBN: 978-3-8273-7349-6

Schmidt, C., Altgeld, H., Groß, B., Luther, G., Schmidt, D. 2016. LEXU II – Einsatz von aussenliegender Wandtemperierung bei der Gebäudesanierung, Beitrag P-04-3 S.843-850 in Proceedings CESBP/BauSim 2016, Fraunhofer IRB Verlag, Dresden

Schmidt, C., Altgeld, H., Groß, B., Luther, G., Maas, S., Scholzen, F. 2017. „Außenliegende Wandtemperierung“ – LowEx-Anwendung zur Temperierung von Bestandsgebäuden und thermische Aktivierung der Bestandswand: Theoretische Grundlagen und Kennwerte, In: Bauphysik 39 (2017) Heft 4, S.215-223, Ernst & Sohn Verlag, Berlin

Schmidt, D. 2013. Modellierung einer außenliegenden Luftheizung (ALH) mit Hilfe der Software TRNSYS und Vergleich der Simulationsergebnisse mit Modellrechnungen in Excel und Messungen, Bachelor-Thesis, htw saar, Saarbrücken

Thornton, J. 2007: Ventilated, air cavity wall; Beschreibung zu TRNSYS-Type 1230, TESS LLC, University of Wisconsin, Madison, USA

DIMENSIONIERUNG VON WÄRMESPEICHERSYSTEMEN IN WOHNGBÄUDEN ZUR NETZENTLASTUNG

D. Schmidt¹ und S. Hoffmann¹

¹ Technische Universität Kaiserslautern, Fachbereich Bauingenieurwesen,
Fachgebiet Gebäudesysteme und Gebäudetechnik
Paul-Ehrlich-Straße 14, Gebäude 14, Zimmer 272, D-67663 Kaiserslautern
Tel.: 0631/205-4274, Email: daniel.schmidt@bauing.uni-kl.de

ABSTRACT

Die fluktuierende Erzeugung und Einspeisung von erneuerbaren Energien stellt das Stromnetz vor extreme Herausforderungen und der zunehmende Ausbau dieser Energiequellen wird dieses Problem zukünftig weiter verschärfen. Der Beitrag beschäftigt sich mit dem Forschungsansatz des INTERREG-Projekts PtH4GR²ID (Power-to-Heat for the Greater Regions Renewables Integration and Development), der aufzeigen soll, ob und wie Power-to-Heat in Kombination mit Wärmespeichersystemen genutzt werden kann, um das Stromnetz zu entlasten. Zu diesem Thema werden TRNSYS-Simulationen durchgeführt und die Ergebnisse bezüglich eines möglichen Netzmanagements eingeordnet. Hierbei zeigt sich, dass dieser Ansatz durchaus das Potential hat, einen wichtigen Anteil zum Gelingen der Energiewende leisten zu können.

The fluctuating generation and feed-in of renewable energies is an extreme challenge for the electricity grid and the increasing use of these energy sources will further intensify this problem in the future. This article deals with the research approach of the INTERREG-Project PtH4GR²ID (Power-to-Heat for the Greater Regions Renewables Integration and Development), which aims to demonstrate whether and how Power-to-Heat can be used in combination with heat storage systems to relieve the grid. For this topic, TRNSYS simulations are carried out and the results regarding a possible network management are classified. The results show that this approach has the potential to make an important contribution to the success of the energy transition.

EINLEITUNG

Die Energiewende ist nach wie vor ein zentrales Thema innerhalb der Forschung und wird auch in den kommenden Jahren eine große Herausforderung darstellen. So hat sich die Bundesrepublik Deutschland das Ziel gesetzt, bis 2050 mindestens 80 % des Bruttostromverbrauchs aus erneuerbaren Energien zu erzeugen. (vgl. EEG 2017 - Deutschland, 2017) Gemessen am Potenzial innerhalb Deutschlands ist dieses Ziel sicherlich erreichbar; auch eine komplette Abdeckung der benötigten Leistung durch erneuerbare Energien ist zukünftig denkbar. Dies berücksichtigt aber noch nicht die eigentlich größte Herausforderung der Energiewende – die sehr fluktuierende und kaum planbare Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien.

Die Endlichkeit der fossilen Brennstoffe ist uns längst bewusst und auch aus Klimaschutzgründen ist eine zunehmende Unabhängigkeit vom Kohle- und Gasstrom wünschenswert. Dennoch hatte diese Art der zentralen Stromerzeugung in leistungsstarken Kraftwerken über Jahre hinweg den großen Vorteil, dass sie sehr einfach steuerbar war und somit zu jeder Zeit ziemlich genau dem Strombedarf angepasst werden konnte. Dieser Vorteil wird zukünftig zunehmend wegfallen und muss durch alternative, intelligente Steuerungssysteme ersetzt werden, denn die größtenteils für die Erzeugung der Energie verantwortlichen Faktoren (Solarstrahlung und Windstärke) werden auch zukünftig nicht durch den Menschen beeinflussbar sein.

Einen interessanten Forschungsansatz für diese zukünftigen Problemstellungen können hierbei Power-to-Heat-Lösungen darstellen. Power-to-

Heat beschreibt den Vorgang, bei dem Strom in Wärme umgewandelt wird. Dabei sollte allerdings im Gegensatz zu klassischen Heizstäben eine (deutlich) bessere Effektivität erzielt werden. Besonders Wärmepumpen sind hier als mögliche Lösung zu nennen und gelten daher als Technologie, die zunehmend an Bedeutung gewinnen wird.

Über Power-to-Heat-Anlagen wird somit auch ein wichtiger Bogen zur Wärmewende aufgezeigt. Das Thema Energiewende wird oftmals auf eine zunehmende Integration von erneuerbarem Strom begrenzt, allerdings darf auch ein Umstellen der Wärmeerzeugung, die sich in Deutschland größtenteils noch über Gasheizungen darstellt, nicht vernachlässigt werden.

Innerhalb dieses thematischen Schwerpunkts ist das INTERREG-Forschungsprojekt PtH4GR²ID (Power to Heat for the Greater Region's Renewables Integration and Development) angesiedelt, in dem Forscher der Universitäten Kaiserslautern, Lüttich, Luxemburg und Nancy sowie des Forschungsinstituts IZES die Entwicklung eines Regelungssystems für Wärmepumpen untersuchen, das zu einer Entlastung der Stromnetze beitragen soll.

HINTERGRUND

Vor dem großflächigen Ausbau der erneuerbaren Energien entstanden Schwankungen im Stromnetz eigentlich ausschließlich durch unplanmäßige Kraftwerksausfälle. Um solche Engpässe abzufangen, wurde ursprünglich die Regelenergie eingeführt, also eine Energieform, die in bestimmten Zeiträumen dazu beitragen kann, dass sich Erzeugung und Bedarf die Waage halten. Mit der zunehmenden Einspeisung von erneuerbaren Energieträgern ins Stromnetz ist die Bedeutung der Regelenergie deutlich gestiegen, da die Fluktuation nicht mehr ausschließlich an Ausfälle gebunden ist, sondern auch von sich dauernd ändernden Wetterbedingungen abhängt.

Daraus folgend wird die schwankende Erzeugung von erneuerbaren Energien zukünftig nicht mehr ausschließlich über oftmals sehr teure Regelenergie abzufangen sein, sondern das Augenmerk sollte zunehmend auch auf ein Anpassen des Bedarfs an die Erzeugung gerichtet werden (Demand-Side-Management). Es gilt also Wege zu finden, den Strom dann zu

nutzen, wenn er zur Verfügung steht und den Bedarf möglichst gering zu halten, wenn dies nicht der Fall ist. Dies muss allerdings unter der Prämisse geschehen, dass der gewohnte Komfort nicht leidet.

An genau diesem Punkt wird das Thema Power-to-Heat interessant, innerhalb dessen sich der Beitrag größtenteils auf elektrisch betriebene Wärmepumpen fokussiert. Diese nutzen Strom und erzeugen Wärme, die wiederum recht einfach gespeichert werden kann, da nahezu jeder Haushalt in Deutschland über einen Wärmespeicher verfügt, meistens gefüllt mit Wasser. Die Wärme, die wir zum Heizen unserer Wohnungen nutzen, muss also nicht zwingend dann produziert werden, wenn wir die Heizung anschalten. Wärmepumpen können vielmehr die Wärme genau dann durch elektrischen Strom generieren, wenn das Netz Stromverbraucher benötigt und die gespeicherte Wärme ohne Erzeugung nutzen, wenn eine Entlastung des Netzes gefordert ist.

Dieser thematische Schwerpunkt wird innerhalb des Beitrags behandelt. Im Mittelpunkt steht die Frage, wie lange Gebäude aus verschiedenen Baualtersklassen mit unterschiedlichen Speichervolumina beheizt werden können, ohne dass die Wärmepumpe zusätzliche Wärme generieren muss, wenn der Speicher zu Beginn der Betrachtung vollgeladen ist. Die hieraus resultierenden Ergebnisse sollen einen Beitrag zur Potenzialabschätzung von Power-to-Heat Anlagen zur Stabilisierung des Netzes geben.

VORGEHENSWEISE

Um die beschriebenen Untersuchungen durchführen zu können, muss in einem ersten Schritt eine passende Simulationsumgebung geschaffen werden. Als Software wurde hierfür TRNSYS gewählt, da sich die benötigten Modelle (Speicher, Gebäude, Wärmepumpe, etc.) dort gut abbilden lassen. (vgl. TRANSSOLAR, 2018)

Zur Festlegung eines Gebäudes wurde von den Projektpartnern die Tabula-Studie genutzt und aus dieser ein deutsches Einfamilienhaus als Referenzobjekt gewählt. (vgl. IEE Project TABULA, 2012) Um ein möglichst breites Spektrum an Gebäuden anzusprechen und um auch verschiedene Heizwärmebedarfe abzubilden, wurden, durch ein Anpassen der thermischen Gebäudehülle, verschiedene Baualtersklassen erzeugt. Die Baualtersklasse des ursprünglichen Gebäudes ist E (1958 -1968),

zusätzlich gewählt wurden die Altersklassen I (1995 – 2001, nach 3. Wärmeschutzverordnung), J (2002-2009, nach EnEV) und L (jünger als 2016, aktueller Neubau). Zudem wurde das Gebäude in zwei thermische Zonen mit unterschiedlicher Solltemperatur unterteilt. Eine Zone wird hierbei auf 22 °C geheizt, die andere wird als angenommenes Schlafzimmer lediglich auf 18 °C gehalten. Zudem verfügt das Gebäude über einen unbeheizten Keller, sowie über ein teilweise unbeheiztes Dach. Das Gebäude wurde dreidimensional in SketchUp (vgl. Trimble, 2018) gezeichnet und anschließend über die Schnittstelle TRNSYS3d eingelesen und steht somit während den Simulationen im Type 56 zur Verfügung, der innerhalb von TRNSYS alle für die Simulation relevanten Gebäudedaten enthält.

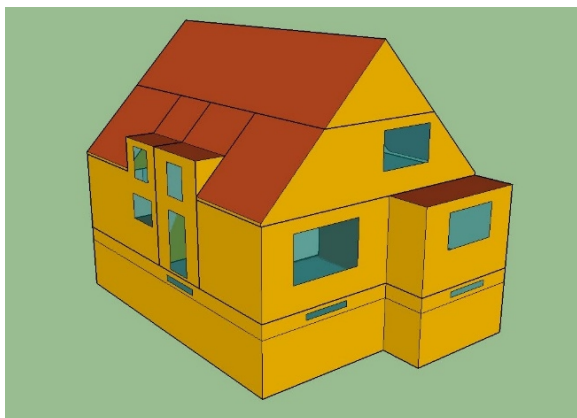


Abbildung 1: SketchUp-Modell des Referenzgebäudes

Weiterhin wurden die Speichervolumina variiert. Hierbei wurde festgelegt, Speicher mit einem Volumen von ca. 500 l, 1000 l und 2000 l zu untersuchen. Die Speicher und ihre Dämmung wurden nach Herstellerinformationen modelliert. (vgl. Vaillant) Als Medium wird innerhalb dieses Beitrages lediglich Wasser gewählt, zukünftig können allerdings auch Untersuchungen mit PCM interessant sein. Zur Modellierung des Speichers innerhalb TRNSYS wurde Type 340 gewählt, da dieser über eine große Anzahl frei definierbarer Größen verfügt und sich somit außerordentlich gut eignet, um Wasserspeicher auf der Grundlage von Herstellerinformationen zu modellieren. (vgl. Harald Drück, 2006)

Bezüglich der Wärmepumpe liegt der Fokus des Beitrags auf Luft-Wasser-Wärmepumpen. Dies ist die momentan in Deutschland am häufigsten genutzte Technik, da sie am einfachsten zu installieren ist. (vgl. European Heat Pump Association (EHPA), 2018) Wärmepumpen mit

Erdkollektoren und/oder Tiefenbohrung sind nicht nur kostenintensiver, sondern stehen auch längst nicht für jedes Wohngebäude zur Verfügung, wohingegen Luft als Wärmequelle frei verfügbar ist. Für die Simulation der Wärmepumpe wurde der TRNSYS-Type 941 gewählt, dieser stellt eine klassische Luft-Wasser Wärmepumpe dar. (vgl. TESS, 2018) In diesem Zuge sei allerdings erwähnt, dass die Effizienz und die Leistungszahlen der Wärmepumpe innerhalb dieses Beitrages nicht detailliert untersucht werden. Der Fokus liegt auf dem Zeitraum, in dem die Wärmepumpe nicht läuft und das Gebäude lediglich durch die gespeicherte Wärme beheizt werden muss.

Bei der Erzeugung der Wärme wird das maximale Temperaturlimit innerhalb des oberen Bereiches des Speichers auf 70 °C gelegt, bei dieser Temperatur gilt der Speicher in der Betrachtung als vollgeladen. Durch die natürliche Schichtung innerhalb eines Speichers besteht trotzdem die Möglichkeit, im unteren Bereich auch kühleres Wasser zu entziehen, der Speicher wird also nicht durchmischt. Diese definierte Temperatur ist zwar relativ hoch und Wärmepumpen arbeiten in diesem Bereich nicht mehr sonderlich effizient, da die zu überbrückende Wärmedifferenz zwischen Quellen- und Senkenseite zu hoch ist, allerdings soll diese hohe Temperatur auch nur erreicht werden, wenn es zur Entlastung des Netzes beiträgt. Und zu diesen Zeitpunkten, an denen zukünftig zu viel Elektrizität ins Netz eingespeist wird, ist es letztlich immer noch besser, den Strom mit einem geringen Wirkungsgrad zu nutzen, als überhaupt nicht.

Als Heizsystem, um die Wärme innerhalb des Gebäudes nutzen zu können, wurden zum jetzigen Zeitpunkt lediglich Radiatoren betrachtet, obwohl Wärmepumpen gerade in Neubauten hauptsächlich in Kombination mit Flächenheizsystemen genutzt werden. Dabei wurde das Heizsystem mit Type 362, der einen klassischen Radiator abbildet, modelliert. (vgl. S. Holst) Entsprechende Simulationen mit einer Flächenheizung werden zukünftig ebenfalls angestrebt.

Mit den Modellen (Wärmepumpe, Speicher, Gebäude, Radiatoren) wurde anschließend eine Simulationsumgebung in TRNSYS erstellt, mit der die gewünschten Simulationen durchgeführt werden können. In den folgenden Ergebnissen

werden reale Wetterdaten für die Simulation genutzt, um die Ergebnisse in einem aktuellen Szenario abbilden zu können. Als Quelle für die Daten wurde der Deutsche Wetterdienst genutzt, als Standort wurde Saarbrücken festgelegt. (vgl. Deutscher Wetterdienst, 2018) Aus den Aufzeichnungen des Wetterdienstes wurde anschließend ein Inputfile für die TRNSYS Simulation erstellt. Die hierfür benötigten Messgrößen sind in erster Linie die Umgebungstemperatur und die Solarstrahlung.

Bei der Auswahl der Wetterdaten wurde ein besonderes Augenmerk daraufgelegt, einen Zeitraum zu finden, indem sich Phasen mit einem hohen und einem niedrigen Anteil an erneuerbar produziertem Strom gegenüberstehen. Somit können die Simulationsergebnisse in einem realen Zeitraum des Jahres eingeordnet werden. Der letztlich gewählte Zeitraum umfasst den 24. bis 30.01.2018.

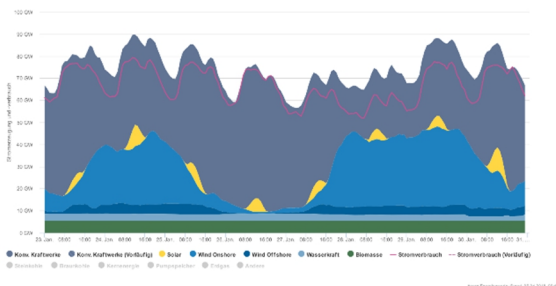


Abbildung 2: Stromdaten für erneuerbare und konservative Erzeugung in Deutschland (Agora Energiewende)

Abbildung 2 zeigt reale Stromdaten in Deutschland für diesen Zeitraum. Hierbei wurde bewusst eine Zeitspanne gewählt, in der mehrere Tage mit einer ungewöhnlich hohen Einspeisung an erneuerbarer Energie von einem Zeitraum mit sehr geringer Einspeisung unterbrochen werden. Somit kann das zentrale Thema des Beitrags unter tatsächlichen Randbedingungen untersucht werden.

Während der Zeiten mit einem relativ hohen Anteil an erneuerbarem Strom im Netz, kann und soll die Wärmepumpe laufen, innerhalb der Zeiten mit sehr geringer Einspeisung allerdings nach Möglichkeit nicht. Der Hintergrund dieser Annahme, der in der Einleitung und im Hintergrund schon angesprochen wurde, ist die Entlastung des Netzes. Phasen, in denen bereits jetzt teilweise über 50 % des Stromes aus erneuerbaren Quellen stammen, werden zukünftig Phasen sein, in denen zu viel Strom

erzeugt wird. Auf der anderen Seite werden Tage, an denen die Sonne kaum scheint und es relativ windstill ist, auch bei einem zunehmenden Ausbau der erneuerbaren Energien nicht in der Lage sein, den Strombedarf zu decken. Daher werden die Schaltsignale der Wärmepumpe an diese Gegebenheiten angepasst und als Zeitspanne mit einem geringen Anteil an erneuerbarer Energie werden mit Bezug auf die obige Abbildung 48 Stunden gewählt. (25.01. 16:00 Uhr bis 27.01. 16:00 Uhr) Die nachfolgende Untersuchung soll zeigen, unter welchen Bedingungen Gebäude und Speicher in der Lage sind, für diese 48 Stunden auf eine Erzeugung von Wärme zu verzichten. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Wetterdaten für Saarbrücken innerhalb dieses Zeitraums, der auch als Quelle für die Erstellung eines TRNSYS Wetterfiles genutzt wurde.

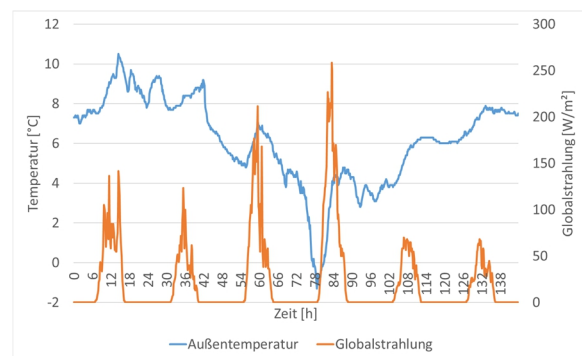


Abbildung 3: Wetterdaten am Standort Saarbrücken zur Generierung des TRNSYS-Inputfiles

Zum Auswerten der Simulationen musste zudem ein Rahmen für die thermische Behaglichkeit festgelegt werden. Als Referenzkriterium wurde hierfür die operative Temperatur innerhalb der 22 °C Zone des Gebäudes gewählt: solange diese oberhalb von 20 °C liegt, wird die Behaglichkeit noch als akzeptabel eingestuft.

Die zentrale Frage bei der Auswertung der folgenden Ergebnisse lautet also, wie lange der thermische Komfort innerhalb des Gebäudes aufrechterhalten werden kann, wenn keine zusätzliche Wärme erzeugt wird? Hierbei wird ein besonderes Augenmerk auf die Baualtersklassen und die verschiedenen Speichervolumina gelegt.

ERGEBNISSE

In einem ersten Schritt wurde der Heizwärmebedarf der entwickelten Gebäudemodelle über Simulationen ermittelt. Die folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse.

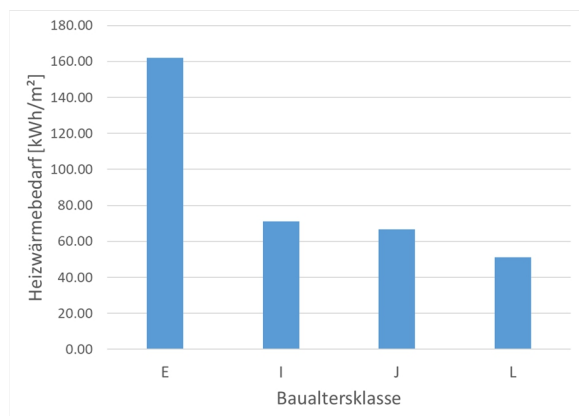


Abbildung 4: Heizwärmebedarf der Baualterklassen

Die Abbildung verdeutlicht, dass der Heizwärmebedarf kontinuierlich mit zunehmenden Dämmstandards sinkt und somit zwischen den Altersklassen E (~162 kWh/m²) und L (~51 kWh/m²) abnimmt. Wie bereits erwähnt, wurde das Gebäude der Tabula-Studie entnommen und entspricht einem realen Einfamilienhaus aus den 1960er Jahren. Der mit diesem Modell simulierte Heizwärmebedarf entspricht nahezu genau dem Bedarf, der in der Studie als Referenz angegeben wird. (vgl. IEE Project TABULA, 2012) Wichtig bei den jüngeren Baualterklassen ist die Vorgehensweise, dass kein neues Gebäudemodell entworfen wurde, sondern lediglich die U-Werte der thermischen Hüllfläche auf typische Werte für die entsprechenden Zeiträume angepasst wurden. Dabei bleiben die simulierten Ergebnisse auch für die anderen gewählten Altersklassen in einem realistischen Bereich.

Mit diesen Gebäudemodellen wurden anschließend die weiteren Simulationen durchgeführt. Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse.

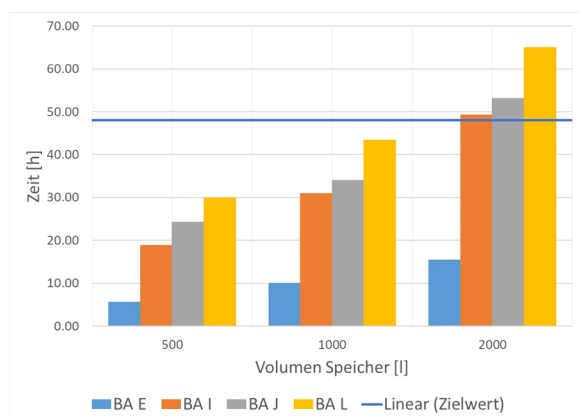


Abbildung 5: Simulationsergebnisse für Baualterklassen und Speichervolumina

Das Diagramm ist in drei Abschnitte unterteilt; die Unterteilung orientiert sich hierbei an den Volumina des Wassertanks. Wie beschrieben, wurden drei unterschiedlich große Volumina gewählt (~ 500 l, ~ 1000 l, ~ 2000 l), zudem wurden vier verschiedene Baualterklassen simuliert. Die Ergebnisse zeigen für die verschiedenen Kombinationen aus Volumen und Baualterklasse auf, wie viele Stunden die operative Temperatur innerhalb des Wohnbereichs oberhalb von 20 °C gehalten werden kann, wenn keine zusätzliche Wärme generiert wird. Die horizontale Linie gibt hierbei den gewählten Zielwert von 48 Stunden vor, der auf Grund der realen Stromdaten in Abbildung 2 gewählt wurde.

Auf den ersten Blick zeigen die Ergebnisse die erwartete Struktur. Umso größer das Volumen und umso jünger die Baualterklasse, umso länger kann die Temperatur gehalten werden. Dies war zu erwarten und hat seinen Ursprung in dem Verhältnis von Volumen zu Speicherkapazität und von Baualterklasse zu Heizwärmebedarf.

Zudem zeigt sich, dass mindestens ein Speichervolumen von 2000 l zur Verfügung stehen muss, um den Zeitraum von 48 Stunden zu überbrücken. Mit diesem Volumen ist es ab der Baualterklasse I möglich, den thermischen Komfort ausreichend lange zu wahren.

DISKUSSION

Nachfolgend werden die präsentierten Ergebnisse eingeordnet und die zentralen Fragen des Forschungsansatzes beantwortet.

Zur Einleitung der Diskussion wird die Vorgehensweise nochmal kurz zusammengefasst. In einem ersten Schritt wurde ein Zeitraum gesucht, in dem sich Phasen mit hohem und niedrigem Anteil an erneuerbarem Strom im Netz gegenüberstehen. Ein solcher Zeitraum wurde zwischen dem 24.01. und 30.01.2018 identifiziert und darauffolgend als Randbedingung der Simulation definiert. Daraufhin wurden, passend zu diesem Zeitpunkt, reale Wetterdaten genutzt, um ein entsprechendes Inputfile für die Simulation zu generieren.

Der zu erreichende Grenzwert wurde während den Simulationen auf 48 Stunden festgelegt, dies entspricht in etwa dem Zeitraum, in dem das Netz fast ausschließlich Strom aus konventionellen

Kraftwerken enthält und somit der Verbrauch möglichst geringgehalten werden sollte, wenn diese Kraftwerke zunehmend abgeschaltet werden.

Bei einem detaillierten Blick auf die Ergebnisse zeigt sich zuerst, dass Gebäudealtersklasse E, unabhängig vom Speichervolumen, kein großes Potenzial zur Netzentlastung besitzt. Der Wärmebedarf typischer Gebäude aus dieser Baualtersklasse ist letztlich zu hoch, als dass man das Gebäude längere Zeit ohne Erzeugung von Wärme beheizen könnte. Selbst bei einem vollgeladenen Speichersystem müsste die Wärmepumpe innerhalb der Heizperiode unabhängig von den betrachteten Speichervolumina also mindestens einmal pro Tag laufen, um den thermischen Komfort sicher zu stellen.

Die anderen betrachteten Baualtersklassen verfügen hingegen bereits über eine Wärmedämmung, die unterschiedlichen resultierenden Heizwärmebedarfe sind in Abbildung 4 dargestellt. Daraus resultiert auch, dass die Gebäude mit einer geringeren Temperatur beheizt werden können und das Speichersystem somit länger ausreichend Wärme enthält. Bei Erhöhung des Speichervolumens wird somit eine ebenso höhere Speicherkapazität erzielt und daraus resultierend kann eine längere Zeitdauer überbrückt werden. Somit können die Gebäude also einen signifikanten Beitrag zur Netzentlastung leisten, wobei das Potenzial mit einer tendenziellen Überdimensionierung der Wärmespeicher steigt.

Im hier gewählten Anwendungsbeispiel zeigt sich, dass bei einem 2000 l-Tank, also einem für Einfamilienhäuser schon recht großen Volumen, die drei Gebäude mit Dämmung in der Lage sind, den Grenzwert von mindestens 48 Stunden zu erreichen. Diese Gebäude könnten also innerhalb der wind- und solararmen Zeitspanne ihren Strombedarf ohne Unterschreitung des minimalen thermischen Komforts reduzieren. Ebenso wären sie in der darauffolgenden Periode mit sehr hohem Anteil an erneuerbaren Energien in der Lage, für mehrere Stunden die Wärmepumpe als Stromverbraucher zuzuschalten und somit die freie Kapazität innerhalb des Speichersystems wieder mit Wärme zu beladen.

Bei der Diskussion der Ergebnisse sei allerdings auch nochmals erwähnt, dass die erhaltenen Resultate maßgeblich mit den gewählten thermischen Randbedingungen zusammenhängen. Der Grenzwert wurde hier bei einer operativen Temperatur von 20 °C gezogen, allerdings definiert jeder Mensch selbst, bis zu welcher Temperatur er seine Umgebung als komfortabel wahrnimmt. Dementsprechend könnte diese Temperatur im Anwendungsfall in beide Richtungen variieren, je nach persönlicher Präferenz, und dies hätte somit auch einen Einfluss auf die Ergebnisse. Die gewählten 20 °C bewegen sich zwar bereits am unteren Rand dessen, was man in der eigenen Wohnung und innerhalb der Heizperiode im Normalfall akzeptieren würde, da es sich allerdings um einen Grenzwert handelt, der in Kombination mit einem Regelungssystem nur möglichst selten unterschritten werden darf, wurde dieser Wert als Referenz gewählt.

Ein weiterer wichtiger Punkt innerhalb des Beitrages ist die eigentliche Relevanz des Forschungsansatzes, also eine Einschätzung, ob die Erzeugung von Wärme in Wohngebäuden in ihrer Gesamtheit überhaupt eine ausreichend große Rolle spielt, um das Stromnetz entlasten zu können. Laut aktuellen Statistiken entfallen etwa 25 % des Energieverbrauchs in Deutschland auf private Haushalte (vgl. Umweltbundesamt, 2016) und innerhalb der Haushalte wiederum etwa 70 % auf die Erzeugung von Wärme. (vgl. Umweltbundesamt, 2016) Dementsprechend nutzen wir in Deutschland ca. 18 % der kompletten eingesetzten Energie zum Erzeugen der Wärme in Wohngebäuden. Wie bereits angesprochen, wird ein Großteil dieser Wärme über Gasheizungen erzeugt, also eine Technologie, die zukünftig auch zunehmend umgestellt werden muss, wenn man sich von fossilen Energieträgern lösen möchte. Power-to-Heat-Lösungen und dabei speziell Wärmepumpen werden hierbei definitiv eine Alternative darstellen. Anhand der signifikanten Bedeutung von Raumwärme innerhalb Deutschlands ist das Potenzial von geregelter, möglichst intelligent erzeugter Wärme groß.

Eine hohe Bedeutung bei der Zukunftsfähigkeit des untersuchten Systems kommt hierbei sicherlich einer entsprechenden Regelung zu, die Signale aus dem Netz enthält, auf prädiktive Wetterdaten zugreift und den thermischen

Komfort innerhalb des Gebäudes berücksichtigt. Die Entwicklung eines solchen Systems ist einer der zentralen Ansätze des INTERREG-Forschungsprojekts PtH4GR²ID.

Dementsprechend kann es durchaus auch eine interessante Überlegung für weitergehende Untersuchungen sein, noch größere Volumen für Wärmespeichersysteme zu betrachten. Über eine heutzutage standardmäßige Dämmung können die Wärmeverluste der Speichersysteme minimiert werden und das angesprochene Potenzial zur Netzentlastung könnte dementsprechend weiter gesteigert werden. Demgegenüber stehen allerdings auch höhere Kosten und ein steigender Platzbedarf für die Wärmespeicher. Verglichen mit momentan noch sehr kostenintensiven Stromspeichern könnte dieser Ansatz dennoch eine interessante Alternative darstellen.

SCHLUSSFOLGERUNG

Die Energiewende ist in Kombination mit der zunehmenden Abkehr von fossilen Brennstoffen alternativlos; ein Hauptanteil bei den erneuerbaren Energien wird der Sonne und dem Wind zukommen. Der Beitrag und seine Ergebnisse zeigen auf, dass Regelenergien und elektrische Speichersysteme zukünftig an Wichtigkeit gewinnen werden, um die Schwankungen des Stromnetzes auffangen zu können. Da diese beiden Lösungsansätze zurzeit allerdings noch ziemlich kostenintensiv sind, wurde eine weitere Lösung betrachtet: Power-to-Heat-Anlagen in Kombination mit Wärmespeichersystemen, die nahezu jedes Wohngebäude besitzt. Ist es also eine Option, kostengünstigere und weitverbreitete Wärmespeichersysteme zur Netzentlastung zu nutzen?

Die diskutierten Ergebnisse zeigen, dass zwei Faktoren für eine relevante Netzentlastung entscheidend sind: Die Baualtersklasse (respektive der daraus folgende Heizwärmebedarf) sowie das Speichervolumen. Nahezu ungedämmte Altbauten haben einen zu hohen Wärmebedarf, als dass sie einen wirklichen Beitrag leisten können, dementsprechend muss mindestens ein thermisch saniertes Gebäude oder ein Neubau mit gewissen thermischen Standards (mind. entsprechend 3. WSchV/1995) vorliegen. Der zweite Faktor ist das Speichervolumen, welches letztlich definiert, wie viel nutzbare

Speicherkapazität zur Verfügung steht. Schon mit einem recht kleinen Volumen von 500 l lässt sich mit den relevanten Gebäuden eine Zeitspanne von ca. 20 h bis 30 h überbrücken. Dieser Zeitraum kann mit steigendem Volumen weiter erhöht werden; eine Überdimensionierung der Speichersysteme könnte für die betrachtete Problemstellung also durchaus ein Lösungsansatz sein. Allerdings scheint es für eine momentane, möglichst reale Einordnung der Ergebnisse sinnvoller zu sein, den Ist-Zustand in Deutschland zu betrachten und dieser wurde mit den gewählten Volumen zwischen 500 l und 2000 l abgebildet. Größere Volumen in Einfamilienhäusern dürften eher selten zu finden sein, jedenfalls sind auf dem Markt kaum solche Speichervolumina für den privaten Gebrauch zu erwerben.

Der große Anteil der Heizenergie in Wohngebäuden am deutschen Gesamtenergiebedarf (ca. 18 %) zeigt deutlich auf, dass der vorgestellte Forschungsansatz zukünftig relevant sein wird. Im Jahr 2016 wurden in Deutschland ca. 30 % der Neubauten mit Wärmepumpen als Heizsystem ausgestattet, die Tendenz ist weiterhin steigend. (vgl. Statistisches Bundesamt, 2017) Damit ist die Wärmepumpe in Neubauten bereits das am zweithäufigsten genutzte Heizsystem, direkt hinter Gasheizungen. Der Anteil von Power-to-Heat-Anlagen an der gesamten Wärmeerzeugung in deutschen Wohngebäuden wird also zunehmen, da die Technologien immer effizienter werden und der Anteil an erneuerbaren Energien im Stromnetz zunimmt. Somit wird auch ein immer größerer Anteil der 18 % des Gesamtenergiebedarfs durch stromgeführte Anlagen aufgebracht werden, was das Potenzial zur Netzentlastung verdeutlicht. Auf der anderen Seite muss an dieser Stelle ebenfalls erwähnt werden, dass sich die durchgeführten Simulationen momentan auf einzelne Einfamilienhäuser beziehen. Über weitere Untersuchungen, v.a. mit Industrie- und Bürogebäuden, könnte auch die Kühlperiode im Sommer betrachtet werden und somit auch zu diesen Zeiten das Potenzial zur Netzentlastung beurteilt werden. Die innerhalb dieses Beitrages vorgestellten Ergebnisse zur Wärmeerzeugung beziehen sich lediglich auf die Heizperiode. Zusätzlich sei abschließend darauf hingewiesen, dass ein einzelnes Gebäude natürlich alleine kein allzu großes Potenzial zur Netzentlastung

aufweist, vielmehr müssen ganze Wohnblocks betrachtet und somit auch Quartierskonzepte entworfen werden. Anhand der hier dargestellten Simulationsergebnisse sollte für ein beispielhaftes Gebäude aufgezeigt werden, unter welchen Bedingungen grundsätzlich die benötigte Flexibilität zur Entlastung des Stromnetzes bereitgestellt werden kann, ohne den thermischen Komfort zu unterschreiten. Um die benötigte Kapazität erreichen zu können, die für eine signifikante Netzentlastung benötigt wird, müssen allerdings immer mehrere, bestenfalls unterschiedliche Gebäude (Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus, Nichtwohngebäude) betrachtet werden. Dementsprechend werden aufbauend auf den vorgestellten Ergebnissen weiterführende Untersuchungen angestrebt.

Letztlich zeigt der Beitrag jedoch, dass Power-to-Heat-Lösungen zwar nicht alleine in der Lage sein werden, das Problem der fluktuierenden Stromerzeugung zu beheben, sie aber durchaus einen wichtigen Beitrag dazu leisten können. Vor allem Wärmepumpen, die in Neubauten immer häufiger genutzt werden, haben in Kombination mit einem Wärmespeicher das Potenzial, temporäre Phasen mit einer großen Abweichung zwischen Erzeugung und Bedarf zu überbrücken.

LITERATURVERZEICHNIS

- Agora Energiewende: Agorameter - Aktuelle Stromdaten. Online verfügbar unter <https://www.agora-energiewende.de/de/themen/-agothem-/Produkt/produkt/76/Agorameter/>, zuletzt geprüft am 04.05.2018.
- Deutscher Wetterdienst: Climate Data Center. Online verfügbar unter <ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/>, zuletzt geprüft am 24.04.2018.
- EEG 2017 - Deutschland: Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien. Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2017.
- European Heat Pump Association (EHPA): Heat pump sales overview. Online verfügbar unter http://www.stats.ehpa.org/hp_sales/story_sales/, zuletzt geprüft am 30.04.2018.
- Harald Drück: MULTIPOINT Store-Model for TRNSYS.
- IEE Project TABULA: TABULA. Online verfügbar unter <http://episcopo.eu/index.php?id=97>, zuletzt geprüft am 24.04.18.
- S. Holst: TRNSYS-Models for Radiator Heating Systems. Bayerisches Zentrum für angewandte Energieforschung e.V.
- Statistisches Bundesamt: Baugenehmigungen / Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden (Neubau) nach Art der Beheizung und Art der verwendeten Heizenergie, Lange Reihen ab 1980 - 2016.
- TESS: TESS Component Libraries. General Descriptions.
- TRANSSOLAR: TRNSYS. Version 17. Online verfügbar unter http://trnsys.de/docs/trnsys/trnsys_uebersicht_de.htm, zuletzt geprüft am 25.04.2018.
- Trimble: SketchUp. Version 2017. Online verfügbar unter <https://www.sketchup.com/de>, zuletzt geprüft am 25.04.2018.
- Umweltbundesamt: Energieverbrauch nach Energieträgern, Sektoren und Anwendungen. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energetraegern-sektoren>, zuletzt geprüft am 24.04.18.
- Umweltbundesamt: Energieverbrauch privater Haushalte. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte>, zuletzt geprüft am 24.04.18.
- Vaillant: Datenheft Vaillant allSTOR VPS. Multifunktionspeicher allSTOR VPS /3.

DIE OPTIMIERUNG VON WÄRMEÜBERTRAGERN FÜR GEWÄSSER ZUR WÄRME- UND KÄLTEVERSORGUNG VON WASSERNAHEN BAUTEN

W. Schmidt¹, H. Stopp¹, P. Strangfeld¹ und E.Völker²

¹ Brandenburgische Technische Universität Cottbus–Senftenberg, FG Bauphysik und Gebäudetechnik

² Institut für Numerische Untersuchungen im Bauwesen

KURZFASSUNG

In Zeiten des Klimawandels gewinnen die erneuerbaren Energien zunehmend an Bedeutung. Das Wasser als eine Ressource ist zwar bekannt, wird aber noch nicht ausreichend ausgeschöpft. Gewässer und Wasserreservoirs sind künftig verstärkt als alternative Energiequelle zu nutzen. Mithilfe von Unter-Wasser-Wärmeübertragern können Gebäude, die sich am Ufer oder auf dem Wasser befinden, mit der Energie des Wassers geheizt und gekühlt werden. Hierzu sind einige Voruntersuchungen einschließlich einer Parameterstudie an einem vereinfachten Spiralwärmeübertrager mithilfe von CFD Software ANSYS FLUENT durchgeführt worden, die eine Verbesserung der Wärmeübergangsprozesse beinhalten, Abb.1.

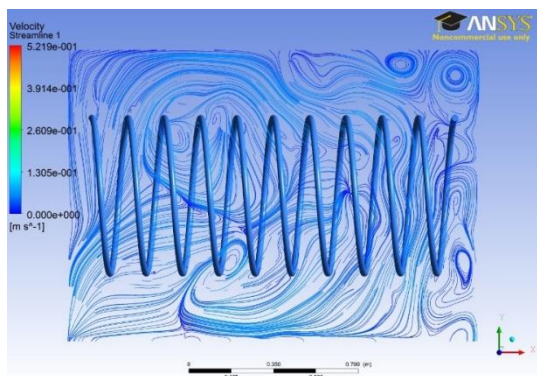


Abbildung 1: Unter-Wasser-Wärmeübertrager in Form einer Spirale und die Darstellung des umströmenden Wassers infolge freie Konvektion

ABSTRACT

In times of climate change, renewable energies are becoming more important. Although the water is known as a natural resource, but it is not exhausted so long. Water and water reservoirs will increasingly be used as an alternative energy source in the near future. underwater heat exchangers use the energy of the water for

heating and cooling in buildings which located on the water's edge or on the surface of water. For this purpose, some preliminary investigations were carried out and a parameter study on a simplified spiral heat exchanger was carried out with the help of CFD software ANSYS FLUENT, in order to improve the thermal transfer processes.

EINLEITUNG

Die Idee eines schwimmenden- oder auch eines als Unter-Wasser-Übertrager bekannten Wärmeübertragers ist zwar nicht gänzlich neu, bislang gibt es jedoch auf dem Markt kaum bekannte Ausführungsvarianten mit vertrauenswürdigen Leistungsangaben. Die vorhandenen Unter-Wasser-Wärmeübertrager sind nach den vorliegenden Erkenntnissen nicht ausreichend ausgereift. Es ist einerseits der komplexe Aufbau, der mit hohen Kosten und einer Wartung verbunden ist und andererseits die eingeschränkte Nutzbarkeit bzw. Anwendung, die den Bedarf nach neueren Ausführungsvarianten entstehen lassen. Zudem sind derzeit nicht alle Produkte serienreif und nicht frei auf dem Markt verfügbar. Die numerische Simulation des gekoppelten Wärme- und Stofftransports bedeutet in der Entwicklung effizienter Unter-Wasser-Wärmeübertrager eine erhebliche Verbesserung. Dabei wird die Umströmung der Übertragungsflächen unter verschiedenen Bedingungen untersucht und abgebildet.

KOMPAKTWÄRMEÜBERTRAGER

Eine günstig erscheinende Variante für die Wärmeübertragung aus bzw. in Gewässern sind sog. Kompaktwärmeübertrager in Verbindung mit schwimmenden Häusern. Allerdings kann eine für die Verbraucher/ Käufer in den Prospektunterlagen lediglich als *M a x i m a l* wert ausgewiesene Wärmeübertragerleistung kaum befriedigen. Rechtsseitig in der Abbildung 2 ist der Schnitt durch eine über numerische Simulation ermittelte Temperaturverteilung eines Kompaktwärmeübertragers dargestellt (Temperatur der einströmenden Sole 278,15K, Temperatur des in den Wärmeübertrager eintretenden Wassers 288,15K als konstant angesetzt).

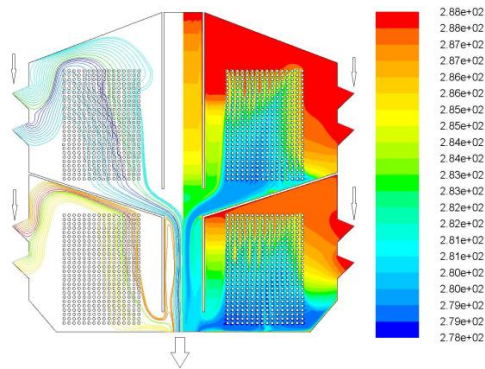


Abbildung 2: Rotationssymmetrische Temperaturverteilung (in Kelvin) und Strömungsverlauf im inneren eines Kompakt-Wärmeübertragers

PLATTENWÄRMEÜBERTRAGER

Im Zusammenhang mit Schwimmender Architektur werden Plattenwärmeübertrager interessant. Die im Wasser dauerhaft befindlichen Begrenzungsflächen der Schwimmkörper lassen sich vorteilhaft als Übertragungsfläche für die Wärmeenergie nutzen und können gleichzeitig der Freihaltung von Eisansätzen dienen. Die Abbildung 3 zeigt ein Versuchsmuster für plattenförmige Übertrager mit Deckflächen aus Beton und einer wärmedämmenden Umrandung zur Gewährleistung eindimensionaler Wärmetransportvorgänge. Die Betonwürfel dienen als Gegengewicht für die Auftriebskraft.

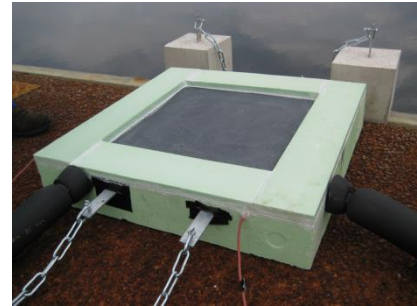


Abbildung 3: Versuchskörper eines Plattenwärmeübertragers mit Beton als Trägermaterial mit den wärmedämmtem Zu- und Ableitungen sowie Halteketten vor dem Eintauchen in das Seewasser

Die Abbildungen 4 und 5 demonstrieren Berechnungsergebnisse für eine in Beton mäanderförmig eingelegte Rohrschlange aus Kunststoffmaterial.

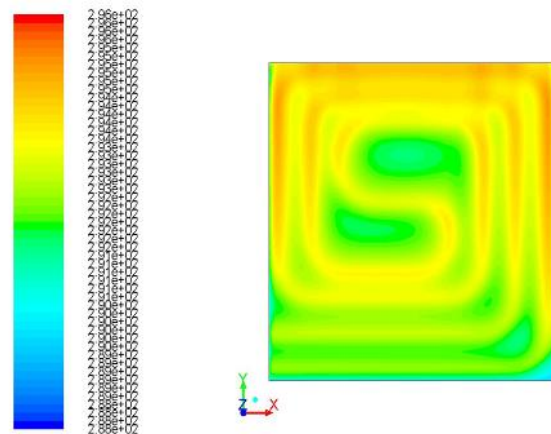


Abbildung 4: Berechnete Temperaturverteilung auf der Betonoberfläche des Plattenwärmeübertragers für eine konstante Gewässertemperatur von 15°C.

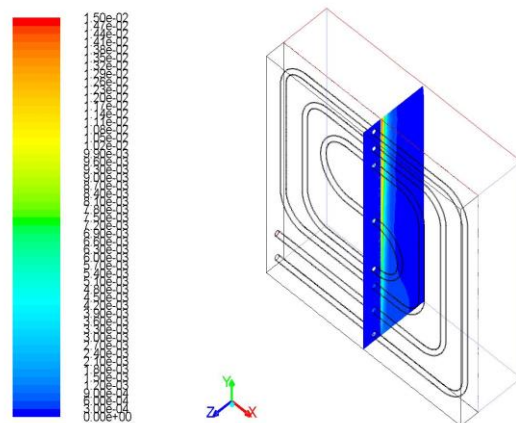


Abbildung 5: Auftriebsverhalten des an die Betonoberfläche angrenzenden Wassers (Gewässertemperatur in großer Entfernung 15°C).

SPIRALWÄRMEÜBERTRAGER

Als Ausgangsmodell für weitere Entwicklungen dient ein von der Firma Babben in Massen bei Finsterwalde/ Lausitz als Pilotprojekt hergestellter und getesteter Spiralwärmeübertrager. Er ist einem einfachen Prinzip der Wärmeübertragung nachempfunden und mit Hilfe von numerischen Simulationen sind dessen Auslegungsparameter auf ihre Effizienz untersucht worden.



Abbildung 6: Spiralwärmetübertrager zwischen den Pontonteilen eines schwimmenden Hauses

Durch gezielte Änderungen der Auslegungsparameter der Spirale sowie Optimierung der Windungsdichte kann die Leistung der Wärmeübertrager verbessert und eine optimale Leistung erreicht werden. Zu den möglichen Änderungen gehören u.a. der Durchmesser des Rohrmaterials, der Abstand zwischen den Windungen sowie die verbesserte Umströmung der Rohre. Zudem ist die Auswirkung durch das Ändern der Materialeigenschaften von Rohren, insbesondere das Erhöhen der Wärmeleitfähigkeit untersucht worden.

DISKRETISIERUNG DES RECHENGEBIETS

Um eine nichtlineare Temperaturveränderung sowohl innerhalb als auch außerhalb der wärmeübertragenden Spirale zu erhalten, muss das Rechenggebiet das umgebende Wasser miteinfassen. Dies erhöht die Anzahl der

Volumenelemente beträchtlich. Die Vernetzung in diesem Fall mit fast $1,2 \times 10^7$ Elementen stellt einen wesentlichen Optimierungsbedarf dar, obwohl bereits die weniger relevanten Strömungsbereiche nur grob vernetzt worden sind. Der Strömungsbereich innerhalb der Spirale hingegen wird mit Prismen-Schichten verfeinert, womit sich die Anzahl der Knoten und Elementen bei gleichbleibender Qualität der Ergebnisse deutlich reduzieren lässt.

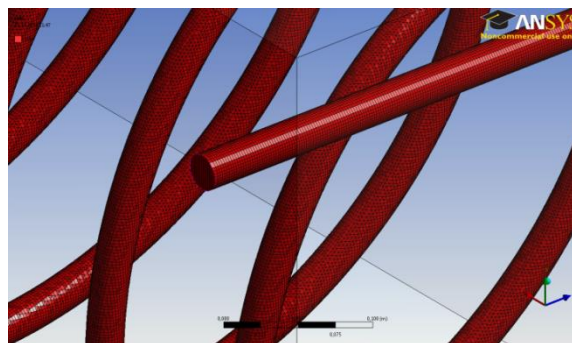


Abbildung 7: Vernetzung des Spiralkörpers mittels Prismen-Elementen

RAND- UND ANFANGSBEDINGUNGEN

Randbedingungen

Temperatur der Sole:	278,15 K
Anfangstemperatur des umgebenden Wassers:	288,15 K
Länge der Spirale:	1,5 m
Querschnitt der Spirale:	0,65 m
Rohrlänge:	22 m
Modellgrenzen (Pontonbereich) B/H/L:	1,2m/1,2m/1,8m

Die Begrenzung des Rechengebiets wird so gewählt, dass ein ausreichender Abstand zur Spirale entsteht. Damit bleibt die Strömung des die Spirale umgebenden Wassers weitgehend unbeeinflusst. Für die numerische Simulation der Strömung ist das $k-\omega$ -SST Turbulenzmodell als bestens geeignet ermittelt worden.

Die saisonalen Temperaturunterschiede der Gewässer werden gemittelt als Randbedingung für die Leistungsberechnung angesetzt. Grundlagen hierfür liefern durchgeführte Messungen an Seen in der neu entstandenen Lausitzer Seenlandschaft. Dabei wurde die

Jahresarbeitszahl (JAZ) der Sole- Wasser Wärmepumpe über mehrere Jahre untersucht.

Die Simulation der Soletemperatur des Wärmeübertragers unter der Beachtung der lokalen Strömung des umgebenden Wassers erfordert weit mehr an Rechenkapazität als die Betrachtung nicht gekoppelter Systeme und das Rechengbiet muss daher in Form von entsprechenden Randbedingungen begrenzt werden. Die Länge der Spirale von 3m erfährt aus Kapazitätsgründen bzgl. der gegebenen Rechenleistung eine Kürzung um die Hälfte der tatsächlichen Länge auf 1,5 m.

VALIDIERUNG DES RECHENMODELLS

Vor der eigentlichen Untersuchung der Fragenstellung ist eine Validierung im Sinne der Quantität der Ergebnisse durchzuführen. Damit können die Strömungsmodelle durch geeignete Konvergenzkriterien verfeinert werden. Die Validierung erfolgt in diesem Fall mit der Simulation der Außenströmung bei konstanter Temperatur der Spirale. Hierzu wird eine Vereinfachung getroffen, bei der die Temperatur der Sole konstant bleibt, was bedeutet, dass der Massenstrom unendlich groß ist. In Abhängigkeit der Konvergenzkriterien kann damit die Strömung des umgebenden Wassers begutachtet werden.

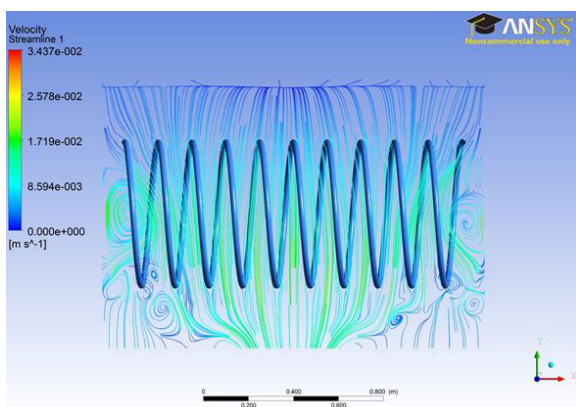


Abbildung 8: Stromlinienbild der Wasserumgebung bei konstanter Temperatur der Sole

In der Abb. 8 ist ein abfallender Kaltwasserstrom in der Mitte der Spirale abgebildet. An den Seiten sind Verwirbelungen infolge des nachströmenden Wassers zu erkennen. Der Verlauf der Strömung deutet auf plausible Annahmen von Randbedingungen hin.

REAL-TIME-SIMULATION

Bei einer realitätsnahen Simulation müssen zwei unterschiedlich starke Strömungen berücksichtigt werden. Zum einen die Strömung der Sole in der Spirale und zum anderen die Konvektionsströmung des umgebenden Wassers. Die Konvektionsströmung des Wassers wird von der Temperatur der Sole beeinflusst, die Temperatur der Sole hängt wiederum von der Umströmung der Übertragungsfläche und der Temperatur des Wassers ab (wechselseitige Beeinflussung).

Mit der Real-Time-Simulation können präzise Untersuchungen in Bezug auf die Effektivität von Wärmeübertragern an virtuellen Modellen durchgeführt werden.

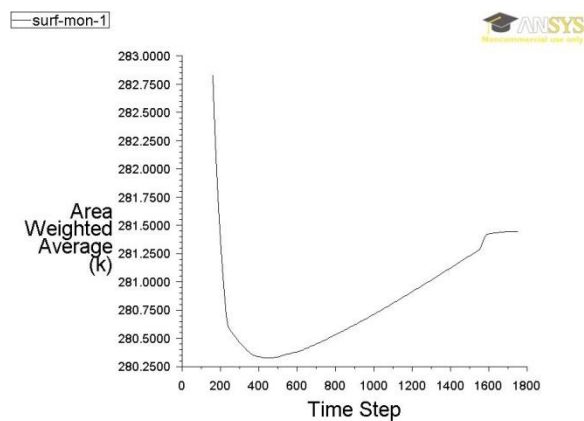


Abbildung 9: Temperaturverlauf der Sole in der Spirale

Die Anfangstemperatur im gesamten Rechengbiet beträgt zum Beginn der Rechnung 288,15 Kelvin. Dementsprechend ist die Anfangstemperatur der Sole am Anfang der Berechnung die gleiche, wie die des umgebenden Wassers. Nach dem Beginn der Simulation kühlt sich die Sole zunächst auf die eingestellte Vorlauftemperatur von 278,15 Kelvin ab und steigt durch die Erwärmung des umgebenden Wassers auf 281,5 Kelvin an.

Die Simulationszeit bei gleichbleibenden Randbedingungen bis zum Erreichen des quasi stationären Zustandes, beträgt 520 Sekunden. Die dafür benötigte Rechendauer entspricht etwa vier Wochen Echtzeit.

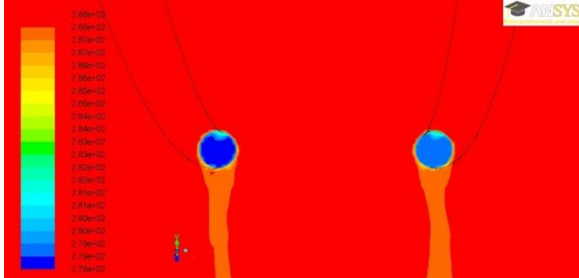


Abbildung 10: Temperaturverteilung des umgebenden Wassers und der Sole in einer Schnittdarstellung von zwei Windungen der Spirale

Die Abbildung 10 lässt absinkende Wasserschleier infolge Dichteänderung durch Abkühlung erkennen. Die Temperatur der Sole ändert sich über die Länge der Spirale. In der Abbildung ist auch die Temperaturgrenzschicht an der Rohrwandung erkennbar. Dies deutet auf eine ausreichend gute Vernetzung in der Wandnähe hin.

Die Untersuchung mit nichtlinearer Temperaturänderung ergibt unter den angegebenen Randbedingungen eine Leistung des Unter-Wasser-Wärmeübertragers von 1227,2 Watt und eine Wärmestromdichte von $715,6 \text{ W/m}^2$.

PARAMETERSTUDIE BEI KONSTANTER UMGEBUNGSTEMPERATUR

Für die Parameterstudie ist der Aufwand einer realitätsnahen Simulation mit nichtlinearen Temperaturänderung zu zeitintensiv und unverhältnismäßig hoch. Daher werden die Außenrandbedingungen als konstant angenommen. Das heißt, dass die Außentemperatur von 288,15 Kelvin als Randbedingung der ersten Art festgelegt ist und sich während des Aufheizens der Spirale nicht ändert. Auch die Vorlauftemperatur von 278,15 Kelvin am Eintritt der Spirale bleibt bei allen Varianten gleich. Der instationäre Vorgang lässt erkennen, wie schnell der Wärmeübertrager reagiert und nach wieviel Iterationen sich der stationäre Zustand, Abb. 11 Rücklauftemperatur, Leistungsverlauf einstellt.

Für die Auswertung werden die Rücklauftemperatur sowie die Wärmestromdichte an der Außenfläche des Rohrs genutzt. Die Angaben zum Leistungsverlauf resultieren aus der Wärmestromdichte und der äußeren Übertragungsfläche.

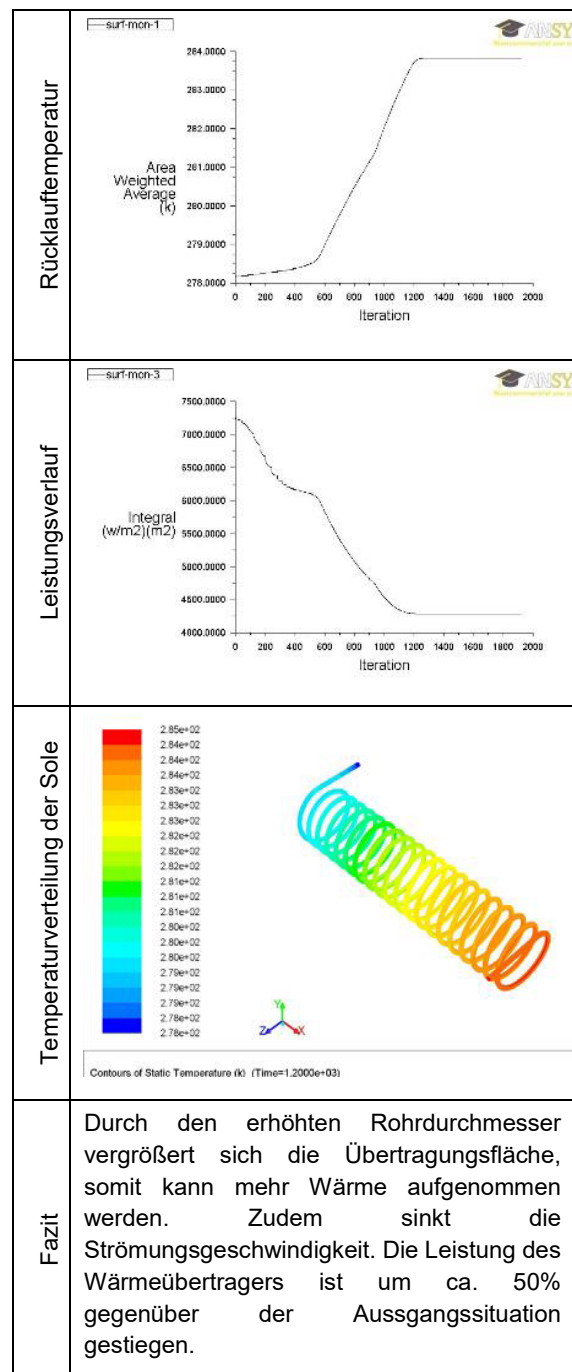


Abbildung 11: Beispiel einer Optimierungsvariante für einen Spiralwärmeübertrager

MESSERGEBNISSE

Neben den Untersuchungen mittels numerischer Simulation sind Messungen für Leistungsbestimmung mit sogenannten Thermal-Response- Tests durchgeführt worden. Dieser Test eignet sich zur Bestimmung von thermodynamischen Parametern nach dem Durchflussprinzip. Die Brandenburgische Technische Universität besitzt ein entwickeltes, mobiles Prüfgerät zum Thermal-Response Test aus dem Bestand der ehemaligen Hochschule Lausitz, Abb. 12. Das Gerät verfügt über mehrere Heizleistungen für 3 kW; 5 kW; 8 kW; 10 kW und 13kW. Bei Bedarf kann nach Umbau der Heizregister die Heizleistung stufenlos von 0 bis 3 kW geregelt werden.



Abbildung 12: Eigenentwicklung eines fahrbaren Prüfgerätes für Thermal-Response-Tests vor Ort

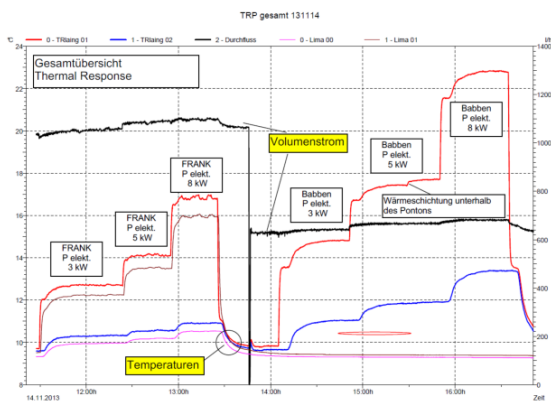


Abbildung 13: Vergleich der gemessenen Größen zwischen Spiral- und Kompaktwärmeübertrager zur Leistungsbestimmung der Wärmeübertrager mittels Thermal-Response-Test

AUSBLICK

Sowohl in Deutschland als auch weltweit entstehen zahlreiche Gebäude in unmittelbarer Nähe zum Wasser und direkt auf dem Wasser. Unter der Beachtung von Mindestanforderungen an die Funktionalität sowie Einbeziehung umweltpolitischer Vorgaben besteht ein hohes Potenzial für die Anwendung solcher Unterwasser-Wärmeübertrager in der Nähe von Oberflächengewässern und für schwimmende Bauten. Ein derzeit beschleunigt stattfindender Klimawandel einhergehend mit der Planung schwimmender Siedlungen wird diese Entwicklung weiter vorantreiben [4].

LITERATUR

- [1] Stopp, H.; Strangfeld, P.: Schwimmende Wohnbauten. Beuth Verlag GmbH, Berlin-Wien-Zürich, 2012
- [2] Claus-Dieter Munz, Thomas Westermann: Numerische Behandlung gewöhnlicher und partieller Differentialgleichungen, 3. Auflage 2012, Springer-Verlag, Wiesbaden 2009
- [3] Strangfeld, P.; Stopp, H.: Schwimmende Häuser für die entstehende Lausitzer Seenkette – ein Produkt der Lausitz?, Cottbus 30 August 2010.
- [4] Stopp.H.; Strangfeld, P.: Floating architecture and structures – an answer to the global changes. CORP 2016, June, 2016 Hamburg, Germany.

SIMULATIONSGESTÜTZTE ANALYSEN ZUR STROMNETZDIENLICHEN TEMPERIERUNG VON GEBÄUDEN

F. Sick¹ und S. Krutzsch¹

¹Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Berlin, Germany
Wilhelminenhofstr. 75A, 12459 Berlin
E-Mail: friedrich.sick@htw-berlin.de, sabine.krutzsch@htw-berlin.de

KURZFASSUNG

Durch die gezielte Ausnutzung der thermischen Speicherkapazität von Gebäuden können stromnetzgekoppelte Wärme- und Kälteerzeuger von der üblichen Betriebsweise abweichend gesteuert werden und auf schwankende Kriterien des elektrischen Netzes reagieren.

Mit Hilfe von Simulationen lassen sich die ausnutzbare Speicherkapazität sowie das energetische Lastverschiebepotential in Abhängigkeit vom Wärmeübergabesystem ermitteln. Die Untersuchungen zum dynamischen Zusammenspiel von Zu- und Abschaltprozessen der Heizung und Kühlung werden anhand eines realen Bürogebäudes mit der Software IDA ICE durchgeführt.

Die Simulationen zeigen, dass mit der Kombination aus Heizkörpern und Betonkerntemperierung über 30 % des Jahresheizwärmebedarfs in der Gebäudestruktur zwischengespeichert werden kann. Pro Speichervorgang werden dabei bis zu 230 Wh/m² Wärme in die Struktur aufgenommen.

ABSTRACT

The utilization of the thermal storage capacity of buildings can support an electricity-driven operation of the heating and cooling systems if those systems are connected to the electrical grid. Thus, they can react on fluctuating criteria of the electrical grid.

Using simulations, the exploitable storage capacity as well as the load shifting potential can be determined depending on the heat transfer system.

The study of the dynamic interaction of the heating and cooling charging and discharging processes are carried out on the basis of a real office building, using the IDA ICE software.

With the combination of radiators and concrete core activation more than 30% of the annual heating demand can be temporarily stored in the building structure. During one charging process up to 230 Wh/m² of heat can be absorbed by the structure.

EINLEITUNG

Vor dem Hintergrund des wachsenden Anteils fluktuierender Energiequellen im Versorgungssystem liegt eine besondere Herausforderung in der Harmonisierung von Energieerzeugung und -verbrauch. Lastmanagement und Speichertechnologien werden vielfach diskutiert. Gebäude können hierzu einen wesentlichen Beitrag leisten, indem ihr inhärentes thermisches Speicherpotential genutzt wird. Der Vorteil gegenüber konventionellen Speichern besteht in dem geringen Investitionsaufwand, da keine zusätzlichen Anlagen installiert werden müssen. Gebäude können damit andere Speichertechnologien und das Stromnetz entlasten. Dies wird im Rahmen des Projektes Forschungscampus Mobility2Grid von der HTW Berlin analysiert.

KERNGEDANKE

In Abhängigkeit ökonomischer respektive technischer Anforderungen des elektrischen Netzes soll eine von der üblichen Betriebsweise abweichende Steuerung der Wärme- und Kälteerzeuger mittels gezielter Ausnutzung der Speicherkapazität der Gebäudestrukturen erfolgen.

So kann beispielsweise ein Blockheizkraftwerk (BHKW) stromorientiert betrieben werden und zu Zeiten eines geringen Stromangebots im Netz bzw. bei hohem Strombedarf oder hohem Strompreis auch dann elektrische Energie bereitstellen, wenn der eigentliche Wärmebedarf bereits gedeckt ist. Die zusätzlich produzierte Wärme wird in der Gebäudestruktur gespeichert. Umgesetzt werden kann dies, wenn in diesen Zeiten der Sollwert der Raumtemperatur bis zu einem definierten Grenzwert angehoben wird. In Zeiträumen mit geringem Strombedarf oder hohem Anteil erneuerbarer Energien im Netz kann dagegen mit einer Sollwertabsenkung der Gebäudespeicher tiefer entladen und das BHKW in dieser Zeit heruntergefahren werden. Analog ist zu Zeiten des Stromüberschusses der Einsatz elektrischer Wärme- und Kälteerzeuger (wie z. B. Kompressionswärmepumpe/-kältemaschine) möglich. Die Be- und Entladung des Gebäudespeichers im Heizfall erfolgt dann genau entgegengesetzt zur Fahrweise eines BHKW. Schließlich lassen sich diese Technologien auch miteinander kombinieren.

FORSCHUNGSSTAND

Hausladen et al. (2014) zeigen, dass mit einem zulässigen Raumtemperaturband von ± 2 K bis zu 500 Wh/m^2 Heizwärme in Wohngebäuden sowie in vergleichbarer Größenordnung Wärme bzw. Kälte für mit Betonkerntemperierung ausgestattete Bürogebäude gespeichert werden können. Untersuchungen anhand konkreter Gebäude und Quartiere ergeben jährliche Lastverschiebepotentiale von etwa 10 % bzw. 16 % des Gesamtwärmebedarfs unter Ausnutzung einer Raumtemperaturschwankung von ± 1 K (Sick et al. 2017, Reinwald et al. 2016).

Für die Bewertung der Netzdienlichkeit von Gebäuden und Quartieren kann der am Fraunhofer ISE entwickelte Grid Support Coefficient (GSC) herangezogen werden (Kalz et al. 2018). Als stromnetzseitige Referenzgröße für die Bewertung dienen beispielsweise EEX-Preis oder Residuallast. Dieser Ansatz wird durch den aktuellen Diskussionsvorschlag des DGNB zu einem Gebäude-Emissions-Gesetz 2050 (GEG 2050) untermauert (Oehler 2018).

METHODIK

Gebäudemodell und Randbedingungen

Die Untersuchungen zur stromnetzdienlichen Beheizung und Kühlung von Gebäuden erfolgen beispielhaft anhand eines Ausschnitts eines modernen Bürogebäudes auf dem EUREF-Campus in Berlin mit Hilfe der Simulationssoftware IDA ICE (EQUA 2018). Es werden zwei typische Zonen betrachtet. Die Standardzone verfügt über eine Fassadenseite, während die Eckzone zwei Fassadenorientierungen und damit auch einen höheren Fassadenanteil aufweist (siehe Abbildung 1).

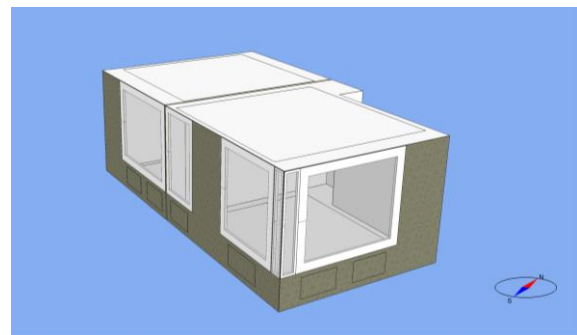


Abbildung 1: Zwei-Zonen-Modell

Es handelt sich hierbei um Gruppenbüroräume mit einer Fläche von jeweils etwa 20 m^2 . Als Neubau weist das Gebäude einen hohen Dämmstandard auf. Der Aufbau der im Modell verwendeten Außenwände ist in der Tabelle 1 dargestellt.

Die Fassadenfläche der Standardzone beträgt 12 m^2 , die der Eckzone 15 m^2 für dieselbe Orientierung wie bei der Standardzone und 13 m^2 für die andere Ausrichtung. Der Fensterflächenanteil liegt bei 52 % bis 55 %. Der U-Wert der Fenster beträgt $1,23 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, der g-Wert der Verglasung 0,54. Der außenliegende Sonnenschutz wird automatisch in Abhängigkeit von der solaren Einstrahlung gesteuert. Die Eckfenster weisen U-Werte von $1,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ und $1,47 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ auf und verfügen nicht über einen Sonnenschutz. Für Hochrechnungen auf das Gesamtgebäude werden die Zonen in ihrer Anzahl und Orientierung verändert und flächengewichtete Durchschnittswerte gebildet.

Tabelle 1: Aufbau Außenwände

Bauteil	Aufbau	Dicke	Wärmeleitfähigkeit	spez. Wärmekapazität	Dichte	U-Wert
		m	W/(m K)	J/(kg K)	kg/m ³	W/(m ² K)
Außenwand	Stahlbeton	0,2	2,1	1000	2400	0,195
	Steinwolle	0,17	0,035	1030	50	
	Putz	0,015	0,87	1000	1800	

Die Büroräume werden durch eine in einer 28 cm dicken Stahlbetondecke integrierte Betonkerntemperierung (BKT) beheizt und gekühlt. Diese nimmt ca. 75 % der Deckenfläche ein. Die Auslegungsleistung der BKT beträgt 34 W/m² im Kühlfall und 25 W/m² Heizfall. Beide Zonen werden über einen gemeinsamen Heiz- und Kühlkreis versorgt. Zusätzlich sind Heizkörper installiert, welche über den Raumtemperaturregler angesteuert werden. Die maschinelle Lüftung stellt den Mindestaußenluftvolumenstrom in der Zone sicher.

Die Nutzungsrandbedingungen orientieren sich zunächst überwiegend an der DIN V 18599-10 (DIN V 18599-10:2016-10). Für die Nutzungsprofile wird die SIA 2024 (SIA 2024, 2006) herangezogen. Darüber hinaus bekannte Informationen zum Betrieb der Anlagen fließen in das Modell ein. In weiteren Untersuchungen werden die Randbedingungen anhand von realen Messdaten validiert.

Steuerung

Das zulässige Raumtemperaturband definiert die theoretisch nutzbare Speicherkapazität. Für die Steuerung der Wärme- und Kälteerzeuger wird in den ersten Analysen von einer zulässigen Abweichung vom Sollwert von ± 1 K ausgegangen. Vergleichbare Untersuchungen setzen eine ähnliche Bandbreite an (Sick et al. 2017, Reinwald et al. 2016).

Die bisherigen Analysen stützen sich auf den Ansatz, die Anlagen auf Basis von Standardlastprofilen (SLP), welche vom Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW, ehemals VDEW) als repräsentative Profile des prognostizierten Strombedarfs in Abhängigkeit von Jahreszeit und Wochentag für verschiedene Nutzungsgruppen zur Verfügung gestellt und häufig von den Energieversorgern zur Planung

und Abwicklung der Stromlieferungen herangezogen werden (siehe z. B. Vereinigte Stadtwerke 2018). Für die Untersuchungen wird das Standardlastprofil für Gewerbe G1 (siehe Abbildung 2) verwendet. Es wird vereinfachend unterstellt, dass zu Spitzenlastzeiten (über 250 W) Strommangel im Netz herrscht und dass geringe Lasten (unter 100 W) zu einem Überangebot an Strom führen. Die Grenzen sind dabei willkürlich gesetzt. Zukünftig soll ein geeignetes stromnetzseitiges Signal zur Steuerung verwendet werden, z. B. variabler Strompreis oder Residuallast.

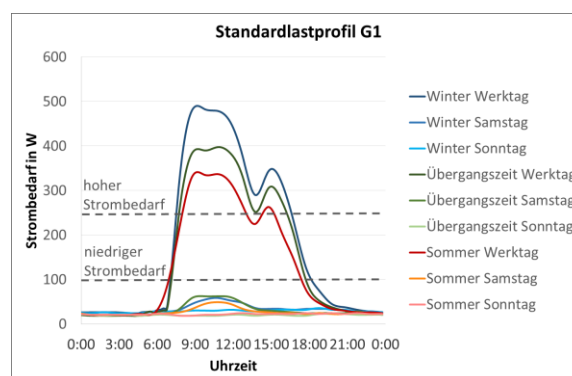


Abbildung 2: Standardlastprofil G1, normiert auf 1000 kWh/a

Somit würde ein BHKW in diesem Beispiel tagsüber über den Bedarf hinaus Wärme (im Sommer auch Kälte in Kombination mit einer Absorptionskältemaschine) produzieren und nachts im reduzierten Modus arbeiten. Eine elektrisch betriebene Wärmepumpe (WP) oder Kältemaschine (KM) würde dagegen hauptsächlich in der Nacht betrieben werden. Die Wärme- und Kälteerzeuger werden in dem Modell vereinfachend als Standardkomponenten abgebildet.

Das Wärmeübergabesystem beeinflusst die Aufnahme der thermischen Energie in die Bauteile. Schnell reagierende Systeme wie Heizkörper erwärmen die Raumluft in verhältnismäßig kurzer Zeit, was zu einem raschen Erreichen

des Solltemperaturgrenzwertes führt. Die abgegebene Wärme wird erst sekundär von der Baustruktur aufgenommen. Dagegen werden bei der Betonkerntemperierung zunächst direkt das Bauteil und erst zeitversetzt die Raumluft sowie weitere den Raum umfassende Bauteile erwärmt.

Während über Heizkörperthermostate direkt die Raumlufttemperatur geregelt wird, ist dieses Prinzip für die BKT aufgrund der Trägheit eher ungeeignet. In der Fachwelt werden deshalb vielfach vorausschauende Regelstrategien diskutiert. Die Bandbreite reicht von der Einbindung von Wetterprognosen über Regressionsmodelle hin zu modellprädiktiver Regelung (Kalz et al. 2016).

In dieser Untersuchung wird zunächst das Unknown-But-Bounded-Verfahren (UBB-Verfahren) herangezogen (Tödtli et al. 2009). Hierbei wird das thermische Verhalten des Raumes dynamisch mit einem thermischen Widerstands- und Kapazitätenetzwerk unter Berücksichtigung von minimalen und maximalen internen und solaren Lasten abgebildet, ohne dass die tatsächlichen Wärmegegewinne im Zeitverlauf bekannt sein müssen. Mit Hilfe so genannter äquivalenter Wärmegegewinnschranken werden die Heiz- und Kühlkurven auf Grundlage einer Basisregelstrategie, im vorliegenden Fall einer Vorlauftemperatursteuerung anhand des geleitenden 24-Stunden-Mittelwerts der Außentemperatur, berechnet. Die so ermittelten Heiz- und Kühlkurven gelten für den Basisfall, in dem die Betonkerntemperierung durchgängig betrieben wird.

Eine vom Basisfall abweichende Steuerung der BKT kann durch die Anpassung der Heiz- und Kühlkurven realisiert werden. In Abhängigkeit von Einschaltzeit und Periodendauer werden die Vorlauftemperaturen so verändert, dass annähernd die gleiche Energie in kürzerer Zeit in die Betondecke hineingebracht wird, welche im Dauerbetrieb für die angegebene Periodenlänge notwendig wäre. Das UBB-Verfahren wird um einen Taktbetrieb erweitert (Tödtli et al. 2009).

Die Heizkörper werden über den Raumtemperatursollwert geregelt. Dieser variiert für die stromorientierte Betriebsweise im Winter tagsüber zwischen 21 °C und 23 °C sowie zwischen 19 °C und 21 °C in der Nacht.

Die bisherigen Analysen konzentrieren sich auf die Abhängigkeit des Speicherverhaltens vom Wärmeübergabesystem (BKT bzw. Heizkörper), den Nutzungsgrad des thermischen Speichers und die durch den veränderten Betrieb erzielten verschiebbaren Wärmemengen.

Für die stromorientierte Steuerung nach SLP werden folgende Varianten untersucht:

- BHKW-Betriebsweise:
 - mit Heizkörpern und BKT als kombiniertes System
 - mit BKT
 - mit Heizkörper
- WP-/KM-Betriebsweise für das System BKT

ERGEBNISSE

Bei einem Sprung der Sollraumtemperatur um 1 K zeigt sich das unterschiedliche Verhalten der Wärmeübergabesysteme. Schnell reagierende Heizsysteme erwärmen den Raum in sehr kurzer Zeit. Die Zeitkonstante, um den Speicher (Gebäude) zu 63,2 % zu laden, beträgt etwa 30 Stunden (Abbildung 3).

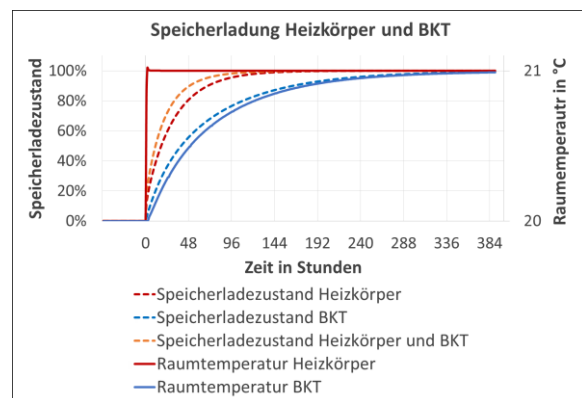


Abbildung 3: Speicherladung und Raumtemperaturverlauf für BKT und Heizkörper

Die BKT benötigt bei einem entsprechenden Sprung der Vorlauftemperatur etwa doppelt so lang, um denselben Speicherstatus zu erreichen. Werden beide Systeme miteinander kombiniert, beträgt die Zeitkonstante nur noch 2/3 der Zeitkonstanten der Heizkörpervariante. Die BKT bietet aber auch die Möglichkeit, in kürzerer Zeit höhere Heizleistungen aufzunehmen, was zu niedrigeren Zeitkonstanten führt und eine dynamischere Regelung ermöglicht. Beispielhaft ist in den Abbildungen 4 und 5 eine Erhöhung der Vorlauftemperatur um etwa 4 K über 15

Stunden dargestellt (hier als diskontinuierlicher Betrieb bezeichnet). Werden zusätzlich Heizkörper eingesetzt, kann der Speicher in noch kürzerer Zeit geladen werden (Abbildung 5).

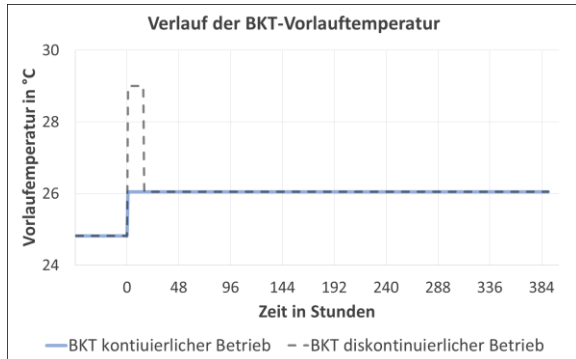


Abbildung 4: Vorlauftemperaturverlauf für den kontinuierlichen und diskontinuierlichen BKT-Betrieb

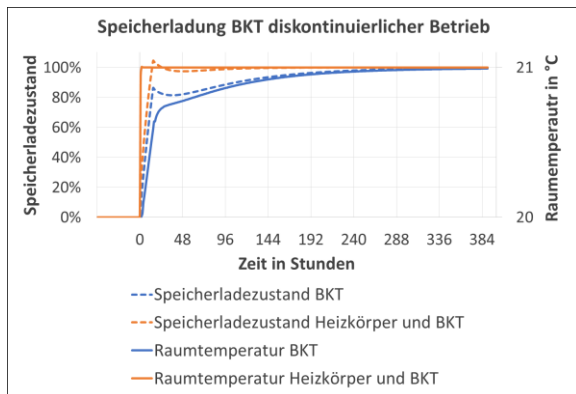


Abbildung 5: Speicherladung und Raumtemperaturverlauf für den diskontinuierlichen BKT-Betrieb

Mit einer stromorientierten Betriebsführung nach Standardlastprofil wird der Gebäudespeicher nicht vollständig geladen, da die dynamischen Be- und Entladevorgänge in der Regel auf wenige Stunden begrenzt sind.

Die Simulationen zeigen, dass der Gebäudespeicher am besten ausgenutzt wird, wenn die Systeme Heizkörper und BKT kombiniert eingesetzt werden. Das durchschnittliche Verschiebepotential beträgt in der BHKW-Betriebsweise über 30 % des Jahresheizwärmebedarfs bzw. etwa 11 kWh/m² sowie mehr als 40 % des jährlichen Kühlenergiebedarfs (ca. 14 kWh/m²). Es werden pro Speichervorgang maximal 230 Wh/m² Wärme in die Struktur aufgenommen. Das theoretische Speicherpotential des Gebäudes beträgt durchschnittlich etwa 270 Wh/(m²K). In Abbildung 6 sind die Speicherlade- und -entladevorgänge beispielhaft für den

kombinierten BKT-Heizkörper-Betrieb für eine Winterwoche dargestellt.

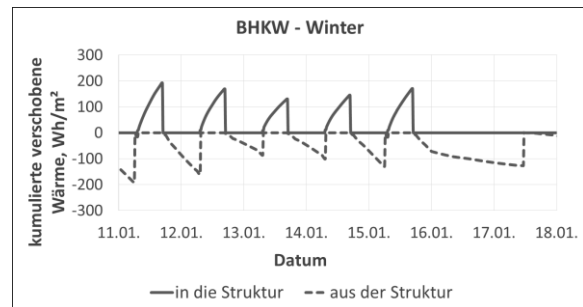


Abbildung 6: Speicherladung und -entladung für die kombinierten Systeme BKT und Heizkörper in einer Winterwoche, BHKW-Betrieb

Die Raumtemperaturen weichen bei der stromorientierten Betriebsweise vor allem im Eckbüro vom Basisbetrieb ab (Abbildung 7). Hier zeigt sich der stärkere Einfluss der Heizkörper.

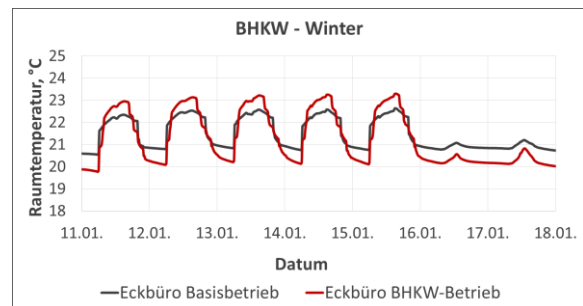


Abbildung 7: Raumtemperaturverlauf für die kombinierten Systeme BKT und Heizkörper in einer Winterwoche, Eckbüro NO/NW-Orientierung, BHKW-Betrieb

In den Standardbüros liegen die Temperaturen dagegen enger beieinander, da die BKT den größten Anteil der Raumheizung übernimmt (Abbildung 8). Aufgrund der hohen inneren Lasten tagsüber steigen die Raumtemperaturen in der Standardzone im Winter auch im Basisbetrieb auf etwa 24 °C an.

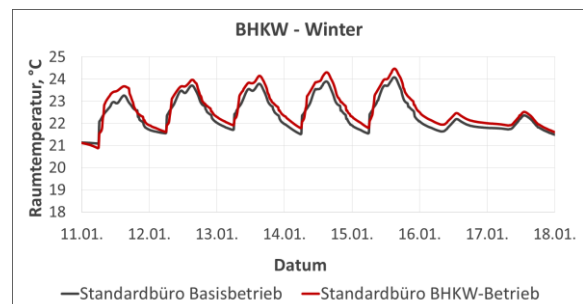


Abbildung 8: Raumtemperaturverlauf für die kombinierten Systeme BKT und Heizkörper in einer Winterwoche, Standardbüro NO-Orientierung, BHKW-Betrieb

Wird das Gebäude ausschließlich über die BKT temperiert, ist der prozentuale Anteil der gespeicherten und wieder genutzten Wärme ähnlich dem kombinierten BKT-Heizkörper-Betrieb. Absolut wird mit $8,5 \text{ kWh/m}^2$ jährlich weniger Wärme gespeichert als im kombinierten Betrieb, was unter anderem daran liegt, dass auch der Gesamtjahreswärmeverbrauch bei der ausschließlichen BKT-Versorgung um etwa 15 % geringer ausfällt. In diesem Fall werden die Eckzonen nicht mehr ausreichend beheizt und der Komfort kann nicht immer eingehalten werden. Die Raumtemperaturen sinken tagsüber während der Bürozeiten teilweise auf unter 20 °C (Abbildung 9).

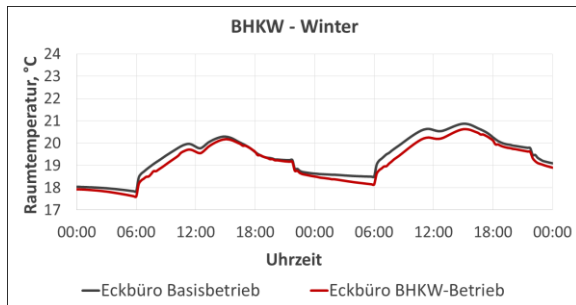


Abbildung 9: Raumtemperaturverlauf für das System BKT an zwei Wochentagen im Winter, Eckbüro NO/NW-Orientierung, BHKW-Betrieb

Im Wärmepumpen-Modus ist das genutzte Speicherpotential insgesamt geringer. Wird als Heizsystem die BKT allein oder kombiniert mit Heizkörpern eingesetzt, beträgt das Lastverschiebepotential etwa 20 % des jährlichen Heizwärmeverbrauchs bzw. rund 6 kWh/m^2 . Es werden pro Speichervorgang maximal 150 Wh/m^2 Wärme in die Struktur aufgenommen. Bei ausschließlichem Heizkörperbetrieb können noch etwa 4 kWh/m^2 jährlich in die Struktur verschoben und wieder genutzt werden.

Abbildung 10 zeigt für den stromorientierten WP-Betrieb den Speicherzustandsverlauf in einer Winterwoche für den kombinierten Einsatz von BKT und Heizkörpern.

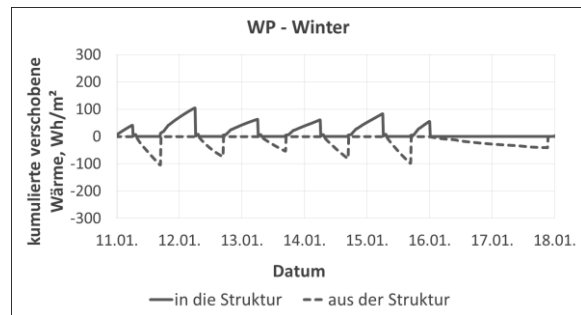


Abbildung 10: Speicherladung und -entladung für die kombinierten Systeme BKT und Heizkörper in einer Winterwoche, WP-Betrieb

Am Raumtemperaturverlauf ist zu erkennen, dass das Temperaturniveau bei der Steuerung nach SLP in der Regel höher ist als im Basisbetrieb (Abbildungen 11 und 12). Das Raumtemperaturband wird nicht so gut ausgenutzt wie in der BHKW-Betriebsweise.

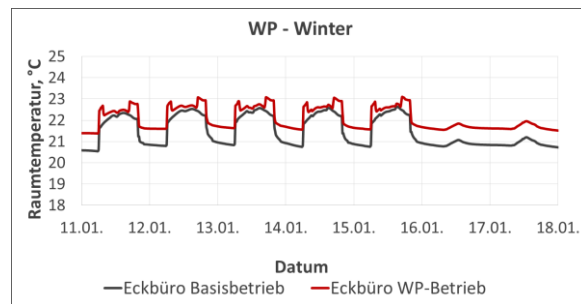


Abbildung 11: Raumtemperaturverlauf für die kombinierten Systeme BKT und Heizkörper in einer Winterwoche, Eckbüro NO/NW-Orientierung, WP-Betrieb

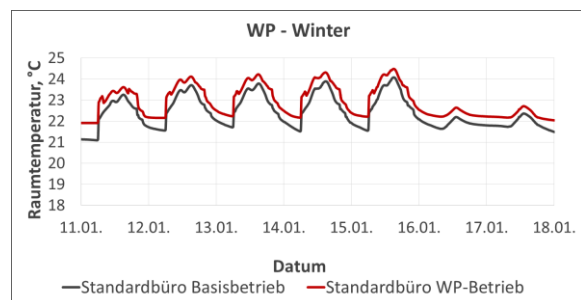


Abbildung 12: Raumtemperaturverlauf für die kombinierten Systeme BKT und Heizkörper in einer Winterwoche, Standardbüro NO-Orientierung, WP-Betrieb

Im Kühlfall (KM-Betrieb) beträgt das Verschiebepotential ebenfalls ca. 20 % des Jahreskühlenergieverbrauchs. Der Raumtemperaturverlauf ist in der Basisvariante und der Variante mit SLP-Steuerung nahezu gleich (Abbildung 13). Dies gilt auch für die BHKW-Betriebsweise. Eine auf wenige Stunden begrenzte Lastverschiebung wirkt sich kaum auf den Komfort aus.

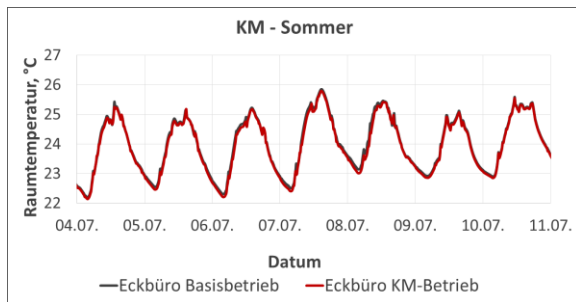


Abbildung 13: Raumtemperaturverlauf für das System BKT in einer Sommerwoche, Eckbüro SO/SW-Orientierung, KM-Betrieb

Die Abbildungen 14 und 15 geben einen zusammenfassenden Überblick über die ermittelten verschiebbaren Wärmemengen.

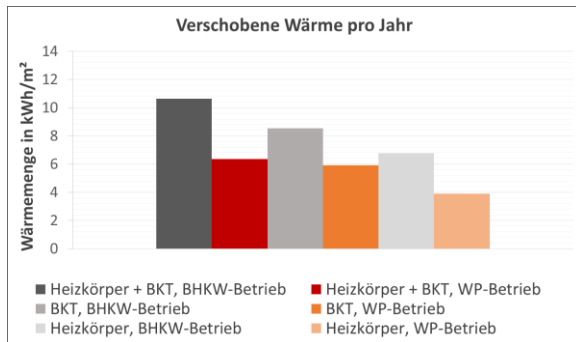


Abbildung 14: Jährlich verschobene Wärmemengen der stromorientierten Betriebsweisen BHKW und WP für unterschiedliche Wärmeübergabesysteme

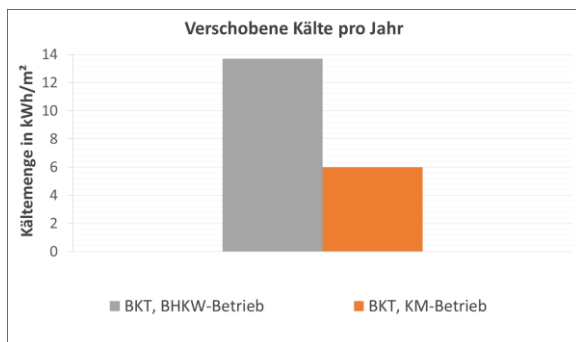


Abbildung 15: Jährlich verschobene Kältemengen der stromorientierten Betriebsweisen BHKW und KM

ZUSAMMENFASSUNG

Die Analysen machen deutlich, dass durch die gezielte Ausnutzung der thermischen Speicherefähigkeit von Gebäuden stromnetzgekoppelte Wärme- und Kälteerzeuger von der üblichen Betriebsweise abweichend gesteuert werden und so zur Lastverschiebung beitragen können. Das nutzbare Potential ist unter anderem abhängig vom Wärmeübergabesystem im Gebäu-

de. Mit dem kombinierten Betrieb von Heizkörpern und Betonkerntemperierung lassen sich die größten Wärmemengen verschieben. Dabei spielt auch eine Rolle, zu welcher Tageszeit die Lastverschiebung stattfindet. Für das untersuchte Bürogebäude wurden für die stromorientierte Fahrweise eines BHKW die besten Ergebnisse erzielt. So können etwa 11 kWh/m² Wärme und 14 kWh/m² Kälte im Jahr in der Gebäudestruktur zwischengespeichert und wieder genutzt werden. Bei ausschließlicher Beheizung mit Heizkörpern kann im BHKW-Betrieb immer noch eine Wärmemenge von etwa 7 kWh/m² jährlich verschoben werden. Wird dagegen nachts zusätzlich Wärme und Kälte erzeugt (WP-/KM-Betrieb), ist das Speicherpotential geringer als im BHKW-Betrieb.

AUSBLICK

Der Fokus der vorliegenden Untersuchungen liegt auf dem thermischen Speicherverhalten des Gebäudes in Abhängigkeit des Wärmeübergabesystems und die durch die Steuerung nach Standardlastprofil erzielbaren verschiebbaren Wärmemengen, wenn Raumtemperaturabweichungen von ± 1 K vom Sollwert zugelassen werden.

Da es sich bei dem untersuchten Gebäude um ein real existierendes modernes Bürogebäude handelt, welches zum Teil umfassend mit Messtechnik ausgestattet ist, ist zukünftig eine Validierung des Simulationsmodells anhand von Messdaten geplant. Die Speicherkapazität der Gebäude wird durch das ausnutzbare Raumtemperaturband quantifiziert. Weitere Analysen werden sich daher unter anderem auf den Einfluss der Temperaturbandbreite auf das Lastverschiebepotential konzentrieren. In diesem Zusammenhang wird auch eine Studie zur Ermittlung der tolerierbaren Schwankungsbreite durchgeführt. Geplant ist außerdem die Identifikation von im realen Betrieb messbaren Parametern (z. B. Temperaturen), welche Rückschlüsse auf den Speicherladezustand erlauben und somit für eine netzdienliche Anlagensteuerung in der Praxis herangezogen werden können. Darüber hinaus sollen alternative Strategien für eine vom Basisbetrieb abweichende Steuerung der Betonkerntemperierung analysiert werden, um die Nutzung des Gebäudespeichers zu optimieren. Letztlich wird es möglich sein, positi-

ve und negative Regelleistung über den veränderten BHKW-Betrieb zur Verfügung zu stellen.

LITERATUR

- DIN V 18599-10:2016-10. Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten.
- EQUA Simulation AB 2018. IDA Indoor Climate and Energy, Version 4.8., Stockholm, Sweden.
- Forschungscampus Mobility2Grid, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung. Weitere Informationen: www.mobility2grid.de.
- Hausladen, G., Auer, T., Schneegans, J., Klimke, K., Riemer, H., Trojer, B., Qian, L., de Borja Torrejon, M. 2014. Lastverhalten von Gebäuden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bauweisen und technischer Systeme. Speicher- und Lastmanagementpotenziale in Gebäuden. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Kalz, D., Koenigsdorff, R. 2016. Nichtwohngebäude effizient heizen + kühlen. Erfahrungen mit thermoaktiven Bauteilsystemen und Wärmepumpen. In: FIZ Karlsruhe, Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur GmbH (Hrsg.), BINE-Themeninfo, Nr. II/2016.
- Kalz, D., Klein, K., Palzer, A., Schlösser, T., Schumacher P., Sterchele, P., Stinner, S., Yu, Y. J., Kallert, A. M. 2018. Netzdienliche Gebäude und Quartiere. Gebäude entlasten Stromnetze. In: FZI Karlsruhe, Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur GmbH (Hrsg.), BINE-Themeninfo, Nr. I/2018.
- Oehler, S. 2018. Diskussionsvorschlag: Gebäude-Emissions-Gesetz, gültig bis 2050 (GEG 2050). DGNB Statement. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. Stuttgart. https://static.dgnb.de/fileadmin/de/dgnb_ev/Aktuell/stellungnahme/DGNB_Diskussionsvorschlag_GEG2050.pdf (26.07.2018)
- Reinwald, M., Leitschuh, S., Hochhuber, J. 2016. Energieinfrastruktur der Zukunft: Energiespeicherung und Stromnetzregelung mit hocheffizienten Gebäuden – Projekt Windheizung 2.0. In: Wenzl, H., Kaiser, F. (Hrsg.). Sektorenkopplung der Energiesysteme durch Power to Heat: Dialogplattform des EFZN, Goslar, 14. und 15. Juni 2016, Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen (EFZN). Göttingen.
- SIA 2024, 2006. Standardisierte Nutzungsbedingungen für die Energie- und Gebäudetechnik. SIA, Swiss Association of Engineers and Architects, Zürich Switzerland.
- Sick, F., Füger, R. 2017. Netzdienlichkeit von Gebäuden durch Anlagensteuerung in einem Nahwärmenetz. In: 27. Symposium Thermische Solarenergie. Regensburg: OTTI, S. 1–14.
- Tödtli, J., Gwerder, M., Lehmann, B., Renggli, F., Dorer, V. 2009. TABS Control – Steuerung und Regelung von thermoaktiven Bauteilsystemen. Handbuch für Planung, Auslegung und Betrieb, Schriftenreihe Technik. Zürich: FAKTOR Verlag AG.
- Vereinigte Stadtwerke 2018. Lastprofilverfahren Strom. <https://www.vereinigte-stadtwerke.de/netz/unternehmen/strom> (05.04.2018)

SYSTEMOPTIMIERUNG MITTELS ANLAGENSIMULATION IN TRNLIZARD UNTER AUTOMATISCHER PARAMETERVARIATION

C. Stetter¹ und C. Frenzel¹

¹Transsolar Energietechnik GmbH, Stuttgart, Deutschland

KURZFASSUNG

TRNLizard ist eine Open-Source-Entwicklung zur integrierten thermischen Gebäudesimulation mit Tageslicht- und Strömungssimulation auf Basis von Rhinoceros, Grasshopper und TRNSYS 18. Als Erweiterung des Funktionsumfangs wurde die Komponentenbibliothek mit Komponenten zur Simulation der Energieversorgung erweitert.

Die Anwendung wird in diesem Paper am Beispiel eines Eisspeichersystems und eines Energiesystems mit Blockheizkraftwerk (BHKW) dargestellt und zeigt welche Potentiale sich daraus ergeben. Für eine ganzheitliche Bilanzierung wurde zusätzlich in TRNLizard die Berechnung der Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen nach VDI 2067 implementiert und direkt mit der dynamischen Anlagensimulation gekoppelt. Ziel der Studie war ein primärenergetisch effizientes Energiekonzept bei maximaler Wirtschaftlichkeit unter automatischer Parametervariation zu entwerfen.

Abstract

TRNLizard is an open source development for integrated thermal building simulation with daylight and flow simulation based on Rhinoceros 5, Grasshopper and TRNSYS 18. As an extension of the functional scope, the component library with system components for the energy supply has been extended.

The application is presented in this paper using the example of an ice storage system and a CHP energy system and shows the potential that results. For a holistic balancing, in TRNLizard was additionally implemented the calculation of the profitability of building services systems in accordance with VDI 2067 and linked directly with the dynamic system simulation. The aim of the

study was to design a primary energetic efficient energy concept with maximum economic efficiency under automatic parameter variation.

EINLEITUNG

Bei der Planung neuer Liegenschaften sind energetische Vorgaben nach der EnEV und EEWärmeG unbedingt einzuhalten. Doch kommt es dem Bauherrn am Ende besonders auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage an. Für den Planer ergibt sich eine neue Herausforderung, die richtige Balance zwischen dem Energiebedarf unter Einhaltung der Gesetze und einer bestmöglichen Rentabilität der Anlage zu entwickeln.

Daraus entstand die Fragestellung des vorliegenden Papers, nach dem energetischen und finanziellen Potential einer Systemlösung mit zentralem Eisspeicher und einer extern reversiblen Wärmepumpe zum Heizen und Kühlen. Betrachtungsobjekt ist eine rund 43.000 m² große Industrieliegenschaft mit verschiedenen Nutzungstypen. Als Vergleichsbasis wird ein System mit Blockheizkraftwerk und Spitzenlastkessel sowie einer Kompressionskälteanlage angesetzt.

Die energetische Betrachtung basiert auf der primärenergetischen Bewertung nach EnEV 2016. Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgt dabei auf Basis der Annuitätenmethode der VDI 2067. Zur systematischen Analyse der beiden Systeme und der energetischen Berechnung wird die Simulationssoftware TRNSYS 18 verwendet.

Um die Anforderungen der Bewertungsmethoden abdecken zu können, wurde ein Tool entwickelt, das die dynamische Simulation von TRNSYS mit

der Berechnung der VDI 2067 kombiniert. Mittels automatischer Parametervariation generiert dieses das Optimum hinsichtlich der Ausgangsfrage eines energetisch und finanziell optimalen Systems. Grundlage für die Optimierung bietet das Pareto-Kriterium, eigentlich ein Wohlfahrtskriterium aus der Ökonomie zur Bestimmung der maximalen Wohlfahrt in einer Volkswirtschaft. Die Umgebung für das Tool bildet dabei TRNLizard in Rhinoceros und Grasshopper.

SYSTEMBESCHREIBUNG

Im Folgenden sind die hydraulischen physikalischen Prinzipien der beiden untersuchten Varianten im Detail beschrieben. In folgender Untersuchung werden ausschließlich die Erzeugersysteme betrachtet. Die Energieverteilung und jegliche damit verbundene Verluste, Gewinne und Kosten werden nicht berücksichtigt.

BHKW plus Kompressionskälteanlage

Das konventionelle System besteht aus einem Heizkreislauf sowie einem Kühlkreislauf. Beide Anlagen sind hydraulisch voneinander getrennt und besitzen keinerlei Schnittstellen, wodurch jegliche Nutzung von Synergien oder Beeinflussung der Systeme untereinander ausgeschlossen ist. Das im Zuge der vorliegenden Arbeit untersuchte Hydraulikkonzept des Energiesystems mit BHKW, Spitzenlastkessel und Kompressionskälteanlage ist in Abbildung 1 dargestellt.

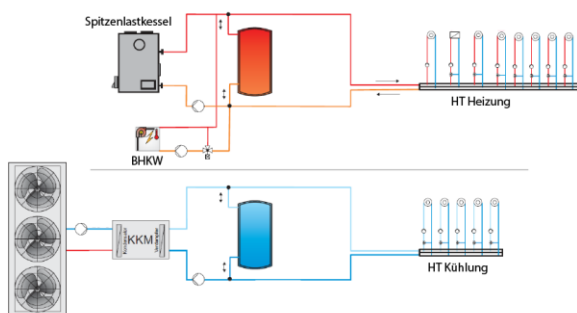


Abbildung 1: BHKW-System

Ein Blockheizkraftwerk bedient die Grundlast während ein zusätzlicher Brennstoffkessel die Spitzenlasten deckt. In den folgenden Untersuchungen nutzen beide Erzeuger den fossilen Brennstoff Erdgas. Um möglichst

niedrige Rücklauftemperaturen zu den Erzeugern zu garantieren, sind das BHKW und der Kessel parallelgeschaltet. Erhöhte Rücklauftemperaturen würden die Grädigkeit und damit die Effizienz der Anlagen reduzieren.

Es gibt nur ein Versorgungstemperaturniveau und es wird nicht zwischen Hochtemperatur (HT) und Niedertemperatur (NT) - Abnehmer unterschieden. Gekühlt wird das Gebäude mittels einer Kompressionskältemaschine mit Trockenrückkühlwerk. Die Pufferspeicher dienen als hydraulische Weiche zur Entkopplung der Erzeuger- und Verbraucherseite sowie zur Pufferung eventueller Lastschwankungen, die zum Takten der Anlagen führen können.

Die vom BHKW produzierte elektrische Energie wird vorrangig selbst verbraucht. Somit ist eine Reduktion des Netzbezugs der Kompressionskältemaschine und zusätzlicher Hilfsenergien für Pumpen oder die Regelung möglich. Der nicht genutzte Strom wird lokal in das Netz eingespeist.

Eisspeichersystem

Eine Analyse der Lastkurven zeigt die Deckung des jährlichen Wärmebedarfs durch die anfallende Abwärme des Gebäudes. Die Idee ist dementsprechend eine saisonale Verlagerung der Abwärme im Sommer und der konstanten Abwärme der IT-Kühlung in ein Speichersystem, um diese zum Heizen im Winter wieder nutzen zu können. Aufgrund der geologischen Gegebenheiten und der Genehmigungsfähigkeit wurde hier ein Eisspeichersystem gewählt.

Zur effizienten Nutzung der Synergien ist nur ein einzelnes hydraulisches Energiesystem mit einer reversiblen Wärmepumpe als Erzeuger und zentrales Bindeglied zwischen Heiz- und Kühlseite nötig. Reversibel bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Wärmepumpe zur Bereitstellung von Wärme sowie Kälte dient und in Kombination mit dem Speicher gleichzeitig passiven Kühlbetrieb ermöglicht. Das entwickelte Hydraulikkonzept ist in Abbildung 2 gezeigt.

Wie erwähnt, besteht das System aus mehreren, in sich geschlossenen Hydraulikkreisen. Durch eine intelligente Verschaltung dieser Kreise können verschiedene Betriebszustände geschaltet werden. Zusätzlich besteht dabei auch die Möglichkeit, Betriebszustände parallel zu fahren.

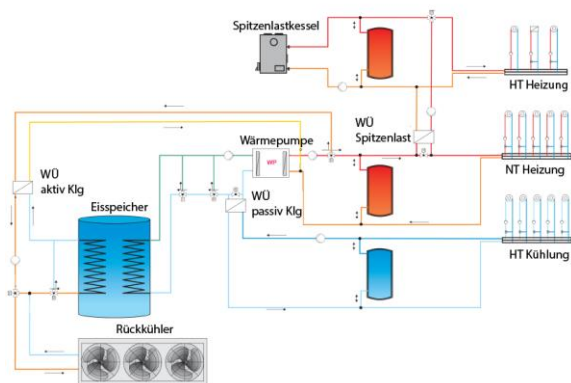


Abbildung 2: Eisspeichersystem

Besteht gleichzeitig Heiz- und Kühlbedarf so kann der Kältekreislauf über den Rücklauf des Verdampfers versorgt werden. Beim reinen passiven Kühlmodus werden die Kälteverbraucher direkt vom Eisspeicher versorgt, die Wärmepumpe wird nur passiv durchströmt. Zur Deckung der Heizspitzenlasten oder für den Fall, dass der Eisspeicher entladen ist, ist ein Brennwertkessel nötig. Dieser wird bei Bedarf zum Vorlauf der Wärmeverbraucher in Reihe geschaltet.

Ist kein Heiz- aber ein Kühlbedarf vorhanden und die Temperatur des Eisspeichers ist oberhalb der minimalen Vorlauftemperatur der Kälteverbraucher, muss aktiv gekühlt werden. Über eine externe Umschaltung fungiert die Wärmepumpe nun als Kältemaschine. Der Eisspeicher dient als Rückkühlreservoir. Als Backup im Sommer wird ein Rückkühlwerk verwendet, dass im Falle einer Überhitzung des Speichers die Wärme an die Umgebung abgibt.

BEWERTUNGSMETHODIK

Energetische Bewertung

Mit der Einführung der Energieeinsparverordnung EnEV 2002 wurde erstmals der Primärenergiebedarf als Richtgröße zur energetischen Bewertung von Anlagen und Gebäuden eingeführt. Im Detail vereinigt der Primärenergiebedarf, Förderung, Aufbereitung, Umwandlung, Transport und Verteilung bis zur Bilanzgrenze des Nutzers in einer Größe und eignet sich dadurch zur gesamtheitlichen Betrachtung und Gegenüberstellung verschiedener Systeme. Das Verfahren und die Werte sind entsprechend [1] gewählt.

Wie der Primärenergie sind auch die CO₂-Emissionen direkt an den Brennstoffbedarf

gekoppelt. Als CO_{2,spez} wird für Gas ein Wert von 220 g/kWh und für Strom von 560 g/kWh angesetzt.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit erfolgt entsprechend der dynamischen Investitionsrechnung nach VDI 2067. Diese behandelt die Berechnung der Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen aller Gebäudearten. Ziel der Berechnung ist ein quantitativer Vergleich der unterschiedlichen Anlagenkonzepte mittels der Annuitätenmethode unter Verwendung frei wählbarer Betrachtungszeiträume und evtl. auftretender Preisänderungen.

Diese Methode berücksichtigt einmalige wie auch laufenden Kosten mithilfe des Annuitätenfaktors über einen bestimmten Betrachtungszeitraum. Die resultierende Annuität, A, ist eine in gleichmäßigen Abständen wiederkehrende Zahlung in konstanter Höhe. Ist diese negativ, so sind die Ausgaben bzw. Kosten über den betrachteten Zeitraum größer als die Einnahmen. Ist die Annuität positiv, so überwiegen demnach die Einnahmen. Beim Vergleich mehrerer Investitionen miteinander ist die mit der größten Annuität zu empfehlen.

Nach [2] erfolgt die Kostenaufteilung hierbei nach kapital- ($A_{N,K}$), bedarfs- ($A_{N,V}$) und betriebsgebundenen Kosten ($A_{N,B}$) sowie sonstigen Kosten ($A_{N,S}$). Die fünfte Gruppe bilden die Erlöse ($A_{N,E}$), die durch die Vergütung von KWK-Anlagen anfallen.

Für gewöhnlich verändern sich die Kostenanteile über die Jahre unterschiedlich, weshalb separate Preisänderungsfaktoren entsprechend Tabelle 1 angesetzt sind. Der Betrachtungszeitraum beträgt 20 Jahre.

Die spezifischen Investitionskosten basieren auf Herstellerangaben. Die rechnerische Nutzungsdauer sowie Aufwand für Inspektion, Wartung und Instandsetzung und Bedienung von Anlagen ist der Tabelle A2, [2] entnommen.

Die Kosten für die elektrische Energie am Standort liegen bei 14 ct/kWh, Gas bei 3 ct/kWh. Für den Energie- bzw. Strompreis der Einspeisung wurde der KWK-Index des zweiten Quartals 2017 mit 29.78 €/MWh herangezogen. Die Netzvermeidungskosten sind nach [3]

pauschal mit 0.5 Ct/kWh angesetzt. Das BHKW wird entsprechend dem KWK-Gesetz 2016 vergütet.

Tabelle 1: Verwendete Kostenfaktoren

Kostenfaktor	Zinssatz
Zinsfaktor	6 %
Kapitalgebundene Kosten	3 %
Bedarfsgebundene Kosten	3 %
Betriebsgebundene Kosten	2 %
Sonstige Kosten	2 %
Wartungs- und Inspektionskosten	3 %
Vergütung	3 %

Optimierung

Die Optimierung der Anlagensysteme erfolgt nach dem Pareto-Optimum, einem sogenannten Wohlfahrtskriterium. Diese Kriterien dienen zur Ermittlung des gesellschaftlichen Wohlfahrts-optimums, also einem gesellschaftlichen Maximum der ökonomischen Wohlfahrt in einer Volkswirtschaft, das nach dem italienischen Ingenieur und Ökonomen Vilfredo Pareto (1848-1923) benannt ist.

Ein Pareto-Optimum (oder Pareto-Effizienz) ist ein Zustand von Ressourcen aus dem es nicht möglich ist, die Allokationen so neu anzuordnen, um ein bevorzugtes Kriterium zu verbessern ohne mindestens ein anderes Kriterium zu verschlechtern. In unterstehender Abbildung 3 ist beispielhaft eine Wertemenge mit den Eigenschaften Y über X aufgetragen. Verbessert man die Allokation C in X- oder Y-Richtung, ohne die andere im selben Schritt zu verschlechtern, so findet hier eine Pareto-Verbesserung statt. Ist keine Verbesserung hinsichtlich eines Kriteriums möglich, ohne ein anderes zu verschlechtern, so ist ein Pareto-Optimum erreicht (Punkt A oder B). Die Menge aller Pareto-Optima wird auch als Pareto-Front bezeichnet.

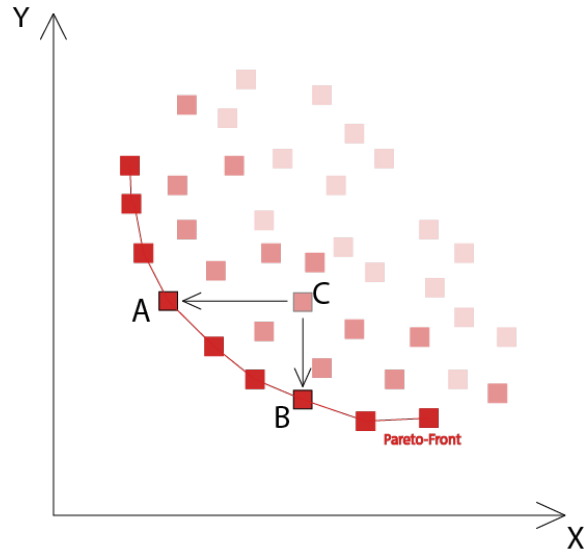


Abbildung 3: Pareto-Front

Im Falle der Systemoptimierung gibt es demnach eine Menge an Varianten, die hinsichtlich des Primärenergiebedarfs, wie auch der Annuität einem Pareto-Optimum entsprechen. Doch welches Optimum ist dann zu wählen? Hier zeigt sich der Nachteil des Optimierungskriteriums. Pareto-Optima sind nicht ohne ein weiteres Wohlfahrtskriterium vergleichbar.

Vereinfacht wird deshalb der Einfluss auf die Umwelt mit betrachtet. Der Ansatz ist hier, die Kosten zur Kompensation bzw. Schadensminderung des gesamten CO₂-Ausstoßes mit in die Kostenbilanz einfließen zu lassen. Basis bilden die Empfehlungen aus [4]. Dementsprechend sind als zentraler Kostenansatz 80 €/2010/tCO₂, 145 €/2030/tCO₂ und 260 €/2050/tCO₂ anzusetzen.

WERKZEUGE UND MODELLSTRUKTUREN

Software

Aufbau der Simulation erfolgt in der TRNLizard-Umgebung für Rhinoceros 3D. Den Rechenkern bildet dabei TRNSYS18. TRNSYS (TRAnsient SYstem Simulation Program) ist eine modular aufgebaute, instationäre Simulationsumgebung zur Simulation von Gebäude- und Anlagensystemen [5].

Rhinoceros ist eine kommerzielle 3D-Computergrafik und Computer-Aided Design (CAD) Software. Mit Grasshopper bietet Rhinoceros ein Plugin zum parametrischen Modellieren und Visualisieren [6]. Der Algorithmuseditor ist eine visuelle

Programmiersprache und bietet auch eine Umgebung für Programmiersprachen wie z. B. Python.

Des Weiteren ermöglicht wiederum das kostenlose Open-Source-Plugin TRNLizard die thermische Gebäudesimulation auf Basis detaillierter 3D-Geometrie, die direkt in Rhinoceros gezeichnet werden kann. TRNLizard bietet damit eine Alternative zum systemintegrierten TRNSYS-Simulationsstudio und umfasst vordefinierte Vorlagen sowie Ausgabewerte, die dem Nutzer eine schnelle Auswertung der Simulationsergebnisse ermöglicht [7].

Tool zur Systemoptimierung

Im Zuge der Studie wurde ein Tool zur Simulation und Optimierung hinsichtlich des Primärenergiebedarfs und der Kosten durch automatische Variation bestimmter Eingangsparameter entwickelt. Kern des Verfahrens bildet die Optimierungskomponente Octopus in Grasshopper. Octopus variiert die Eingangsparameter hinsichtlich bestimmter Zielkriterien mit dem Pareto-Optimum als Zielfunktion.

Weiterhin besteht in Grasshopper die Möglichkeit zur Implementierung und Kopplung der dynamischen Annuitätenmethode nach VDI 2067 mit der dynamischen Simulation in TRNLizard. Abbildung 4 zeigt schematisch den Aufbau des Simulationstools in Grasshopper.

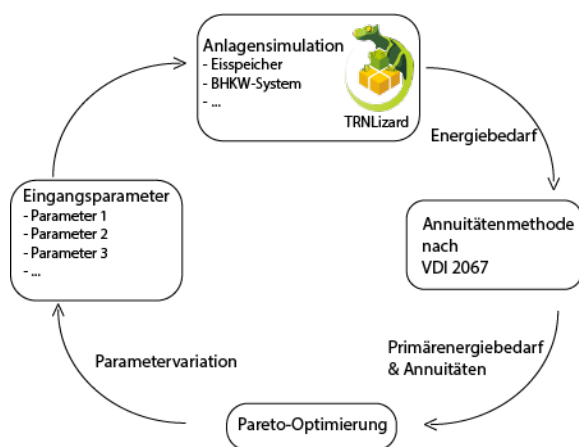


Abbildung 4: Systemoptimierung in Rhino/Grasshopper mit TRNLizard

Eine Anlagensimulation ist noch nicht in die TRNLizard-Umgebung implementiert, weshalb im ersten Schritt ein Konzept zum Aufbau einer solchen Anlagensimulation entworfen wird. Die

Intention bei der Entwicklung des Simulationstools ist ein modularer Aufbau, um dieses auch für zukünftige Simulationen nutzen zu können und eine gewisse Einfachheit für den Nutzer zu schaffen.

In Grasshopper ist das Konstruieren von Kreisläufen durch die Rückführung von Ausgängen zu Eingängen vorhergehender Komponente nicht möglich (sog. Zirkelbezug). Abhilfe bieten vordefinierte Kreisläufe aus einer Zusammenschaltung mehrere Komponenten. Am Beispiel der Bypass-Schaltung des Verbraucherkreises wird das Dreiwege-Ventil, wie auch das T-Stück zu einem Kreislauf verknüpft. Der Nutzer muss innerhalb dieses Kreislaufs keine individuellen Einstellungen vornehmen. Die In- und Outputs werden wiederum mit übergeordneten Kreisläufen geschaltet (vgl. Abbildung 5).

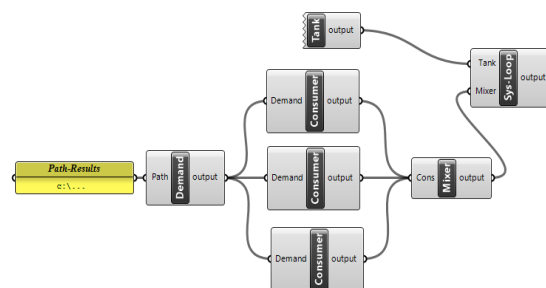


Abbildung 5: Beispiel Verbraucherkreislauf

Nach diesem Prinzip der modularen Zusammensetzung lassen sich komplette Anlagensimulationen aufbauen. Es entwickelt sich dadurch eine übersichtliche Struktur, die die Handhabung für den Nutzer erheblich vereinfachen kann.

VALIDIERUNG DES SIMULATIONSMODELLS

Aufgrund der Komplexität und dem Potential der Technik wird die Validierung am Bsp. des Eisspeichersystems erläutert. Die Validierung erfolgt mittels der Temperatur- und Eisverläufe am Eisspeicher. Als Vergleichsmodell wird ein vereinfachtes Energiebilanzverfahren über 8760 h am Speicher herangezogen. Basis bilden die stündlichen Bedarfsleistungen der thermischen Gebäudesimulation.

In erster Näherung ist der Verlauf der Temperatur und des Eisanteils als Parabel angenommen. Der Speicher ist so dimensioniert, dass der Scheitelpunkt der Temperatur (35 °C) und des

Eisanteils (100 %) zu Beginn und am Ende der Heizperiode erreicht sind (vgl. Abbildung 6). Bei gegebenem Bedarf ergibt sich eine ideale Speichergröße von 4.329 m³.

Dieses Speichervolumen bildet die Grundlage der dynamischen Simulation, woraus Abbildung 7 resultiert. Die ideale Speichergröße ist so gewählt, dass die Summer über 8760 h der ein- und ausgespeicherten Energien über den Speicher null ergeben. Die Summe der Energieströme im dynamischen Modell beträgt 1,91 % des Gesamt-speicherinhalts.

Ein Vergleich des Eisanteils und der Speichertemperaturen in Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigt eine Abweichung beim Phasenwechsel fest/flüssig um 12 Tage und flüssig/fest um 21 Tage. Der Verlauf wie auch die Bilanz des dynamischen Simulationsmodells sind damit bestätigt. Die Kostenberechnung wurde anhand des Beispiels aus [2] validiert.

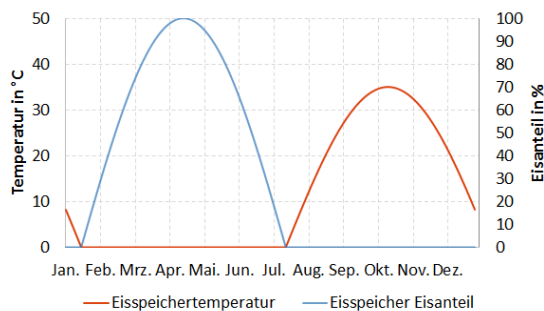


Abbildung 6: Vereinfachtes Energiebilanzverfahren über den Speicher

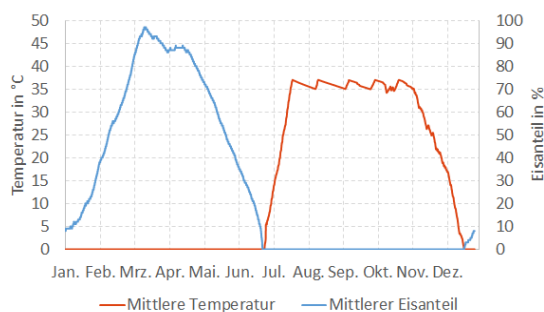


Abbildung 7: Detaillierte Anlagensimulation mittels TRNSYS

ERGEBNISSE

Insgesamt werden mit dem Optimierungstool 130 verschiedene Systemkonfigurationen des Eisspeichersystems und des konventionellen Systems gerechnet. Jede dieser Kombinationen ist in Abbildung 8 als ein Punkt mit der Annuität

über den Primärenergiebedarf dargestellt. Die Annuitäten der Eisspeichersysteme liegen zwischen 130.000 und 180.000 €/a, während sich der Primärenergiebedarf auf einen Bereich von 900 MWh bis 1.500 MWh jährlich beläuft.

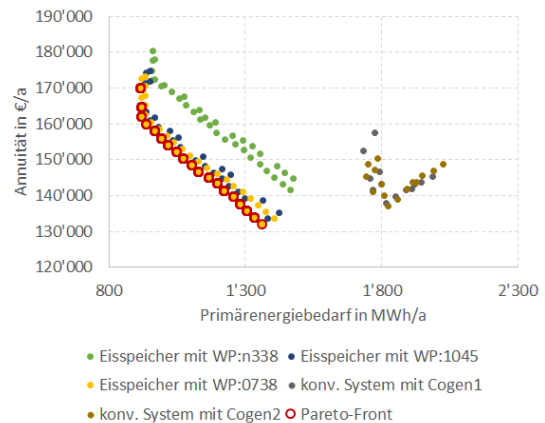


Abbildung 8: Annuität über Primärenergie der Simulationsergebnisse

Aufgrund fester spezifischer Kostenansätze für Anlagenkomponente und fixer Preisangaben von Netzbetreibern verlaufen die Eisspeichersysteme gleicher Anlagenkomponente bei variierender Speichergröße linear. Das bedeutet, je höher der Primärenergiebedarf desto geringer sind die jährlichen Kosten. Hauptgrund für die Abnahme der Annuität mit abnehmender Speichergröße sind die höheren Investitionskosten durch den Eisspeicher, die einen erheblichen Einfluss von bis zu 50 % auf die jährlichen Gesamtkosten ausmachen. Mit sinkendem Speichervolumen fällt dann auch der Kostenanteil auf 30 %.

Auf der primärenergetischen Seite hat die Speichergröße einen weitaus positiveren Einfluss. Eine Steigerung der Speicherkapazität auf 5.000 m³ ermöglicht eine Zunahme der passiven Kühlenergie bis zu 53 % und der bereitgestellten Heizenergie bis zu 90 % durch die Wärmepumpe. Mit der Zunahme der Speichergröße setzt auch der Zeitpunkt des Gefrierens später ein und die Wärmepumpe läuft bis zu 67 % auf Vollast im Heizbetrieb und muss dadurch weniger Takten.

Je kleiner der Speicher, desto höher ist die Taktung und der Vollastanteil bei einem 1.000 m³ Eisspeicher sinkt auf 35 % im Heizfall. Das bedeutet mehr An- und Ausschaltvorgänge, was längere Laufzeiten bei weniger Vollaststunden zur Folge hat und sich negativ im Primärenergiebedarf widerspiegelt. Gleichzeitig sinkt bei kleinem Speicher der Anteil der

passiven Kühlenergie auf 35 % und die Heizenergie über Wärmepumpe auf 55 % (vgl. Abbildung 9).

Am primärenergetisch optimalen Punkt kommt es zu einem Anstieg der Annuität bei konstantem Primärenergiebedarf. Dieser Kostenanstieg ohne energetische Verbesserung ist auf die optimale Speichergröße zurückzuführen ab der kein effektiver Mehrertrag als Wärmequelle möglich ist.

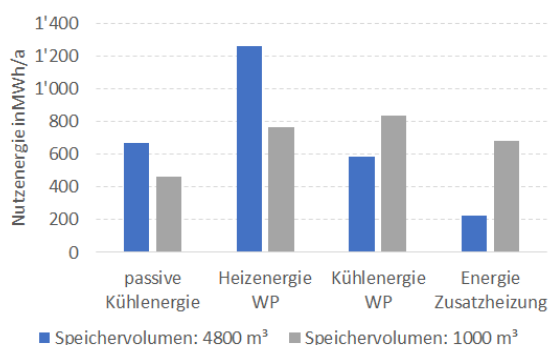


Abbildung 9: Energetischer Vergleich der größten und kleinsten simulierten Speichervariante

Die Punkte des konventionellen Systems bewegen sich in einem niedrigeren Annuitäten-Bereich zwischen 135.000 und 160.000 €/a. Der Primärenergiebedarf liegt insgesamt höher als beim Eisspeichersystem zwischen 1.750 und 2.050 MWh jährlich. Kostenmäßig sind die beiden Energiesysteme kaum zu unterscheiden. Der hohe Primärenergiebedarf der BHKW-Variante ist auf den enormen Bedarf fossiler Brennstoffe zurückzuführen.

Die Pareto-Front besteht aus 19 Pareto-Optima, also den Punkten, die hinsichtlich Ihrer Allokation nicht verbessert werden können. Diese sind deckungsgleich zu der Eisspeichervariante mit der Wärmepumpe mit einem Betriebspunkt bei 07 °C/38 °C (Verdampfer-/Kondensatorseite). Keine Variante des konventionellen Systems ist demnach ein Pareto-Optimum. Das Gefälle der Pareto-Front liegt hier bei 0,12 €/kWh.

Wie beschrieben, wird zur Entscheidungsfindung der Umweltaspekt durch die Berücksichtigung der CO₂-Kosten miteinkalkuliert. Die Simulationsbasis und damit die Primärenergie der jeweiligen Variante bleiben gleich. Ausschließlich die CO₂-Kosten sind bei den sonstigen Kosten berücksichtigt. Abbildung 10 zeigt dazu die neu berechneten Annuitäten über den Primärenergiebedarf. Durch die zusätzlichen

CO₂-Kosten variiert die Annuität des Eisspeichersystems nun zwischen 160.000 und 205.000 € pro Jahr. Es lässt sich dennoch feststellen, dass die Abhängigkeit von Annuität zu Primärenergie der Pareto-Front auf 0,05 €/kWh sinkt.

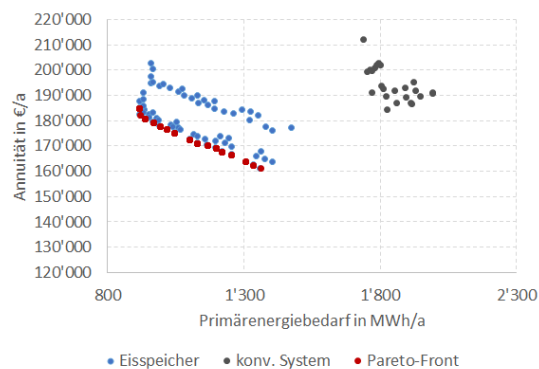


Abbildung 10: Annuität über Primärenergie unter Berücksichtigung der Kosten für Klimaschäden

Unter dem Gesichtspunkt, dass Umweltverschmutzung und Treibhausgasemissionen durch zusätzliche Zahlung aufgewogen werden können, ist die Lösung mit der insgesamt geringsten Annuität auf der Pareto-Front zu wählen. In diesem Fall ist es die Eisspeichervariante bestehend aus einem 1.000 m³ Eisspeicher und der Wärmepumpe mit dem Betriebspunkt bei 7 °C/38 °C.

Aufgrund des höheren Primärenergiebedarfs und folglich der höheren CO₂-Emissionen des konventionellen Systems im Vergleich zum Eisspeichersystem, steigen auch die Annuitäten nun stärker an. Die Annuität des konventionellen Systems bewegt sich in einem Bereich zwischen 180.000 und 215.000 €/a. Das konventionelle Kostenoptimum bleibt bei ca. 1.800 MWh Primärenergie/a. Die Pareto-Front ist gleich der Analyse ohne Berücksichtigung der CO₂-Kosten.

ZUSAMMENFASSUNG

Das entwickelte Tool zur Anlagensimulation und Kostenberechnung in TRNLizard hat noch ein erhebliches Entwicklungspotential hinsichtlich der Handhabung und dem Funktionsumfang. Grundsätzlich lässt sich aber sagen, dass das TRNLizard-Interface mit dem modularen Aufbau aus einzelnen Loops in die richtige Richtung weist. Der Schwerpunkt weiterer Entwicklungsphasen liegt nun vor allem auf der Verbesserung der Nutzerfreundlichkeit und gleichzeitiger Erhöhung der Validität, die den

Zugang zur Anlagensimulation einem größeren Nutzerspektrum erlaubt.

Unter den gegebenen Bezugskosten von Strom und Gas sowie der Vergütung und ausbleibenden Stromkosten durch KWK-Anlagen ist es für Wärmepumpensysteme schwer konkurrenzfähig zu sein, im speziellen bei stromintensiven Objekten. Dennoch zeigen Energiesysteme, wie das hier entwickelte Eisspeicherkonzept ein hohes Potential durch intelligente hydraulische Verschaltung zur Nutzung der Synergien.

Die richtige Balance zwischen ökologischer Verträglichkeit und notwendiger Wirtschaftlichkeit war Ziel der beschriebenen Optimierungsstudie. Das Pareto-Kriterium ist für diesen Prozess nur bedingt geeignet, da es für die Entscheidungsfindung ein zusätzliches Kriterium oder einen Kompromiss benötigt. So wurde als Kompromiss der Primärenergiebedarf durch fiktionale Kosten für Klimafolgeschäden ersetzt, wodurch die Entscheidungsfindung nun ausschließlich auf der Wirtschaftlichkeit basiert.

Zum Abschluss der Optimierung stellt sich grundsätzlich die Frage, ob Octopus als Optimierungskomponente im Rahmen dieses Prozesses nötig war. Bei Optimierungen mit hoher Variantenvielfalt kann Octopus durch Selektion die Rechenzeit reduzieren. Trotzdem wurden durch die geringe Parameterzahl bei diesem Optimierungsprozess alle möglichen Varianten gerechnet und Octopus schlussendlich nur zur Ermittlung der Pareto-Front genutzt.

LITERATUR

- [1] DIN V 18599-1:2016-10, Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwasser und Beleuchtung – Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger
- [2] VDI 2067: Blatt 1, Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen, Grundlagen und Kostenberechnung, 09/2012
- [3] Katja Tschetschorke, Jens Schuberth, Strom und Wärmeversorgung einer Siedlung bei unterschiedlichen Energieeffizienz-Standards: Climate change, Hrsg:Umweltbundesamt, 10/2013

- [4] Dr. Sylvia Schwermer. Ökonomische Bewertung von Umweltschäden: Methodenkonvention 2.0 zur Schätzung von Umweltkosten, Hrsg: Umweltbundesamt, 08/2012
- [5] TRNSYS 18. Volume 1: Getting Started, Hrsg: Solar Energy Laboratory, Univ. of Wisconsin-Madison, TRANSSOLAR Energietechnik GmbH, CSTB – Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, TESS – Thermal Energy Systems Specialists, 02/2018
- [6] Christoph Gengnagel, Axel Kilian, Norbert Palz, and Fabian Scheurer, editors. Computational, Design Modelling: Proceedings of the Design Modelling Symposium Berlin 2011, Hrsg: Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [7] TRNSYS 18 - TRNLizard, Free plugin for Rhinoceros/Grasshopper for parametric 3D building simulation, Hrsg: Transsolar Energietechnik GmbH

METHODEN ZUR INTEGRATION VON SACHDATEN IN CITYGML DATEIEN ZUR VERBESSERUNG DER ENERGETISCHEN ANALYSE VON STADTQUARTIEREN UND DEREN VISUALISIERUNG

V. Weiler¹, P. Würstle², A. Schmitt¹, J. Stave¹, R. Braun¹, M. Zirak¹, V. Coors² und U. Eicker¹

¹Zentrum für nachhaltige Energietechnik, Hochschule für Technik Stuttgart, Germany

²Zentrum für Geodäsie und Geoinformatik, Hochschule für Technik Stuttgart, Germany

ABSTRACT

Auf Basis von 3D-Gebäudemodellen im CityGML-Standard kann mit der Simulationsplattform SimStadt unter anderem der Heiz- und Kühlenergiebedarf von Gebäuden sowie das PV Potential in Stadtquartieren berechnet werden. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass Informationen wie Gebäudebaujahr, Sanierungsfortschritt oder genaue Angaben zur Nutzung der Gebäude teilweise fehlen oder fehlerhaft sind und somit nicht ausreichend, um gesamte Quartiere im gewünschten Detaillierungsgrad zu analysieren. In diesem Artikel werden verschiedene Ansätze methodisch vorgestellt, wie eine Anreicherung der Eingangsdaten aus verschiedenen Quellen, wie OpenStreetMap oder durch Crowdsourcing durchgeführt werden und dadurch eine Verbesserung des Simulationsmodells erreicht werden kann.

The simulation platform SimStadt is based on 3D building models and can be used to calculate, among other things, the heating and cooling demand of buildings as well as the PV potential in a city quarter. In practice, however, information such as building construction year, state of refurbishment or detailed building use are sometimes partly or entirely missing or incorrect and therefore not sufficient to analyze entire city quarters in the desired level of detail. In this article, different methods are presented to enrich data using sources such as OpenStreetMap or crowdsourcing to achieve a subsequent improvement of the simulation model.

EINLEITUNG

Immer mehr Städte und Gemeinden entwickeln eigene Klimaschutzkonzepte, zentraler Bestandteil ist dabei meist der Wärmeschutz im Gebäudebestand (Amt für Umweltschutz., Landeshauptstadt Stuttgart 2016). Für die Erhebung des Status-Quo, sowie für die Entwicklung von Gebäudeeffizienzstrategien, kann für die Heizwärmebedarfsberechnung von Quartieren auf Simulation-Tools wie SimStadt (Eicker, Coors, et al. 2016) zurückgegriffen werden. Als Eingangsdaten dienen Modelle der Gebäude eines Quartiers, welche im standardisierten CityGML Dateiformat gespeichert sind. Diese Dateien beinhalten neben der 3D-Gebäudegeometrie auch Gebäudeinformationen wie Gebäudealter und -nutzung.

Es zeigen sich jedoch häufig Abweichungen zwischen dem simulierten Heizwärmebedarf und dem realen Wärmeverbrauch (Eicker, Nouvel, et al. 2012), vor allem bei Nicht-Wohngebäuden. Dies ist einerseits auf die komplexe Nutzung dieser Gebäude als auch generell auf eine fehlende bzw. nicht aktuelle Datengrundlage zurückzuführen. Beispiele hierfür sind die fehlende Aktualisierung von durchgeführten Sanierungsmaßnahmen, fehlende Baujahre oder falsche bzw. ungenaue Angaben zur Gebäudenutzung. Die Angaben zur Nutzung der Gebäude richten sich nach der vereinbarten Klassifikation, sie sind jedoch für die Anwendung für die energetische Analyse oftmals nicht detailliert genug. Ein manueller Abgleich der Daten ist aufgrund des enormen Umfangs bei

Stadtquartieren nicht praktikabel. Ein von Chen et al. vorgestellter Ansatz kombiniert die Informationen aus der CityGML Datei mit Daten aus Quellen von verschiedenen städtischen Behörden. Diese Anreicherung muss aber in enger Abstimmung mit den entsprechenden Städten erfolgen und ist aufgrund der verschiedenen Datenformate sehr aufwendig (Chen, Hong und Piette 2017). Daten des Zensus des statistischen Bundesamtes dürfen außerdem nach den in Deutschland geltenden Regelungen zum Datenschutz nur in anonymisierter Form freigegeben werden und können daher für einen gebäudescharfen Datenabgleich nicht genutzt werden. Für den Wärmebedarfsatlas in Baden-Württemberg besteht die kleinste Gebietseinheit zum Beispiel aus einem Baublock, der sich mindestens aus drei Gebäuden zusammensetzt (Landesamt für Umwelt Baden-Württemberg).

Es werden daher zwei Methoden vorgestellt, mit denen die Datengrundlage von Quartierssimulationen kontinuierlich aktualisiert und verbessert werden kann. Zum einen ist dies die automatische Anreicherung und der Abgleich der CityGML-Dateien mit Daten der OpenStreetMap-Plattform (OSM), zum anderen können Informationen über einen Crowdsourcing-Ansatz auf Basis einer Weboberfläche mit visualisiertem 3D-Stadtmodell, welches im Rahmen des Forschungsprojektes WeBest entwickelt wurde (Coors, et al. 2016), integriert werden. Mit Hilfe dieser Anreicherung der CityGML Dateien mit Sachdaten kann das Simulationsmodell für die urbane Energiesimulation verbessert werden, womit eine erhöhte Genauigkeit und Aussagekraft der Ergebnisse zu erwarten ist. Außerdem kann die so angereicherte CityGML Datei für verschiedenste Tools und Anwendungen genutzt werden. Die beschriebene Methode ist also unabhängig von der Nutzung in einem bestimmten Simulationsmodell.

ANREICHERUNG DER CITYGML DATEI MIT INFORMATIONEN AUS OPENSTREETMAP (OSM)

CityGML Dateien

CityGML ist ein auf XML basierendes Datenmodell für 3D Modelle von Städten und Landschaften. GML (Geography Markup Language) ist ein international standardisiertes Format, welches eine Struktur vorgibt, wie die

enthaltenen Objekte, z.B. Gebäude, definiert und beschrieben werden.

Der Informationsgehalt sowie die Güte und Aktualität der Informationen in einer CityGML Datei können sehr unterschiedlich sein. Die Attribute, die zur Beschreibung der Gebäude dienen sind u.a. das Baujahr, der Gebäudetyp oder die Gebäudenutzung (Open Geospatial Consortium Inc. 2006). Außerdem ist es möglich, dass sich CityGML Dateien aus unterschiedlichen Quellen in der Datenstruktur unterscheiden.

OpenStreetMap - POI

Die online Plattform OpenStreetMap (OSM) hat das Ziel, eine kostenlose und freie Weltkarte zu erschaffen. Alle Informationen stehen unter der Creative Commons (CC) Lizenz. Die Daten wie Straßen, Umriss von Gebäuden, interessante Punkte (POI – points of interest), usw. können von jedem der 4,3 Millionen registrierten Nutzer (Stand 2017) zur Verfügung gestellt bzw. bearbeitet werden. Gleichzeitig werden alle gesammelten Daten in Rohform und als Kartenbilder online bereitgestellt (OpenStreetMap 2018).

Der Detaillierungsgrad und die Aktualität der Daten ist unterschiedlich, in urbanen Gebieten kann man davon ausgehen, dass die Informationsdichte eher hoch ist (Haklay 2010). Auf verschiedenen Webseiten kann man den Informationsgehalt von OSM Karten mit den Karteninhalten von google maps oder anderen Anbietern vergleichen (Geofabrik GmbH 2018). In städtischen Gebieten ist die Informationsdichte von OSM größer als etwa die von google maps, für ländliche Gebiete und kleine Orte kann dies jedoch anders aussehen. Daher werden in zwei Testgebieten (einmal im urbanen Raum in der Stadt Stuttgart sowie einmal im ländlichen Raum im Landkreis Ludwigsburg) stichprobenartige vor-Ort-Begehungen durchgeführt, um die Daten auf deren Vollständigkeit und Aktualität zu beurteilen.

In OSM werden POIs durch die 2xxx codes und die dazugehörigen feature classes (fclasses) beschrieben (Ramm 2017). Die POIs sind für die Anreicherung interessant, da es sich hier z.B. um Geschäfte oder Gastronomie handelt. Nicht Inhalt der POIs sind Nutzungen wie Büros, Verwaltungsgebäude oder reine Wohngebäude.

Es gibt insgesamt 142 Unterkategorien in den 2xxx codes, wobei nicht alle von Relevanz für die energetische Simulation sind. So werden hier auch Orte wie öffentliche Parkbänke oder Brunnen verzeichnet. Nicht energie-relevante POIs können daher gefiltert und gelöscht werden, aus den insgesamt 142 Kategorien konnten so 85 relevante Kategorien identifiziert werden.

Um zu überprüfen, in wie weit sich Informationen aus OSM zur Anreicherung von CityGML Daten eignen, wurde ein innerstädtisches Quartier in Stuttgart näher betrachtet. Die verwendete CityGML Datei des Gebietes umfasst insgesamt 1.258 Gebäude und besteht zu 53% aus Wohngebäuden (teilweise mit einer Nebennutzung für Geschäfte), 13% Industrie, 6% Büro- und Verwaltung und 4% Verkaufsgeschäften, die restlichen 14% bestehen hauptsächlich aus unbeheizten Gebäuden sowie Bildungs- und Veranstaltungsgebäuden, Sportstätten und Restaurants. Einige Gebäude stehen unter Denkmalschutz oder besitzen erhaltenswerte Fassaden.

Bei einem ersten Vergleich der jeweils in OSM und in der CityGML angezeigten Nutzung von Gebäuden im beschriebenen Gebiet können bereits Unterschiede ausgemacht werden. So ist zum einen auffällig, dass die Nutzungen in OSM detaillierter sind als in der CityGML. Während in der CityGML manche Gebäude nur als „Geschäftsgebäude“ beschrieben werden, unterscheiden die OSM Daten zwischen „supermarket“, „car_dealership“ und „department_store“, also einem Supermarkt, Autohaus oder Kaufhaus.

Außerdem gibt es generelle Abweichungen zwischen den beiden Quellen. So ist z.B. bei einigen Gebäuden in der CityGML „Wohnhaus“ als Nutzung definiert, also eine reine Wohnnutzung, laut OSM ist aber an den Koordinaten ein Frisör, Kleiderladen oder ein Restaurant. Weiterhin gibt es einige Gebäude, die in der CityGML als „Wohn- und Wirtschaftsgebäude“ definiert sind, also eine Wohn- sowie Nichtwohnnutzung der Gebäude stattfindet. Die Angaben zu diesen Gebäuden in OSM sind genauer und reichen von „kiosk“ über „restaurant“ zu „hotel“

Die OSM Daten für das untersuchte Gebiet umfassen insgesamt 286 POIs. Ein einfacher Verschnitt von beiden Datenquellen liefert

zunächst 51 Treffer, bei denen POIs aus OSM den jeweiligen Gebäuden aus der CityGML zugeordnet werden können. Bei 41 weiteren POIs ist eine zusätzliche geometrische Zuordnung der POIs nötig, da sie um etwa 1 - 1,5 m außerhalb der entsprechenden Gebäudegrundfläche liegen. Die POIs können jedoch stets eindeutig dem entsprechenden Gebäude zugeordnet werden.

Somit können bei insgesamt 92 Gebäuden zusätzliche Informationen gewonnen werden, was bezogen auf das gesamte Untersuchungsgebiet 9% entspricht. Vor allem bei den Gebäuden, die eine Nichtwohnnutzung entweder als Haupt- oder Nebennutzung haben, kann die Anreicherung mit POIs aus OSM eine Verbesserung erzielen. Bei einer Untersuchung in der u.a. die Abweichungen von Simulation und gemessenen Daten verglichen wurden, konnten bei dieser Gebäudeart die höchsten Unterschiede festgestellt werden. (Braun, et al. 2018)

OpenStreetMap – Gebäude-Attribute

Eine weitere Information, die theoretisch zur genaueren Beschreibung eines Gebäudes in OSM angegeben werden kann, ist das Baujahr. Hierfür gibt es verschiedene Attribute in OSM wie `start_date`, `year_of_construction` oder `year_built`. Davon ist das Attribut `start_date` das mit 4,48% das am Häufigsten verwendete im Zusammenhang mit dem `key building`. Jedoch kann das `start_date` sowohl das Baujahr als auch z.B. das Eröffnungsjahr des darin befindlichen Geschäfts sein. Die weiteren Attribute, die das Baujahr beschreiben werden jeweils nur bei unter 0,01% aller Gebäude genutzt, Angaben über das Sanierungsjahr oder den Sanierungszustand gibt es noch seltener.

Die Zusammenhänge zwischen allen Attributen können über den Service TagInfo von OSM eingesehen werden (TagInfo 2018). Mit Hilfe eines Webtools zur Analyse der in OSM hinterlegten Tags (Almendros-Jiménez und Becerra-Terón 2018) wurden die Gebäude im Untersuchungsgebiet analysiert. Das einzige zur Analyse auswählbare Attribut im Zusammenhang mit dem Baujahr ist `start_date`, welches bei 99,3% der Gebäude fehlt.

Möglichkeiten der Integration von OSM Daten in eine CityGML Datei

Um die gewünschten Daten aus OSM in die CityGML Datei zu integrieren, gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- Nutzung von FME

FME (File Manipulation Engine) ist ein kostenpflichtiges Tool zur Verschneidung von Daten aus verschiedenen Quellen. Dabei müssten zunächst die OSM Daten und die CityGML Datei über einen Reader eingelesen werden. Beim Einlesen der OSM Daten können dabei bereits die relevanten Informationen ausgewählt werden, damit nicht benötigte Informationen gar nicht erst importiert werden. In einem zweiten Schritt müssen die Koordinatensysteme in Einklang gebracht werden, wobei hier das System der CityGML (DHDN / Gauß-Krüger Zone 3) als gemeinsames System gewählt wird, da am Ende der Verschneidung auch eine CityGML Datei ausgegeben werden soll. Im nächsten Schritt werden die 3D-Gebäude der CityGML Datei auf 2D reduziert, um die Grundrisse mit den Punkten aus OSM verschneiden zu können.

Die Verwendung dieser Methode wird hier nicht bevorzugt, da FME ein proprietäres Tool ist, was die Nutzung im Zusammenhang mit anderen Anwendungen zur energetischen Simulation von Stadtquartieren sehr erschwert.

- Direkte Integration in die Simulationsplattform

Eine weitere Methode ist die Verknüpfung der gewünschten Informationen aus OSM direkt in der Simulationsplattform. Dies würde den Vorteil bieten, dass alle Operationen gebündelt stattfinden und keine zusätzlichen Tools oder Programme nötig sind.

Jedoch bedeutet diese Methode einen erheblichen manuellen Programmier-Aufwand, außerdem könnte die Methode dadurch ausschließlich in Kombination mit der Simulationsplattform angewandt werden. Daher wird diese Option zunächst nicht weiterverfolgt.

- Verschneidung in einer Datenbank

Die Nutzung des PostgreSQL Datenbankmanagementsystems erlaubt das Verwalten von Daten aus verschiedenen Quellen. Die Nutzung dieses Systems bietet viele Vorteile, da es ein Open Source Tool ist und mit

der Verwendung der 3D CityDB (Stadler, et al. 2009) kompatibel ist. Die 3D CityDB ist eine Geo-Datenbank, die den OGC Standard der CityGML Dateien verwendet und somit für die vorliegende Anwendung ideal ist.

Aufbau einer Datenbank

Ziel ist es, die POIs aus OSM über das PostgreSQL Datenbankmanagementsystem mit den in der CityGML enthaltenen Informationen zu verknüpfen. Dafür wird zunächst die PostgreSQL Erweiterung PostGIS verwendet, um dem Datenbanksystem die Fähigkeit zur Verarbeitung geographischer Daten zu geben.

In der vorliegenden Untersuchung bildet die 3D CityDB die Grundlage der Datenbank. Mit dem 3D City Importer wird die CityGML Datei in die PostgreSQL Datenbank mit 3D CityDB Struktur importiert.

Für den Import der OSM-Daten wird Osmosis verwendet, eine Anwendung die speziell für die Verarbeitung von OSM Daten geeignet ist. Nicht energierelevante Nutzungen wie z.B. Parkbänke und Telefonzellen werden hier vorab gefiltert und nicht weiter berücksichtigt. Die vorgegebene Struktur der 3D CityDB muss dabei erweitert werden, um die zusätzlichen Informationen in die Datenbank aufzunehmen.

Abbildung 1 erklärt diese Zusammenhänge bildlich.

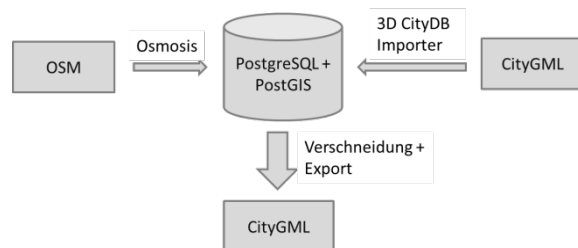


Abbildung 1: Zusammenführen unterschiedlicher Informationsquellen via Datenbank

Um die Attribute der OSM Daten den Informationen aus der CityGML Datei zuzuordnen, müssen diese in der 3D CityDB verknüpft und korrekt zugewiesen werden. Da die IDs der Gebäude in der CityGML Datei und die IDs der POI in den OSM Daten nicht übereinstimmen, muss eine andere Gemeinsamkeit der Datenpunkte gefunden werden, um eine Zuordnung der Daten durchzuführen. Eine Möglichkeit hierfür ist die Verschneidung, bei der über die geografische Lage die Sachinformationen von mehreren

Datensätzen kombiniert werden. Dabei müssen die zu verschneidenden Datensätze zunächst dem gleichen Koordinatensystem zugewiesen werden. Anschließend können die Sachinformationen aus OSM mit den geografischen Informationen der CityGML Datei verschnitten werden. Dabei ist zu beachten, dass die Zuordnung des POI innerhalb der Gebäudeumrisse stattfindet (siehe Abbildung 2).

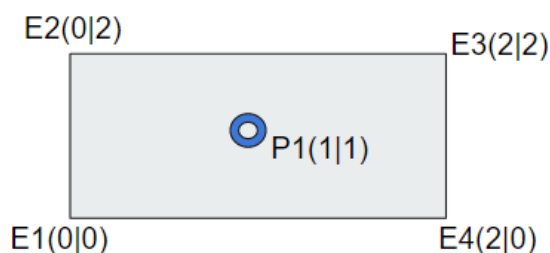


Abbildung 2: Zuordnung eines POI zu einem rechteckigen Gebäudegrundriss

Um zu prüfen, ob der POI innerhalb des Gebäudegrundrisses liegt, muss die Anzahl der Schnitte des Punktes mit den Wänden ermittelt werden (siehe Abbildung 3). Bei einer ungeraden Anzahl Schnitte befindet sich der POI innerhalb der Gebäudegrundfläche, bei einer geraden Anzahl außerhalb.

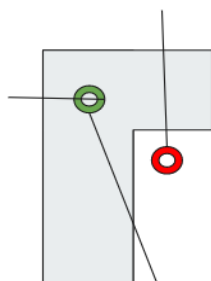


Abbildung 3: Zuordnung eines POI

Es kann auch sein, dass der Punkt auf dem Rand der Gebäudegrundfläche in OSM liegt. Da diese Flächen eine Differenz zu den Flächen in der CityGML aufweisen, befinden sich manche POIs außerhalb der CityGML Gebäude. Ist dies der Fall, kann mit einem festgelegten Radius ein Kreis um den betreffenden Punkt gezogen werden. Der nächste Schnittpunkt des Kreises mit einem Gebäudegrundriss legt die Zuordnung des Punktes zu diesem Gebäude fest.

CROWD-SOURCING TOOL ZUR VERIFIZIERUNG UND AKTUALISIERUNG VON GEBÄUDESPEZIFISCHEN SACHDATEN

Als Crowdsourcing bezeichnet man generell „das Sammeln von Beiträgen einer Vielzahl von

Menschen zur Erreichung eines gemeinsamen Ziels“ (Klöhn und Hornuf 2012). Bezogen auf die vorliegende Thematik, kann Crowdsourcing als eine „interaktive Form der Wertschöpfung unter Nutzung moderner Informations- und Kommunikationstechniken (Web 2.0)“ angesehen werden (Gabler Wirtschaftslexikon 2018).

Ziel des Crowdsourcing-Ansatzes ist es, durch von den Nutzern bereitgestellte Informationen eine höhere Aktualität sowie eine höhere Informationsdichte sowohl auf Einzelgebäude-, als auch auf Stadt- und Landkreisebene zu erreichen. Weiterhin wird dem Nutzer ein Tool zur Verfügung gestellt, das neben dem aktuellen Energiebedarf auch Einsparmöglichkeiten transparent abbilden kann. Somit besteht die Möglichkeit, aktiv eine Nutzersensibilisierung anzustoßen bzw. den Nutzer zu Verhaltensänderungen zu motivieren.

Technisches Konzept für Prozesse und Komponenten

Das technische Konzept besteht auf Nutzer-Seite aus einem Web-Client und auf Web-Server-Seite aus mehreren Services, die vom Web-Server bereitgestellt und je nach Bedarf angestoßen werden.

Das Crowdsourcing-Tool besteht im Wesentlichen aus den folgenden Komponenten:

- Web Client, zur Nutzung auf PC, Notebook, Tablet Devices und Smartphones,
- Web Server mit Benchmarking-Tool und User Management, Visualisierung, Datenerfassung und Steuerung des Gesamtprozesses (siehe Abbildung 4)
- Datenbank-Server mit Gebäudemodell und Gebäudeattributen,
- Berechnungs- bzw. Simulations-Server zur Ermittlung des Energiebedarfs

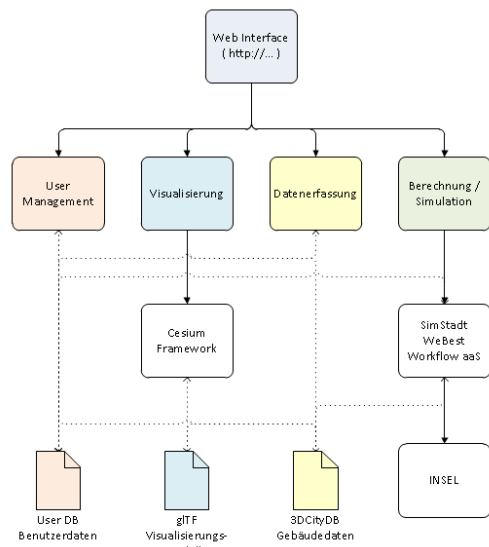


Abbildung 4: Informationsflüsse sowie Teilprozesse des Crowdsourcing-Tools (Quelle: WeBest)

Die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten erfolgt ausschließlich über Web-Services (WS). Dazu gehören neben dem Zugriff auf die 3D-Gebäudemodelle und Gebäudeattribute, der Nutzung des Berechnungs- und Simulations-Servers auch die Nutzung von internetbasierten Web Map Services (WMS) für die Bereitstellung des Bildschirm-Hintergrundes mit Kartendaten oder Luftaufnahmen.

Datenkonzept

Auf der Grundlage von CityGML wird ein geo- oder objektreferenzierbares Gebäudemodell samt energierelevanten Erweiterungen als „Basismodell“ verwendet, das in Form der aktuellsten Version der CityGML EnergyADE (Nouvel, et al. 2015) abgebildet wird und zugleich die Grundlage für Energiebedarfsberechnungen und Simulationen von Alternativszenarien bildet.

Es wird sowohl eine übergreifende nicht-personenbezogene sowie davon getrennt eine personenbezogene Datenhaltung umgesetzt. Dies begründet sich aus der vorhandenen Prozessmodellierung in Verbindung mit Datenschutzaspekten.

Die übergreifende Datenhaltung führt alle nicht-personenbezogenen Daten, bspw. Gebäudegeometrie oder Sachattribute, aus unterschiedlichen Quellen zusammen. Während der Ausführung des Tools werden diese Daten gebäudebezogen zusammengestellt und ausschließlich lesend über einen Service angewandt. Außerdem können Informationen des Gebäudeumfelds genutzt werden, um bspw.

den Verschattungsanteil bei solaren Energieerzeugungsanlagen zu ermitteln.

Die personenbezogene Datenhaltung beinhaltet alle Daten, welche im Zuge des Tools für den Austausch mit dem Anwender benötigt, erfasst oder berechnet werden. Dazu zählen Benutzerdaten, Kopien der gebäudebezogenen übergreifenden Daten, die gewonnenen Crowdsourcing Daten sowie Berechnungs- und Simulationsergebnisse.

Designkonzept (Prototyping)

Der beschriebene Crowdsourcing-Ansatz ist in vergleichbarer Form bereits in einem Forschungsprojekt (Coors, et al. 2016) umgesetzt worden. Ausgehend von der Umsetzung der funktionalen Anforderungen des Tools sind im weiteren Verlauf des Projektes die entwickelten Prototypen stetig an das prognostizierte Nutzerverhalten angepasst und um weitere Funktionalitäten ergänzt worden. Zur Steigerung der Akzeptanz beim Verbraucher ist eine Designstudie unter Berücksichtigung eines Responsive Designs erstellt worden, die für eine Nutzung auf PCs, Notebooks, Tablets oder Smartphones ausgelegt ist.

Die aktuellste Version des Tools ist unter Verwendung des Cesium Frameworks für die Visualisierung von georeferenzierten 3D-Modellen realisiert worden (siehe Abbildung 5). Die Nutzung der 3D-Gebäudemodelle in Kombination mit Karten- bzw. Luftbildinformationen steigerte sowohl die Usability (Ergonomie) als auch die Begreifbarkeit.

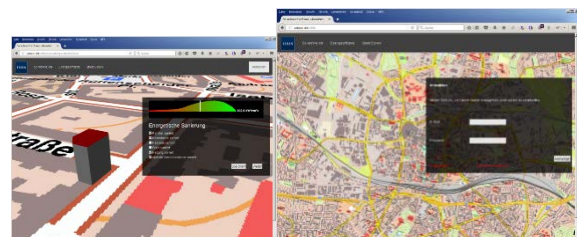


Abbildung 5: Benchmarking-Tool – Öffnungsfenster (links) und Eingabemaske (rechts) (Quelle: WeBest)

Das Tool ermöglicht die direkte Sichtbarkeit der aktuellen energetischen Gebäudesituation, der Folgen einer Änderung der Eingangsgrößen und stellt den Kontext zur Gebäudegesamtheit her. Die Auswirkungen einer Änderung, bspw. durch

Dämmmaßnahmen, kann der Verbraucher direkt in absoluten Zahlen erleben.

Der Crowdsourcing-Ansatz ist eine vielversprechende Methode zur Erhebung von gebäude- und nutzerspezifischen Informationen und soll daher in zukünftigen Forschungsprojekten weiterentwickelt werden.

STATISTISCHE ZUORDNUNG VON INFORMATIONEN

Wenn aus keiner der zuvor genannten Quellen zuverlässige Daten beschaffen werden können, können einer CityGML Datei fehlende Informationen über ein Python Script zugeordnet werden. So kann z.B. das Baujahr entweder manuell für jedes Gebäude über die GML ID zugewiesen werden, oder automatisch über eine statistische Zuordnung. Dabei werden die einzelnen Baujahre und der Anteil der Gebäude mit diesem Baujahr angegeben. Man kann sich dabei je nach Datenlage auf verschiedene Erhebungen beziehen, für deutschlandweite Statistiken etwa die des Statistischen Bundesamtes (Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2014).

DREIDIMENSIONALE VISUALISIERUNG DER ERGEBNISSE IN CESIUM

Die 3D-Visualisierung ist ein wichtiger Bestandteil einer urbanen Energiesimulation. Sie ist oft der erste Eindruck der energetischen Stadtplanung für kommunale Entscheider und kann daher wesentlich zum Erfolg und der Akzeptanz von energetischen Maßnahmen beitragen.

Cesium Virtual Globe ist ein virtueller Open Source 3D-Globus auf der Grundlage von HTML5 und der Web Graphics Library (WebGL). Er ermöglicht browserübergreifende 3D-Visualisierung von räumlichen Daten. Mit Hilfe von Cesium soll ein Prototyp für eine einfache und schnelle Visualisierung von Simulationsergebnissen entwickelt werden. Cesium ist in der Lage die Datenformate gITF, 3D Tiles, und KML zu erkennen. Für die Visualisierung in dieser Arbeit wird das 3D Tiles Format gewählt, da es dem gITF Format in Geschwindigkeit überlegen ist. Es gibt aktuell noch kein geeignetes Tool, welches frei zugänglich ist, das CityGML Daten in dieses Format konvertieren kann, daher wird hier das vom Fraunhofer Institut entwickelte Konversionstool GeoToolbox als Teil von

Georocket verwendet. GeoToolbox besteht aus einer .bat Datei, d.h. es ist kein grafisches Interface vorhanden. Im Fall, dass die CityGML ein Compound Coordinate System oder ein ähnliches, wenig gebräuchliches Koordinatensystem nutzt, kann es sein, dass die Tools zur Konvertierung diese nicht erkennen. In diesem Fall bietet es sich an, die Höhen der Gebäude von absoluten auf relative Höhen zu reduzieren. Dies ist auch für die spätere Visualisierung von Vorteil, da die Gebäude dann an die Oberfläche des Cesium Globes angepinnt sind und dort keine Anpassungen mehr vorgenommen werden müssen.

Für die Nutzung von Cesium in einer Website wird ein Server benötigt. Dieser hostet die Website und ermöglicht eine einfache Kommunikation mit der Datenbank. Ein Server der sich dafür anbietet ist Node.js. Es handelt sich um ein Open Source Produkt, das auch beim Cesium Paket bereits mitgeliefert wird.

Node.js ist ein auf JavaScript basierender Server, was eine einheitliche Programmiersprache bedeutet. Um den Server mit der Datenbank zu verbinden wird das pg-promise Paket verwendet. Nach der Installation von Node.js kann der Server über die Eingabeaufforderung in Windows gestartet werden. Die Cesium Webseite kann für eine lokale Ansicht über den Webbrowser geöffnet werden und die schon erstellten 3D Tiles werden in den 3D Globe geladen.

Im 3D Globe können nun verschiedene Attribute der CityGML Datei bzw. Informationen aus der Datenbank dargestellt werden, wie z.B. Gebäudealter und Gebäudenutzung sowie Ergebnisse der SimStadt Simulation (z.B. der Heizwärmebedarf).

Die Attribute der Gebäude, die bereits in den CityGML Dateien enthalten sind, werden auch nach der Konvertierung in 3D Tiles beibehalten. Um die Ergebnisse der SimStadt Simulation zu visualisieren, ist es notwendig die Ergebnisse, welche im .csv Format ausgegeben werden, über die Datenbank abzufragen. Für diesen Fall gibt es bereits ein Tool, welches es erlaubt die Ergebnisse in die vorhandene Datenbank zu speichern in der die entsprechende CityGML Datei hinterlegt ist. Um diese Ergebnisse in Cesium anzuzeigen wird über den Server eine SQL Abfrage gestartet. Anhand der Informationen, die über den Server von der Datenbank geliefert werden, können die

Gebäude mit Hilfe einer vordefinierten Skala eingefärbt werden, um die Unterschiede z.B. im Heizwärmebedarf der Gebäude anzuzeigen. Genauso können das Gebäudealter oder andere Informationen über eine Farbskala dargestellt werden.

Durch eine Auswahl eines spezifischen Gebäudes in Cesium ist es möglich, alle verfügbaren bzw. relevanten Informationen zu diesem Gebäude anzuzeigen. Dabei wird aktuell stets nur ein Wert für das jeweilige Attribut betrachtet. Es besteht aber auch die Möglichkeit, die ursprünglichen und aktualisierten Attribute zu vergleichen. Dazu ist es notwendig, eine Versionierung oder Datierung einzuführen. Diese verschiedenen Versionen werden dann simultan geladen und verglichen.

AUSBLICK

Im nächsten Schritt sollen die oben beschriebenen Methoden praktisch umgesetzt und anhand von Fallstudien validiert werden. Ein Teil davon ist die bereits beschriebene vor-Ort Begehung in zwei Testgebieten, um den Informationsgehalt der OSM Daten zu überprüfen.

Anschließend können auch weitere Datenquellen in die Datenbank integriert werden, um so eine noch höhere Anzahl Gebäude simulieren zu können sowie mögliche Alternativszenarien aufzuzeigen. Außerdem können durch eine bessere Informationslage zur Nutzung der Gebäude die in der Simulationsplattform SimStadt getroffenen Annahmen zu Zeitplänen, Lastprofilen u.a. angepasst werden und so eine erhöhte Genauigkeit der Simulationsergebnisse erreicht werden.

DANKSAGUNG

Die Arbeiten wurden im Rahmen der Projekte ENsource, WeBest und SimStadt 2.0 durchgeführt. ENsource wird gefördert durch das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg sowie dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE). Az: FEIH_ZAFH_562822.

LITERATURVERZEICHNIS

Almendros-Jiménez, Jesús M., und Antonio Becerra-Terón. „Analyzing the Tagging Quality of the Spanish OpenStreetMap.“

International Journal of Geo-Information, 09. 08 2018.

Amt für Umweltschutz., Landeshauptstadt Stuttgart. „Energiekonzept Urbanisierung der Energiewende in Stuttgart.“ 2016.

Braun, R., V. Weiler, M. Zirak, L. Dobisch, V. Coors, und U. Eicker. „Using 3D CityGML models for building simulation applications at district level.“ *International Conference on Engineering, Technology and Innovation*. Stuttgart, 2018.

Chen, Yixing, Tianzhen Hong, und Mary Ann Piette. „Automatic generation and simulation of urban building energy models based on city datasets for city-scale building retrofit analysis.“ *Applied Energy*, 2017: 323-335.

Coors, V., U. Eicker, E. Caspers, D. Monien, und A. Strzalka. „WeBest- Web-basierte Simulation des energetischen Gebäudezustands für Hauseigentümer.“ 2016.

Eicker, U., R. Nouvel, C. Schulte, J. Schumacher, und V. Coors. „3D-Stadtmodelle als Grundlage für Wärmebedarfssimulationen.“ *BauSIM 2012*. 2012. 1-7.

Eicker, U., V. Coors, R. Nouvel, K.-H. Brassel, E. Duminil, und M. Bruse. *SimStadt - Energiesimulation von Stadtquartieren. Schlussbericht*. Technische Informationsbibliothek Universitätsbibliothek Hannover, 2016.

Gabler Wirtschaftslexikon. *Definition Crowdsourcing*. 2018. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/crowdsourcing-51787/version-274938> (Zugriff am 19. 02 2018).

Geofabrik GmbH. 11. 04 2018. <http://tools.geofabrik.de/mc>.

Haklay, Mordechai. „How good is volunteered geographical information? A comparative study of OpenStreetMap and Ordnance Survey datasets.“ *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2010: 682-703.

Klöhn, L., und L. Hornuf. „Crowdinvesting in Deutschland.“ *Zeitschrift für Bankrecht und Bankwirtschaft*, 15. 08 2012: 237-266.

Landesamt für Umwelt Baden-Württemberg. *Datenschutz beim Wärmebedarf von Gebäuden.* kein Datum.
http://www.energieatlas-bw.de/waerme/waermebedarf_wohnen/berechnungsmethodik/datenschutz
(Zugriff am 02. 05 2018).

Nouvel, R., et al. „Genesis of the EnergyADE.“ *CISBAT 2015*. Lausanne, Switzerland, 2015.

Open Geospatial Consortium Inc. „Candidate OpenGIS® CityGML Implementation Specification.“ 2006.

OpenStreetMap. 11. 04 2018.
<https://www.openstreetmap.de/>.

Ramm, Frederik. *OpenStreetMap Data in Layered GIS Format*. geofabrik, 2017.

Stadler, Alexandra, Claus Nagel, Gerhard König, und Thomas H. Kolbe. „Making interoperability persistent: A 3D geo database based on CityGML.“ *Proceedings of the 3rd International Workshop on 3D Geo-Information*. Seoul, Korea, 2009.

Statistische Ämter des Bundes und der Länder. „Gebäude- und Wohnungsbestand in Deutschland.“ Hannover, 2014.

TagInfo. 15. 08 2018.
<https://taginfo.openstreetmap.org/>.

SIMULATION, VALIDATION AND OPTIMIZATION OF PCM-CHILLED CEILINGS

M. Yasin^{1,2}, E. Scheidemantel¹, F. Klinker¹ and H. Weinläder¹

¹Bavarian Center for Applied Energy Research, Würzburg, Germany

²University of Kassel, chair of building physic, Kassel, Germany

ABSTRACT

Chilled ceilings with incorporated phase change materials (PCM) are installed in the Energy Efficiency Center – the new R&D building of the ZAE Bayern in Würzburg. Since 2014 these ceilings have been subjected to extensive monitoring. Special measurements on weekends without user influence have been carried out to determine the system's performance. Simulations are an important tool to optimize the building automation system and allow the evaluation of different methods for producing the cold needed to recharge the phase change materials. This paper presents a simulation model of the monitored rooms based on the building simulation program TRNSYS. The real life data acquired by monitoring serve for the validation of the simulation model. The validated model was then used to optimize operation strategies regarding PCM regeneration, chilled ceiling construction and supply temperature of the chilled ceiling. The benchmark for the optimization is a conventional chilled ceiling.

INTRODUCTION

Since 1950s, dangerous effects on the earth like decline of sea ice, rise of sea level and increase of greenhouse gases have been observed, and are a great evidence of the undeniable global warming (Stocker 2014). The chemical composition of the atmosphere has been affected by human activity (Solomon 2007). The energy sector is responsible for two third of all anthropogenic greenhouse-gas and CO₂ emissions in the past century (Biroi 2015). Heating and cooling of buildings account for half of the world's final energy consumption. Accordingly, technologies that store heat (cold) efficiently are very important, because of their ability to increase the share of sustainable heat (cold) sources and to improve the

efficiency of thermal systems. One innovative compact thermal energy storage technology is the use of phase change materials (PCM). They can store heat (cold) with higher storage densities and fewer losses than conventional sensible heat (cold) storages (Rommel, Hauer et al. 2016).

Incorporating PCM in the building structure improves the thermal storage capabilities with minimal changes to the existing building design. PCM can be attractive for architects as it stores a great amount of latent heat in a smaller volume than conventional building elements (Kosny 2015). Earlier in 2005, Schossig investigated the passive cooling effect of microencapsulated PCM incorporated in wallboards (Schossig 2005). He found that PCM-wallboards improve the thermal comfort and reduce the cooling energy demand. Pomianowski et.al. started 2012 to investigate the PCM from the standpoint of active cooling (Pomianowski, Heiselberg et al. 2012). He tried to show how a PCM layer pasted on the lower surface of a TAB (thermally activated building element) affects the cooling capacity of the TAB. In addition, he recommended further studies regarding the passive cooling of the PCM layer with respect to indoor temperature fluctuations. Boiting and Hollenbeck have investigated a chilled ceiling with PCM pressed over pipe coils in 2013 (Boiting and Hollenbeck 2013). They estimated the passive cooling power of the chilled PCM-ceiling in steady state by a laboratory setup according to DIN 14240. They did not take the dynamic thermal behavior of the building into account, and recommended further studies for more accurate estimation of the PCM effect in the chilled ceiling. Klinker et.al 2014 investigated the dynamic behavior of prototypes of chilled PCM-panels (Klinker, Konstantinidis et al. 2014). The prototypes address the improvement of the thermal contacts between the chilled panel and the

PCM, and the pipe coil and the PCM. The combination of a low exergy cooling system (chilled ceiling) and a compact cold storage (PCM) is a promising and innovative cooling technology. To test their real life performance, the prototypes were installed in the offices of the new R&D building of ZAE Bayern in Würzburg, the Energy Efficiency Center, which was constructed 2013 for demonstration purposes of innovative cooling, heating and ventilation technologies (Weinläder, Klinker et al. 2015). These monitoring data are the basis to validate simulation models for further studies. The EEC is a lightweight structure with the purpose of minimizing grey energy (embedded energy) (Lang, Rampp et al. 2014). The installed chilled PCM-ceilings increase the thermal mass of the building, thus shifting cooling loads into the night and buffering the cooling peak loads by melting the PCM in the ceilings. Several offices were extensively equipped with temperature sensors, heat flux sensors and heat meters for the purpose of the monitoring (Konstantinidis, Klinker et al. 2014).

In this paper, a model of one of these monitored office rooms with chilled PCM-ceilings is created using the program TRNSYS and further validated with monitoring data. Then, the validated model is utilized to optimize the operation modes of the chilled ceiling. The geometrical and structural room model is described by TRNSYS type 56. The PCM is implemented by TRNSYS type 399, which had been developed in 2013 by Prof. Dentel et. al and combines the passive and active operation mode of a TAB system including PCM.

VALIDATION OF THE ROOM MODEL (YASIN, KLINKER ET AL. 2018)

The PCM-chilled ceiling is a modified conventional chilled ceiling with macroencapsulated PCM in aluminum cases on top of the water pipes. A graphite layer ensures a good thermal contact between the metal sheet of the ceiling, the water pipes and the PCM. The aluminum containers (CSM modules) are a product of Rubitherm Technologies GmbH and are filled with the salt hydrate SP22 which exhibits a melting range between 22 °C to 24 °C and a total heat storage capacity of 150 kJ/kg (0.041 kWh/kg). Every chilled ceiling panel has five CSM modules with 2 kg PCM each pressed on the graphite layer. The total heat storage capacity of the PCM-

chilled ceiling is about 5 kWh. The PCM-chilled ceiling is illustrated in Figure 1 with dimensional and technical information's.

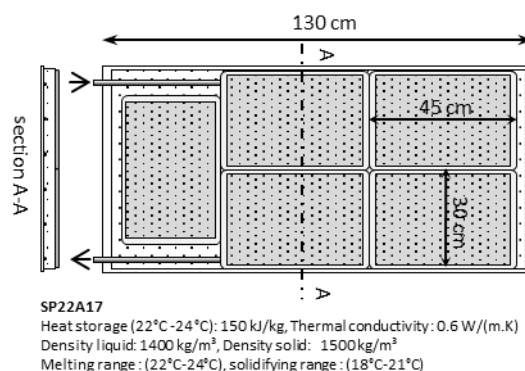


Figure 1: the PCM-chilled ceiling with technical information

The validation of the room model with the PCM-chilled ceiling consists of the following steps:

- Development of an equivalent cross section of the PCM-chilled ceiling that meets the requirements of type 399.
- Experimental measurement for identification of unknown contact resistances in the ceiling construction.
- Simulation of the PCM behavior with type 399.
- Set up the complete simulation model (office room plus PCM-chilled ceiling) and application of boundary conditions according to monitoring data.

Development of the equivalent cross section

The 3D transient heat transfer problem in the TABs can be analytically reduced to a 1D problem (Koschenz, Lehmann et al. 2000) under marginal constraints to the mass flow rate and the dimension of the cross section. In the latter, the thickness of layer around the pipe coil is not allowed to be too small in comparison to the distance between the pipes ($d_i/d_x > 0.3$). The constructional comparability allows to model the PCM-chilled ceiling as a TAB using type 399 by definition of the equivalent cross-section which fulfills the dimensional constraints of the type while providing identical thermal properties as the real cross section (Figure 2). The thermal conductivity and the density were consequently adjusted in a way, that the transient heat transfer through this layer remains the same.

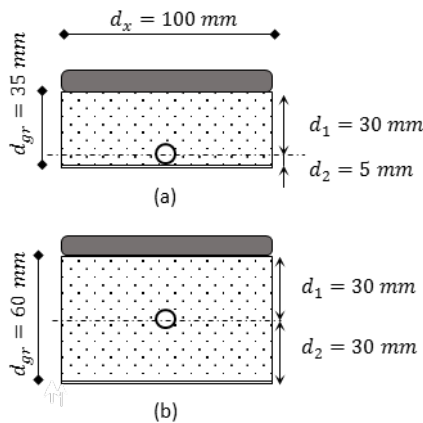


Figure 2: the original (a) and equivalent cross-section (b)

Further studies for the obtained cross-section in the finite element method program FlexPDE revealed that the heat flux was much larger as the monitoring data of the PCM-chilled ceiling indicated (assuming ideal contacts between the materials). Experiences in the field of thermal analysis and PCM macroencapsulations ascribe that deviation to the thermal contact resistances between the layers and an air gap in the CSM cases as depicted in Figure 3. Thermal resistances are described as air gaps in accordance with type 399, which allows the user to add the contact resistances as layers between the original one. However, type 399 does not allow the user to put an air gap around the pipe coil. Therefore, the contact resistance between the pipe coil and the graphite layer was expressed as a reduced thermal conductivity of the pipe coil itself. In addition to the thermal contact resistances, the CSM case has a varying air gap according to the state of the PCM, which, due to volumetric change, exhibit different thicknesses in the liquid state compared to the solid state. The aluminium resistance is neglected because of its very small value and its small thickness in comparison with the other layers. The added thermal contact resistances, the air gap in the CSM case and the unknown contact resistance between the pipe coil and the graphite need to be determined. This task was accomplished by an experimental measurement. Under the defined boundary conditions of the measurement setup in the steady state and the knowledge of the relationships of the thermal resistances in the passive and active case of the PCM-chilled ceiling, the unknowns can be determined as described in the following.

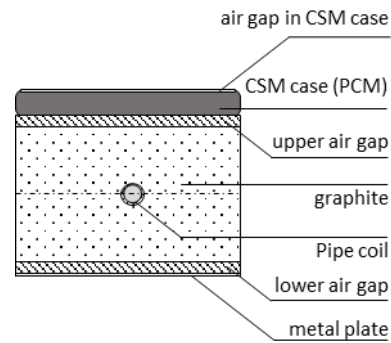


Figure 3: contact thermal resistances in the equivalent section

Experimental measurement setup

A metering box was built in ZAE Würzburg in the scope of a project funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy for metering a large scale PCM objects (PCM-Metro 2016). A cross-section of the insulated test box (1 m x 2 m x 0.5 m) is illustrated in Figure 4 with the positions of the sensors on the PCM-chilled panel. In the centered position (1) of the CSM cases (1, 3 and 4), the upper and lower CSM case temperature as well as the heat flux under the CSM case are measured. In position (2) the metal sheet (ceiling surface) temperature is measured. The Heat flux meter attached to the upper tempered plate measures the heat flux at the upper side of the chilled ceiling. The supply and return temperature of the chilled ceiling, and the mass flow rate were also detected. For determining the unknowns of the equivalent cross-section, a passive (mass flow rate in the chilled ceiling panel = 0) and active (mass flow rate = 290 kg/h) experiment were made.

Experimental set up in passive case

The passive case was used to estimate the overall thermal resistance ($R_{\text{plate-CSM-o}}$) of the PCM-chilled ceiling and to determine the thickness of the air gaps in the CSM cases ($d_{\text{ag_CSM}}$) in liquid and solid state of the PCM material. These unknowns were determined using the equation of heat transfer in steady state and the equivalent resistance network (compare Figure 5 (a)). The results from this experimental case are listed in the Table 1.

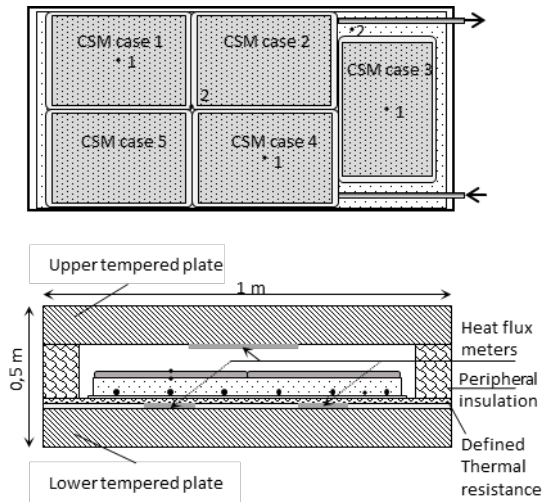


Figure 4: the metering box with the positions of the sensors

Table 1: results of the passive experimental set up

	solid state	liquid state	average
d_{ag_CSM} [m]	$0.16 \cdot 10^{-3}$	$0.4 \cdot 10^{-3}$	$0.28 \cdot 10^{-3}$
$R_{plate-CSM-o}$ [$m^2 \cdot K/W$]	$63.1 \cdot 10^{-3}$	$67.4 \cdot 10^{-3}$	$65.2 \cdot 10^{-3}$

During real life operation, the PCM chilled ceiling undergoes solid as well as liquid state. Therefore, in the room model validation, the average value of $0.28 \cdot 10^{-3}$ m is the adequate value to use.

Experimental set up in active case

The active case was used to determine the three remaining unknown resistances: the upper air gap (R_{ag_o}), the lower air gap (R_{ag_u}) and the thermal conductivity of the pipe coil (λ_r). The effective

area of the chilled panel (A_{eff}) was also determined. With knowledge of the thermal resistance equations, its relationships in the steady state according to the Koschenz model (Koschenz, Lehmann et al. 2000) and using the measured experimental boundary conditions, the four unknown parameters were determined as listed in Table 2.

Koschenz model breaks the triangle thermal resistances network in a star network by adding a fictive temperature ϑ_k - the so called core temperature - and the thermal resistance R_x . This way, the heat flux from the upper and lower side can then be calculated from the supply temperature ϑ_{vl} by the definition of the thermal resistances along and through the pipe coil R_z , R_w and R_r , as shown in Figure 5.

Table 2: results of the active experimental set up

R_{ag_o}	R_{ag_u}	λ_r	A_{eff}
[m]	[m]	[W/m/K]	[m^2]
$0.75 \cdot 10^{-3}$	$0.13 \cdot 10^{-3}$	0.14	0.621

Simulating the PCM behavior with the type 399

In type 399 the enthalpy method is used to simulate the PCM effect with the capability of integrating a hysteresis by using two different curves: one for melting and one for solidifying (Figure 6). When the PCM temperature exceeds the upper temperature limit of the melting process $T_{up,m}$ the model switches to the solidifying process. And when it falls below the lower temperature limit of the solidifying process $T_{low,c}$ the model switches to the melting curve.

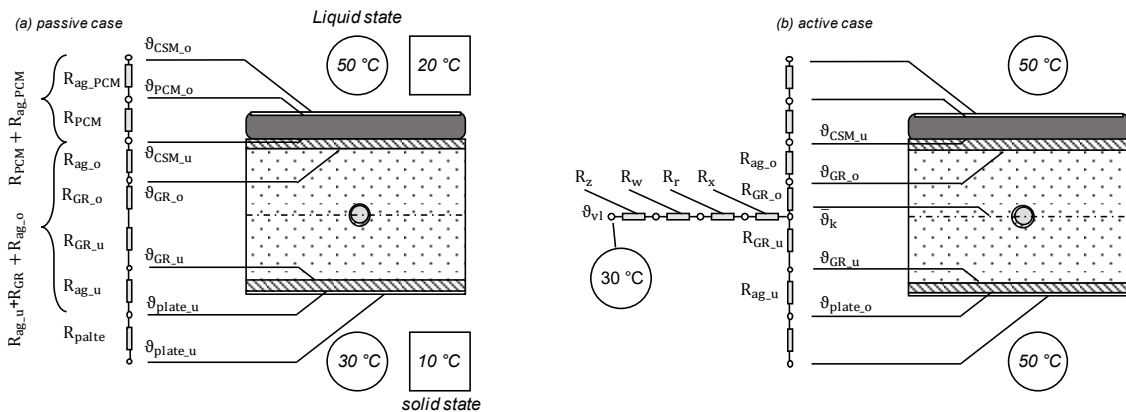


Figure 5: the thermal resistance network in the passive and active case with the boundary conditions

As long as the PCM temperature varies up and down between the two temperature limits, the model uses the selected curve without changing it. This behavior may not match the real PCM behavior and is subject to actual research, e.g. Delcroix et al. (Delcroix, Kummert et al. 2015) research which course the PCM takes when it switches from melting to solidifying or vice versa when not reaching the temperature limit.

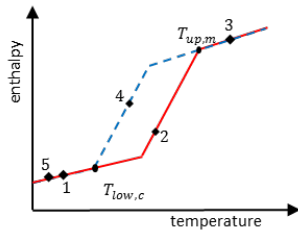


Figure 6: switching between the cooling and heating curves as the type 399 assumes

Supercooling is not considered in type 399, while the SP22 used in the chilled ceilings shows a supercooling effect of 1 °C to 1.5 °C according to the monitoring data in the EEC. However, the supercooling does not take place unless the PCM is completely liquid, which happens only on 15 % of the days during the cooling period in the EEC—even if high internal heat gains are present – as Weinlaeder et.al. have shown from the monitoring data of the chilled PCM-ceiling in the EEC (Weinläder, Klinker et al. 2017). The PCM melting and solidifying curves of the manufacturer show a different behavior of what ZAE Bayern has measured with a T-history measurement setup for typical building boundary condition concerning temperatures and heat fluxes. Obviously, the boundary conditions of the measurement affect the shape of the curves. Since the setup of ZAE Bayern is closest to real life conditions this measurement was used for the validation (Figure 7).

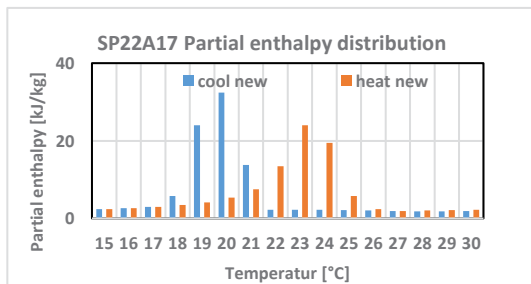


Figure 7: the new heating and cooling PCM curves

Validating results of the room model with the monitoring data

The monitoring data of two weeks in summer, when special measurements at the weekends took place, was used for the validation. The validated parameters were the operative temperature, the metal sheet temperature, the wall temperature, the average temperatures of the lower side of the CSM cases and the average temperatures of the upper side of the CSM cases. The indicator for the quality of the simulation are the root mean squared error RMSE and the relative root mean squared error rel.RMSE as described by the following equations:

$$SS_{tot} = (M_i - \bar{M})^2 \quad \text{Eq. 1}$$

$$SS_{res} = (S_i - M_i)^2 \quad \text{Eq. 2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{SS_{res}}{n}} \quad \text{Eq. 3}$$

$$rel. RMSE = \sqrt{\frac{SS_{res}/n}{SS_{tot}/n}} \quad \text{Eq. 4}$$

M_i : value of the measurement results at the i-th time step

\bar{M} : average value of the measurement results

S_i : value of the simulation results at the i-th time step

n: number of the time steps in the evaluation

The relative root mean squared error give the ratio of RMSE to the standard deviation of the monitoring data. Therefore, it gives an indicator of the simulation quality (0 for identical curves).

Table 3: results of the room model validation

Parameter	RMSE [± unit]	rel. RMSE
Operative temperature	±0.276 °C	0.189
Plate temperature	±0.263 °C	0.121
wall temperature	±0.221 °C	0.174
average temperatures of the lower side of the CSM cases	±0.579 °C	0.304
the average temperatures of the upper side of the CSM cases	±0.524 °C	0.283
The cooling power of the PCM-chilled ceiling	±0.187 kW	0.276

The listed results in the Table 3 show, that the operative, metal sheet and wall temperatures provide good agreement with the monitoring data. The mean sum square error varied between ± 0.221 °C to ± 0.276 °C. The upper and lower temperatures of CSM cases provide less agreement.

OPTIMIZATION

For the optimization, a central room model was used according to Hauser (Hauser 1976). It consists of north and south offices with a corridor in between. The rooms are located in the center of the building. The room boundaries therefore can be presumed adiabatic. In this paper, both rooms have the same validated room model. The central room model gives an average estimation of the thermal behaviour of an office building without simulating the whole building. The test reference year of Wuerzburg was taken as basis for the optimization.

Control strategy of the room's model

Figure 8 shows the cooling set temperature of the room air during day and night. The PCM melts during the day, cools the room passively while absorbing the heat. In the night the PCM is actively regenerated with cold water as long as the room temperature is over 19.5 °C in the time interval from 22:00 to 06:00 in the morning. Table 4 shows the important control strategies in the TRNSYS room model. The behavior of the PCM changes during the day according to the heat loads in the room. In the DIN EN 18599, three patterns of heat gain (low, moderate and high) are defined. The high heat gain profile (high occupancy) was used in order to illustrate the PCM behavior in the optimization scenarios.

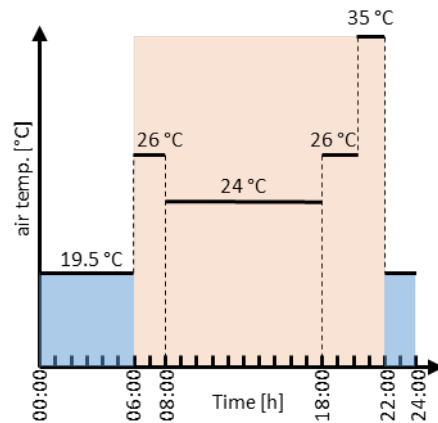


Figure 8: the set temperature profile

Table 5 lists values, which quantify the impacts of the optimization. The results concern the southern room as it the critical room usually.

Table 5: important terms for the optimization

Q_{passive}	The passive cooling energy of the chilled ceiling during the day, which equals to the absorbed heat by the PCM in the chilled ceiling while the chilled ceiling is off.
$Q_{\text{active-day}}$	The active cooling energy of the chilled ceiling during the day, which equals to the absorbed heat by the fluid (water) in the chilled ceiling, while the chilled ceiling is on.
$Q_{\text{active-night}}$	The active cooling energy of the chilled ceiling during the night (regeneration time), which equals to the absorbed heat by the fluid (water) in the chilled ceiling, while the chilled ceiling is on.

Table 4: the control strategy of the room model in TRNSYS

Controlled item	monitored parameter	Control strategy
Sun shading	<ul style="list-style-type: none"> - I_{tot} : Global radiation on the southern façade - θ_{out} : Outside temperature 	<ul style="list-style-type: none"> - $\theta_{\text{out}} > 8$ °C - $I_{\text{tot}} > 140$ W/m²: shading reduces transmitted radiation by 70% - $I_{\text{tot}} < 120$ W/m²: shading opens
Chilled ceiling	Room air temperature θ_{air}	<ul style="list-style-type: none"> - Heating: $\theta_{\text{vi}} = 39$ °C (supply temperature) - Cooling: $\theta_{\text{vi}} = 16.25$ °C (supply temperature) - $m = 50$ kg/(h.m²) (supply specific flow rate)
Lighting system	Illuminance E from the daylight	<ul style="list-style-type: none"> - $E < 500$ lx: artificial lighting is proportional to the lack to the 500 lx - $E > 500$ lx: artificial lighting off

The optimization addresses the following points:

Construction of the PCM-chilled ceiling

At first, the effect of an insulation layer on the top of the CSM cases is investigated. The insulation reduces the heat gains from the room-averted side of the chilled ceiling during regeneration. And increase the passive cooling in contrary during the day. The investigation reveals that the insulation lead to better utilization of the PCM and less regeneration cooling energy (compare Figure 9). For the following optimizations, the insulated PCM-chilled ceiling will be used.

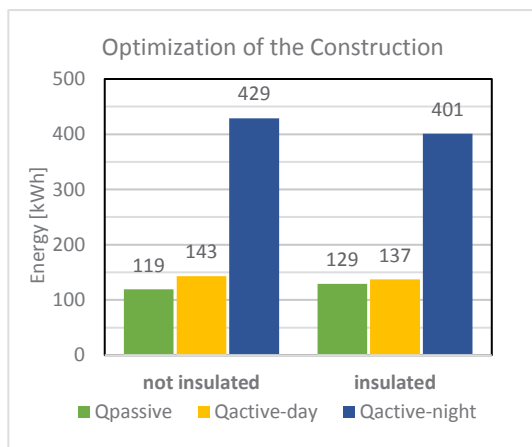


Figure 9: optimization of the construction

The supply temperature of the chilled ceiling

The active cooling power of the chilled ceiling depends on the supply temperature of the inlet water. This temperature was varied in order to investigate the effect on the PCM behavior. Figure 10 shows the difference between the supply temperature of 16.25 °C and 18.25 °C. The huge difference in the passive and active cooling energy (night) between 16.25 °C und 18.25 °C is due to type 399 and how it simulate the PCM behavior. At a supply temperature of 18.25 °C the PCM temperature does not fall below the lower solidifying temperature ($T_{low,c} = 18,9 \text{ °C}$) and hence stays on the solidifying curve. With its melting peak temperature of 20 °C it then provides more passive cooling energy and need less active energy at the night. At a supply temperature of 16.25 °C the PCM stays on the melting curve with a melting peak temperature of 23 °C. As a result, the supply temperature 18.25 °C leads to a better performance compared to 16.25 °C if the PCM

behaves as type 399 assumes with its switching between two curves.

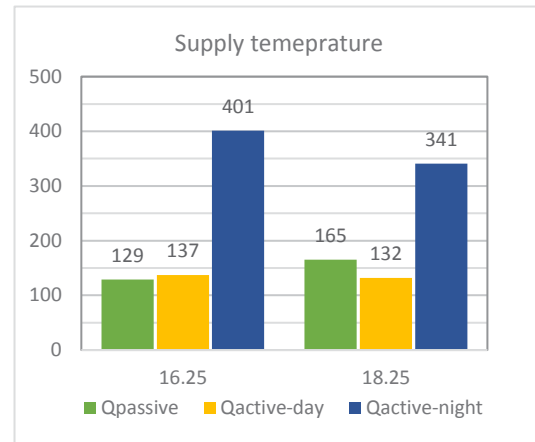


Figure 10: optimization of the supply temperature

Regeneration time of the PCM

Initially, the regeneration during the night cools down the PCM and the room and stays on until the room temperature falls below 19.5 °C. This leads to unnecessarily high cooling demands especially when no or only short PCM regeneration times are needed. The control strategy can be optimized by varying the regeneration time. In order to investigate the effect the regeneration time will be varied from 8 hours to 2 hours before 06:00 AM. The results are compared with a conventional chilled ceiling without PCM. As Figure 11 shows, the PCM-chilled ceiling shifts part from the cooling energy into the night (reduction of Qactive-day for longer regeneration times). As a result, the ceiling needs more cooling energy for the regeneration in the night (increase in Qactive-night).

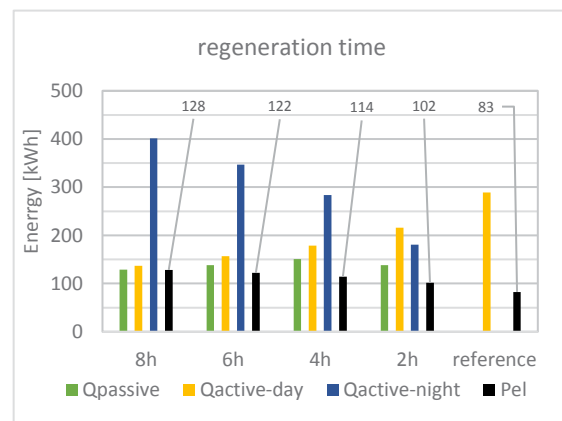


Figure 11: optimization of the regeneration time

Without regeneration, the PCM cannot shift the load into the night and does not enable the production of cold in the night, where renewable cold production is widely available. An innovative cold production technology PINC (Passive Infrared Night Cooling) achieve high COPs of more than 16 (Weismann, Klinker et al. 2016), which supplies as a renewable system an sufficient cooling comparable to conventional water chiller. In order to assess the importance of load shifting, we calculate the required electrical energy P_{el} of the cold production assuming that the COP during the day 3.5 and during the night 4.5. As Figure 11 illustrates, the scenario with 2 hours regeneration needs the lowest electrical energy of 102 kWh. The reference scenario may reveal a better results, with the assumption of a conventional cold production in the night. But with innovative cold production (e.g. PINC) the PCM cooling ceiling could represent a sustainable cooling system with efficient cold storage in the future.

CONCLUSION

In this paper an innovative PCM-chilled ceiling was installed and monitored in the Energy Efficiency Center – a living lab and the new R&D building of the ZAE Bayern in Würzburg. These innovative ceiling has undergone an extensive monitoring since 2014. The monitoring data was used to validate a room model in TRNSYS. The PCM behavior was simulated using the type 399, which simulates TABs. The PCM-chilled ceiling is comparable with TABs and could be simulated after definition of an equivalent cross-section which meets the type 399 requirements. A laboratory experimental set up was used to determine the equivalent cross-section which, in return, facilitated the validation of a room model with monitoring data. The validated room model enabled the building of a central office room model for optimization scenarios of the PCM-chilled ceiling. The optimization addresses the ceiling construction, the supply temperature of the inlet water, and the regeneration time. The result is that the insulated PCM-chilled ceiling with supply temperature of 18.25 °C and a regeneration time of 2 hours provides a good combination for good utilization of the PCM and less energy consumption in night and day.

For a more realistic PCM behavior and better PCM-chilled ceiling models, it is recommended to

simulate the PCM behavior in TRNSYS as Delcroix et.al. in (Delcroix, Kummert et al. 2015) displayed. As TRNSYS is a flexible simulation program for simulating a wide range of HVAC systems, it is recommended to simulate the PINC system and the conventional system in order to make an overall assessment on the cold production level and a cost-benefit analysis for the entire cooling system.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy because of a decision of the German Bundestag within the frame of the research project MoniResearch (funding code: 03ET1245A).

REFERENCES

- Biol, F. (2015). Energy and climate change - World Energy Outlook Special Report. Paris, France, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA): 200.
- Boiting, B. and P. Hollenbeck (2013). "PCM-Kühldecken." HLH Klimatechnik **64**: 4.
- Delcroix, B., M. Kummert and A. Daoud (2015). "Thermal behavior mapping of a phase change material between the heating and cooling enthalpy-temperature curves" Energy Procedia **78**: 5.
- Hauser, G. (1976). Rechnerische Vorherbestimmung des Wärmeverhaltens grosser Bauten, Universität Stuttgart.
- Klinker, F., C. V. Konstantinidis, H. mehling and H. weinlaeder (2014). Dynamic Thermal Behaviour of Two Newly Developed PCM Cooling Ceiling Prototypes International Solar Energy Society EuroSun 2014, Aix-les-Bains (France).
- Konstantinidis, C. V., F. Klinker and H. Weinlaeder (2014). Measurements of the performance of the room integrated PCM in the new Energy Efficiency Center. EuroSun 2014, Aix-les-Bains, France, International Solar Energy Society (ISES).
- Koschenz, M., B. Lehmann, Schweiz Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Rationelle Energienutzung in Gebäuden and Zentrum für Energie und Nachhaltigkeit im Bauwesen (2000).

Thermoaktive Bauteilsysteme tabs. Dübendorf, EMPA Dübendorf, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Zentrum für Energie und Nachhaltigkeit ZEN.

Kosny, J. (2015). PCM-Enhanced Building Components, Springer International Publishing.

Lang, W., T. Rampp and H.-P. Ebert (2014). The Energy Efficiency Center of the Center for Applied Energy Research Wuerzburg. 30th International PLEA Conference: SUSTAINABLE HABITAT FOR DEVELOPING SOCIETIES, Ahmedabad, CEPT UNIVERSITY PRESS, Centre for Documentation & Publications CEPT University, Kasturbhai Lalbhai Campus, University Road, Navrangpura, Ahmedabad 380009, Gujarat, India.

PCM-Metro (2016). Entwicklung enier Messmethodik zur thermischen Charakterisierung von PCM-Wärmespeicherkomponenten. Germany.

Pomianowski, M., P. Heiselberg and R. Lund Jensen (2012). "Dynamic heat storage and cooling capacity of a concrete deck with PCM and thermally activated building system." Energy and Buildings **53**: 11.

Rommel, M., A. Hauer and W. Van Helden (2016). "IEA SHC Task 42 / ECES Annex 29, Compact thermal energy storage." Energy Procedia **91**: 4.

Schossig, P. (2005). Mikroverkapselte Phasenwechselmaterialien in Wandverbundsystem. Dr.-Ing., Unversität Karlsruhe.

Solomon, S. (2007). Climate change 2007 : the physical science basis : contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge ; New York, Cambridge University Press.

Stocker, T. (2014). Climate change 2013 : the physical science basis : Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York, Cambridge University Press.

Weinläder, H., F. Klinker and M. Yasin (2015). "PCM cooling ceilings in the Energy Efficiency Center—passive cooling potential of two different system designs." Energy and Buildings **119**: 7.

Weinläder, H., F. Klinker and M. Yasin (2017). "PCM cooling ceilings in the Energy Efficiency Center – Regeneration behaviour of two different system designs." Energy and Buildings **156**: 7.

Weismann, S., F. Klinker, H. weinläder and D. Büttner (2016). Energy efficient building cooling by combining a regenerative cooling system, a large TES and a phase change material cooling ceiling International Solar Energy Society - EuroSun 2016, Palma de Mallorca (Spain).

Yasin, M., F. Klinker and H. weinläder (2018). "Simulation and Validation of a PCM-chilled ceiling using Type 399 in TRNSYS (**submitted**)."
Energy and Building.

DIN V 18599 " Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung" , DIN V 18599 :2016-10.

"BIM" ALS GRUNDLAGE FÜR GEBÄUDE- UND ANLAGENSIMULATIONEN - ZUSAMMENARBEIT AM DIGITALEN BAUWERKSMODELL

M. Zwahlen¹, M. Frey¹, J. Loux¹ und D. Akeret¹

¹ Gruner Roschi AG, Bauklimatik & Simulationen, Köniz, Schweiz

KURZFASSUNG

Am Neubauprojekt eines Spitalkomplexes in Zürich, welches aus zwei Gebäuden mit insgesamt mehr als 2'200 Einzelräumen besteht, wurde als Praxisbeispiel eine umfangreiche thermisch-energetische Gebäudesimulation durchgeführt. Hierfür wurde in der Simulationssoftware IDA-ICE ein digitaler Zwilling der geplanten Gebäude erstellt, welcher aus total über 1'700 thermisch-energetisch gekoppelten Einzelzonen bestand. Als Grundlage diente ein parametrisiertes 3D-Datenmodell, basierend auf einem IFC-Modell des Architekten.

Die BIM-Methode, bzw. die Nutzung des IFC-Modells zur geometrischen Erstellung des Simulationsmodells im IDA-ICE, ermöglichte eine aussergewöhnlich detaillierte und zeiteffiziente Modellierung der beiden Gebäude. Dadurch konnten raumscharfe Aussagen betreffend Heiz- und Kühlleistungsbedarf, Raumluftqualität sowie thermischer und visueller Behaglichkeit simuliert und dem Planungsteam kommuniziert werden.

ABSTRACT

A comprehensive thermal-energetic building simulation was carried out as a practical example on the new construction project of a hospital complex in Zurich, consisting of two buildings with more than 2,200 individual rooms. For this purpose, a digital twin of the planned buildings, which included over 1,700 thermally and energetically coupled individual zones, was used in the simulation software IDA-ICE. The BIM method, or the use of the IFC model to create the geometry of the simulation model in IDA-ICE, enabled an exceptionally detailed and time-efficient modelling of both buildings. This made it possible to simulate and communicate precise results regarding heating and cooling capacity require-

ments, room air quality and thermal and visual comfort.

EINLEITUNG

In Zürich wird ein Neubau des Kinderspitals geplant, welcher 2022 bezogen werden soll (Abbildung 1). Architektonisch werden die beiden Gebäude (Akutspital und Labor Lehre Forschung) von Herzog & de Meuron geplant, wobei die Generalplanung bei der Gruner AG und die Planung der Gebäudetechnik bei der Gruner Gruneko AG liegt. Zur Auslegung der Heiz- und Kühlleistung pro Raum, pro Gebäude und über das ganze Areal wurde mit der Software IDA-ICE eine umfassende thermisch-energetische Simulationsstudie durchgeführt. Die Simulationsstudie wurde in enger Zusammenarbeit mit den Architekten und den Gebäudetechnikplanern in den "open BIM-Prozess" integriert. Dieses Paper soll besonders den Ablauf eines Simulationsprojektes aus der Praxis mit BIM erläutern. Auf die Durchführung, bzw. Parametrisierung der Gebäudesimulation wird nicht eingegangen.

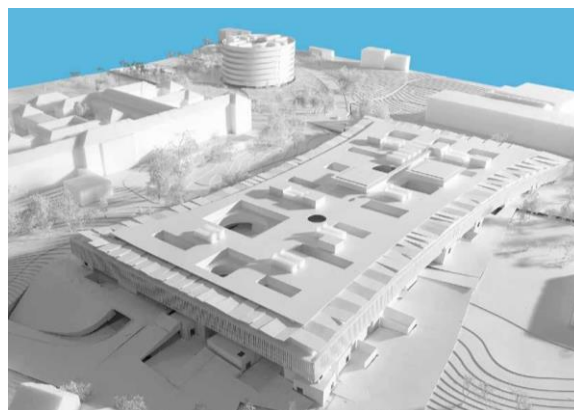


Abbildung 1: Arealübersicht, vorne das Akutspital und hinten das runde Gebäude "Labor Lehre Forschung" (© Herzog & de Meuron)

METHODE

Beim vorliegenden Projekt wurde die Gebäude- und Raumgeometrie nicht im IDA-ICE erstellt, sondern über das IFC-Modell importiert. Damit die Geometrie mit allen Objekttypen und deren Informationen eingelesen werden kann, bedarf es einer umfangreichen Aufbereitung des IFC-Modells. In Abbildung 2 ist eine Gesamtübersicht der verwendeten Software Applikationen und deren Reihenfolge ersichtlich. In den folgenden Abschnitten wird vom Preprocessing bis zum Postprocessing auf die wichtigsten Schritte eingegangen.

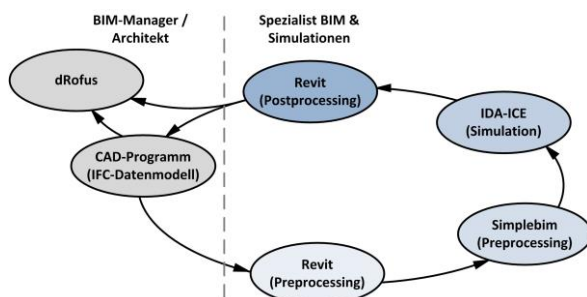


Abbildung 2: Übersicht BIM-Ablauf vom Preprocessing bis zum Postprocessing eines Simulationsprojektes

Preprocessing

Das geometrische IFC-Modell (Version 2x3) des Architekten wird im ersten Schritt der Level of Geometrie (LOG) sowie der Level of Information (LOI) in der Software Revit (Autodesk) importiert, nicht verknüpft. Nach dem Import wird die Raumgeometrie (Objekttyp: IFC-Spaces) analysiert und falls nötig geometrisch nachbearbeitet. Ziel ist es, dass alle Architektur-Räume in Revit korrekt erkannt werden, d.h. die Namen, Geometrie und Flächen stimmen und diese mit den Nutzungsprofilen zur Dokumentation der Simulationsrandbedingungen sowie zur Übergabe an das Simulationsmodell genutzt werden können.

Als nächster Schritt erfolgt die Datenaggregation der IFC-Spaces. Basierend auf dem geometrisch bereinigten IFC-Modell können bis zu 250 weitere alphanumerische Informationen wie z.B. Regelungswerte, Nutzungsprofile, Materialisierung und Bauteilkonstruktionen sowie gebäudetechnische Einbauten als Simulationsrandbedingungen definiert und für Dokumentationszwecke im digitalen Gebäudemodell hinterlegt werden. Dieser zusätzliche Informationsgehalt

wird entweder direkt in Revit oder über ein Dritthersteller-Plugin (BIM-One), das den Funktionsumfang von Revit um weitere Import- und Exportfunktion für Microsoft Excel erweitert, eingegeben.

In den aktuellen Projekten werden den Raumvolumen u.a. folgende Informationen über die BIM-One Raumlisen angefügt:

- Raumnutzungstyp
- interne Lasten (Personen, Geräte, Kunstlicht)
- Raumsolltemperaturen (Sommer, Winter)
- Lüftungsanlage
- Zuluft- und Abluftvolumenstrom

Im Revit lassen sich diese Rauminformationen/Parameter im Grundriss farblich darstellen, was eine detaillierte und effiziente Kontrolle ermöglicht (siehe Abbildung 3).

Die eingefärbten Grundrisse unterstützen ebenfalls eine durchgängige Dokumentation der Simulationsgrundlagen, was ausgesprochen wichtig ist.



Abbildung 3: Grundriss 2. OG, mit eingefärbter Raumnutzung

Sind alle gewünschten Informationen im Revit-Modell integriert, werden (falls erwünscht) die Räume zur Simulation zusammengefasst. Dieser Schritt ist projektspezifisch und fakultativ, weil es erst ab einer gewissen Modellgröße sinnvoll wird, die Anzahl Räume zu verkleinern. Ausschlaggebend für diesen Schritt ist die Software IDA-ICE, welche - aus eigenen Erfahrungen - für eine angenehme Bearbeitung nur eine Modellgröße von maximal 350 Zonen zulässt. Beim Akutspital wird deshalb das Gebäude pro Geschoss horizontal geschnitten, damit im IDA-ICE pro Geschoss ein Modell simuliert werden kann. Zur Zusammenfassung der Räume zur Simulation müssen u.a. die Raumnutzung, die Lüftungsanlage, der Fensterflächenanteil und deren Fassadenausrichtung identisch sein. Ba-

sierend auf diesen Kriterien konnten am Beispiel des 2. Obergeschosses vom Akutspital die rund 650 Räume auf 300 Simulationszonen reduziert werden. Ein grosser Vorteil von Revit ist, dass durch die Veränderung der „Phase“ in Revit die Raumzugehörigkeit auch bei der Raumzusammenfassung erhalten bleibt. Dies ermöglicht einen durchgängigen Prozess für das Einpflegen der Simulationsresultate. Auf dieses Thema wird im Abschnitt Postprocessing vertiefter eingegangen.

Das bearbeitete IFC-Modell mit den zusammengefassten Räumen kann aus Revit exportiert werden. Bevor das Modell in IDA-ICE importiert wird, lohnt es sich, das Modell in der Software Simplebim (Datacubist) zu analysieren und, wenn nötig, zu bereinigen. Hierzu wird die IFC-Datei in Simplebim importiert und mit dem herstellereitig mitgelieferten IDA-ICE-Template (Plugin) auf die enthaltenen Objekttypen kontrolliert. Dabei müssen für eine erfolgreiche Prüfung mindestens die `ifcObjects`, `ifcProject`, `ifcBuilding` und `ifcSite` enthalten. Zudem muss jedes Geschoss ein `ifcBuildingStorey` enthalten und mindestens aus vier Wänden bestehen. Die Wände müssen dabei einen Bezug als Aussen- oder Innenwand aufweisen. Darüber hinaus müssen alle Räume als separate `ifcSpace` definiert und das Gesamtmodell mit einem `ifcRoof`-Element abgeschlossen sein. Die Integration von Fenstern als `ifcWindows` ist wünschenswert und erhöht die Bearbeitungseffizienz, wird allerdings nicht zwingend benötigt. Simplebim erweist sich hierbei als ein ausgesprochen übersichtliches und benutzerfreundliches Tool. Mit wenig Aufwand lässt sich das IFC-Modell in kurzer Zeit in die einzelnen Bestandteile zerlegen. Ausserdem kann über das Template das IFC-Modell spezifisch auf den IDA-ICE-Import kontrolliert werden. Sind alle notwendigen Objekttypen vorhanden und richtig definiert, kann das bereinigte IFC-Modell exportiert werden.

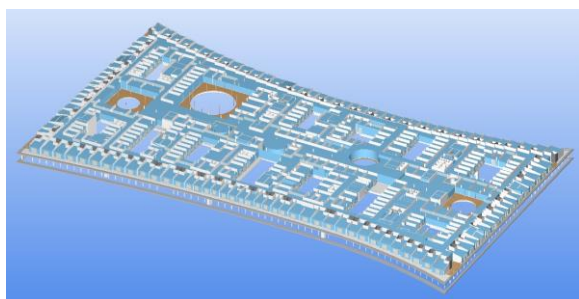


Abbildung 4: 3D-Modell vom Akutspital (2.OG) in der Softwareumgebung Simplebim

Simulation in IDA-ICE

Im IDA-ICE kann das IFC-Modell importiert werden und die IFC-Spaces mit den Raumnutzungsprofilen zugeordnet werden. Dabei können während des IFC-Importprozesses Ressourcen aus der IDA-ICE Datenbank wie z.B. Bauteilkonstruktionen, Materialeigenschaften, Fenster- und Bauteiltypen sowie Nutzungs- und Zeitprofile mit dem LOI aus Revit abgeglichen, zugeordnet und somit automatisch importiert werden. Durch die automatische Erstellung der Zonen ist das geometrische Modell (siehe Abbildung 5) in kürzester Zeit fertiggestellt. Das Parametrisieren der Zonen, wie z.B. spezifischer Zu- und Abluftvolumenstrom, kann effizient über Copy and Paste von einer Excel-Tabelle in IDA-ICE übertragen werden. U.a. folgende Parameter und Regulierungen mussten manuell eingepflegt werden:

- Klimadatensatz
- Infiltration
- Zuordnung der Bauteile / Vorgabewerte
- Wärmebrücken
- Fenster (siehe Kapitel Herausforderungen)

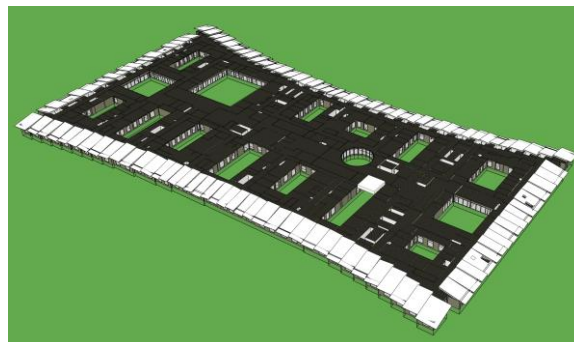


Abbildung 5: Simulationsmodell vom Akutspital (2. OG) in der Softwareumgebung IDA-ICE

Zur Auslegung der Gebäudetechnik waren in diesem Projekt besonders der Heiz- und Kühlleistungsbedarf pro Raum und der jährliche Heiz- und Kühlenergiebedarf mit dem Normwetterdatensatz nach SIA 2028 aufgrund unterschiedlicher Energienachweismodelle für die Schweizer behördliche Baueingabe wichtig. Dementsprechend wurden in IDA-ICE in der Schweizer Lokalisierung (Register "SIA") die Simulationen durchgeführt. Auf die Durchführung der Simulation wird in diesem Paper nicht weiter eingegangen, da der Fokus auf dem methodischen Modellaustausch liegt.

Postprocessing

Die Simulationsergebnisse können in IDA-ICE sowohl als Ergebnisdateien (*.prn) sowie als Excel-Export mit variablem Zeitschritt ausgegeben werden. Seit Version 4.8 ist auch ein direkter Zugriff mittels Programmierschnittstelle möglich. Einzelwerte (Minimum, Maximum, Mittelwert, Summe) können zeiteffizient als Excel-Ergebniszusammenfassung raum- und anlagen-genaue exportiert, über die BIM-One-Raumlisten in das Architekturmodell in Revit eingepflegt und den zuvor projekt-, bzw. nutzungsspezifisch definierten Properties im ifcSpace-Object zugewiesen werden. Größere Datenmengen werden über selbstgeschriebene Python-Skripte bzw. über eine BI-Software ausgewertet. Durch die parameterbasierte Einfärbung des Grundrisses können je nach Bedürfnis die Resultate dargestellt werden. In der untenstehenden *Abbildung 6* ist als Beispiel das 2. Obergeschoss des Akutspitals mit dem spezifischen Kühlleistungsbedarf pro Raum eingefärbt. Durch die Darstellung der spezifischen Werte lassen sich visuell die kritischen Räume rasch erkennen. Sind die Ergebnisse in Revit integriert, kann das komplette, mit Daten aggregierte, IFC exportiert werden.



Abbildung 6: Eingefärbter Grundriss im Revit, mit spez. Kühlleistungsbedarf pro Raum aus der Simulation

Anlagensimulation

Im Projekt wurde neben der Bedarfsermittlung anhand der thermisch-energetischen Gebäudesimulation (TEG) auch die Bedarfsdeckung mittels thermisch-energetischer Anlagensimulation untersucht. Dabei wurden mehr als 20 Lüftungsanlagen mit ihren jeweiligen thermodynamischen Komponenten modelliert. Dabei wurden aufgrund der Optimierung der Rechenperfor-

mance, wo möglich, gleiche Anlagen zu einer äquivalenten Anlage zusammengefasst.

Neben den Lüftungs- und Klimaanlage wurde auch die zentrale Wärme- und Kälteerzeugungsanlage mittels umschaltbarer Wärmepumpenkaskade mit zugehörigen Wärmequellen und Wärmesenken durch Freecooling gegen Außenluft sowie über ein Erdwärmesondenfeld (EWS) in zwei Detaillierungsgraden abgebildet. In einem ersten Schritt wurden die thermischen Leistungspotentiale der Wärme- und Kälteerzeugung, den Lastprofilen aus der Gebäudesimulation sowie den thermisch-energetischen Potentialen der Wärmequellen und Wärmesenken, ermittelt aus einer separaten EWS-Simulation ohne Berücksichtigung von thermischen Speichern im Stundenschritt gegenübergestellt. Dies mit dem Ziel, unter vereinfachten Annahmen eine Aussage über den zu erwartenden Endenergiebedarf für die Gebäudetechnik zu erhalten. Aufbauend auf der vereinfachten TEA wird derzeit in einem studentischen Folgeprojekt eine detaillierte TEA in der Software Polysun (Vela Solaris) durchgeführt.

RESULTATE

Simulationsergebnisse im IFC pro Raum

Das exportierte IFC-Modell aus Revit wird daraufhin im Solibri Model Checker (Nemetschek) visualisiert und mittels softwaregestützter Prüfregeln kontrolliert. Hierfür dienen Auswertungsdefinitionen, welche die IFC-Spaces ebenfalls parameterbasiert einfärbt und im 3D-Modell darstellt (siehe *Abbildung 7*). Ausserdem dient das IFC ebenfalls als Datengrundlage zum Import in eine internetbasierte dRofus-Datenbank (Nemetschek). In diesem Projekt wurden die Simulationsergebnisse pro Raum als Grundlage zur Auslegung dem Gebäudetechnikplaner übergeben, um damit den Planungskreis zu schliessen.

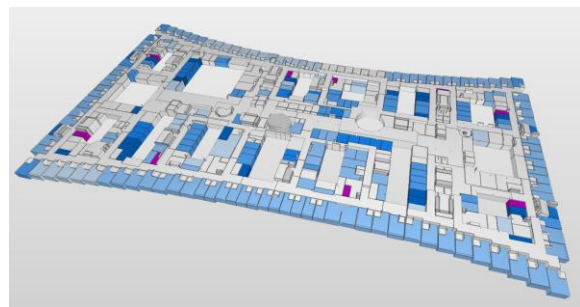


Abbildung 7: 3D-Modell im Solibri Model Checker, Visualisierung des spez. Kühlleistungsbedarf pro Raum

Übergeordnet wurden der Heiz- und Kühlleistungsbedarf, sowie der thermische Energiebedarf pro Jahr über beide Gebäude analysiert. Im nächsten Abschnitt wird auf einige Ergebnisse und deren Darstellung eingegangen.

Simulationsresultate Areal

Im Projekt wurde zusätzlich zu den Lastberechnungen für die Dimensionierung der Wärme- und Kälteübertragerflächen in den Einzelräumen eine gesamtenergetische Analyse des thermischen Leistungs- und Nutzenergiebedarfs für die zentrale Wärme- und Kälteerzeugung des Gesamtareals durchgeführt (Abbildung 8). Dabei wurde der thermische Leistungsbedarf für die Wärme in die Teilbereiche Raumwärme, Lufterhitzer in Lüftungsanlagen, Brauchwarmwasser und Leistung für den Hubschrauberlandeplatz eingeteilt. Der Leistungsbedarf für die Kälte wurde in die Kategorien Raumkälte, Luftkühler in Lüftungsanlagen, technische Kälte und Laborkälte unterteilt und ausgewertet. Diese Ergebnisse wurden als Grundlage zur Dimensionierung der zentralen Wärme- und Kälteerzeugung im Planungsteam genutzt. Die Durchführung einer thermisch energetischen Gebäude- und Anlagensimulation ermöglichte es, die Gleichzeitigkeit der einzelnen Bedarfsprofile, ausgehend vom thermischen Leistungsbedarf, auf Ebene Einzelraum und Anlage, auf Ebene Heiz- und Kühlgruppe in der Technikzentrale, sowie auf Ebene Wärme- und Kälteerzeuger zu analysieren und auszuwerten.

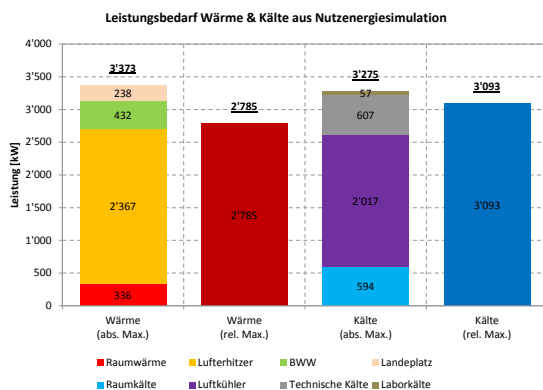


Abbildung 8: Thermischer Leistungsbedarf Wärme / Kälte für das Gesamtareal

Zur Dimensionierung der Wärmeerzeugung lag das Reduktionspotential bei ca. 17 %, bzw. 590 kW. Bei der Kälteerzeugung führte es zu einer Reduktion der Dimensionierung von ca. 6 %, bzw. ca. 180 kW. Basierend auf der untersuchten Basisvariante wird ein thermischer Nutz-

energiebedarf Wärme von ca. 5'400 MWh/a sowie Kälte von 7'900 MWh/a für den Betrieb der beiden Gebäude benötigt. Daraus resultiert ein Endenergiebedarf von ca. 400 MWh/a Gas sowie ca. 1'500 MWh/a Strom (Abbildung 9).

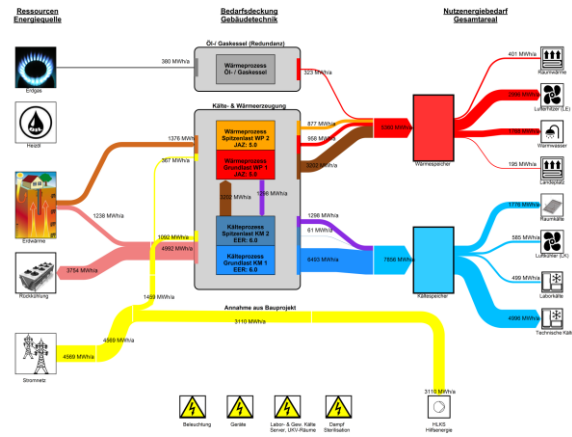


Abbildung 9: Energieflussdiagramm Nutzenergiebedarf und Deckungsgrade Endenergiebedarf

Die Optimierung dieses Reduktionspotentials ist nun Bestandteil eines Folgeprojekts und soll mittels detaillierter Anlagensimulation aller wesentlichen gebäudetechnischen Komponenten (Wärmequellen und -senken, Wärme- und Kälteerzeugung, thermische Speicher, Wärme- und Kälteverteilung), sowie der Abbildung zugehöriger Anlagen- und Gebäudeautomation weiter analysiert und optimiert werden.

**HERAUSFORDERUNGEN
BIM-METHODE UND SIMULATIONEN**

Wie im Paper ersichtlich, braucht es in einem "open BIM-Prozess" viele unterschiedliche Software Applikationen. Dies verlangt von den Projektbeteiligten ein breites Knowhow in allen notwendigen Tools. Weil das IFC-Format (noch) nicht durchgängig standardisiert ist, funktioniert der Im- bzw. Export nicht immer reibungslos. Bei vielen BIM-Projekten, wie auch beim Kinderspital, verursachen die Fenster (IFCWindows) einige Probleme. Teilweise erkennt Revit die Fenster aus dem IFC nicht korrekt, oder IDA-ICE kann diese nicht einlesen. Dies hat u.a. damit zu tun, dass die Fenster in unterschiedlichen Objektklassen (z.B. IFCWindows oder IFCPlate) modelliert werden.

Die begrenzte maximale Anzahl Simulationszonen stellt für uns im IDA-ICE eine grosse Schwierigkeit, bzw. einen erhöhten Bearbeitungsaufwand dar. Diese Begrenzung hat zur Folge, dass jedes grössere Gebäude in mehrere

Simulationsmodelle aufgeteilt und im Postprocessing wieder zusammengefügt werden muss. Ausserdem wird die Qualität der Simulation reduziert, weil durch die Aufteilung in mehrere Modelle Raumkoppelungen entfallen, oder zumindest vereinfacht modelliert werden.

Eine weitere Schwierigkeit stellt das gesamte Änderungsmanagement dar. Auch bei kleinen Änderungen, z.B. einer geometrischen Raumänderung, müssen die oben aufgeführten Schritte durchgeführt werden, was einen erheblichen Aufwand bedeutet. Deswegen ist es - wie auch bei der konventionellen Planung auf 2D-Plänen - sehr wichtig, gefrorene Modellstände im Planungsteam zu definieren, auf welche sich die Simulation bezieht.

SCHLUSSFOLGERUNG

Die thermisch-energetische Gebäudesimulation lässt sich gut in den BIM-Prozess integrieren. Hierfür sind jedoch viele zusätzliche Softwares notwendig. Im vorgestellten Projekt sind es: Revit, Simplebim, IDA-ICE und Solibri Model Checker. Der Einsatz aller Software Applikationen verlangt ein breites Know-how und erhöht damit die Anforderungen an die Projektbeteiligten. Hingegen nimmt der geometrische Modellierungsaufwand in der Simulationssoftware IDA-ICE deutlich ab, wobei der geometrische Detaillierungsgrad des Modells zunimmt. Weil die Simulationsergebnisse dadurch raumscharf kalkuliert und über das IFC-Modell an das Planungsteam übergeben werden können, steigt die Nutzbarkeit im Projekt massiv, wodurch der Einsatz von dynamischen Simulationen an Attraktivität gewinnt.

Literatur

- IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE). 2018. <https://www.equa.se/de/>. Zugriff 08/2018
- OpenBIM. 2018. <https://www.buildingsmart.org/>. Zugriff 08/2018
- BIM One. 2018. <https://www.bimone.com/en>. Zugriff 08/2018
- Autodesk Revit. 2018. <https://www.autodesk.de/>. Zugriff 08/2018
- SimpleBIM. 2018. <http://www.datacubist.com/>. Zugriff 08/2018
- dRofus. 2018. <https://www.drofus.no/en/>. Zugriff 08/2018

VI. MODELLIERUNG UND SIMULATION IM LEBENSZYKLUS VON GEBÄUDEN

MODELLPRÄDIKTIVER, NETZDIENLICHER BETRIEB VON KÄLTEANLAGEN IN SUPERMÄRKTEN

M. Bachseitz¹ und R. Koenigsdorff¹

¹ Hochschule Biberach, University of Applied Sciences, Institut für Gebäude- und Energiesysteme
 Karlstraße 11, 88400 Biberach a. d. Riß, Germany
 bachseitz@hochschule-bc.de, koenigsdorff@hochschule-bc.de
 +49(7351)582-268, +49(7351)582-255

KURZFASSUNG

Die Entwicklung von Strategien für einen netzdienlichen Betrieb strombasierter Wärme- und Kälteerzeuger durch Nutzung thermischer Speicherung ist Gegenstand aktueller Forschung. Dieser Beitrag vergleicht am Beispiel eines Supermarktes verschiedene Methoden zur prädiktiven Erstellung netzdienlicher Fahrpläne für die Kälteerzeugung. Zunächst wird auf das zugrunde gelegte Kälteversorgungskonzept des Beispielsupermarktes und die für die Kältelastvorhersage verwendeten Modelle des Gebäudes und der Kühlmöbel eingegangen. Ein damit erzeugtes Kältelastprofil über ein Jahr bildet die Grundlage für die anschließende Fahrplanerstellung. Den Abschluss bildet ein Vergleich der Ergebnisse der Methoden zur Fahrplanerstellung untereinander und mit einer herkömmlichen Basisstrategie zur Be- und Entladung thermischer Speicher anhand einer Jahresbetrachtung.

ABSTRACT

The development of grid-supportive operation strategies for electricity-based heat and cooling generators including the use of thermal storage is subject of current research. This article presents a comparison of different methods for prediction-based creation of grid-supportive operation schedules for cooling generators in a sample supermarket. First, the cooling plant concept of the sample supermarket and the models of the building and the refrigeration units used for predicting the cooling load are presented. A cooling load profile over a year generated by these models forms the basis for the subsequent creation of the operation schedule. Finally, the results of the predictive scheduling methods are compared to each other and to a conven-

tional thermal storage loading and unloading strategy through an annual analysis.

EINFÜHRUNG

Die Integration volatiler erneuerbare Energiequellen in das Stromversorgungssystem erfordert mehr Flexibilität als bisher sowohl in der Stromproduktion als auch in der Stromabnahme. Neben Batteriespeichern zur direkten Zwischenspeicherung elektrischer Energie, die derzeit noch mit hohem Material- und Investitionsaufwand verbunden sind, stehen strombasierte Wärme und Kälteerzeuger wie z. B. Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK), Wärmepumpen, elektrische Heizstäbe oder Kompressionskältemaschinen in Kombination mit thermischen Speichermöglichkeiten als Alternativen zur Verfügung. Zur Flexibilisierung der Stromproduktion bzw. -abnahme derartiger Anlagen werden geeignete Betriebsstrategien benötigt, welche Gegenstand aktueller Forschungsprojekte, z. B. (Netzreaktive Gebäude, 2018) oder (FlexControl, 2018), sind. Zum Einsatz kommen u. a. modellprädiktive Ansätze, die basierend auf Lastvorhersagen den Anlagenbetrieb im Rahmen der thermischen Speichermöglichkeiten auf die Bedürfnisse des Stromnetzes-/systems hin optimieren.

Mit einem Anteil von 16 % (AGEB, 2017) am gesamten Endenergieverbrauch Deutschlands im Jahr 2016 stellt der Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen einen Bereich mit nennenswertem Wärme- und Kältebedarf dar. Insbesondere der Subsektor des Lebensmittelgroß- und -einzelhandels ist durch einen hohen Strombedarf, der für die Bereitstellung von Kälte für Kühlräume und Kühlmöbel aufgewendet werden muss, geprägt und bietet damit grundsätzlich ein

großes Potenzial zur Flexibilisierung des Strombezugs der Kälteanlagen.

Der vorliegende Beitrag stellt hierzu Ergebnisse eines modellprädiktiven Ansatzes zur optimierten Fahrplanerstellung für den Betrieb einer indirekten Kälteanlage zur Versorgung eines typischen Supermarktes vor. Zunächst wird auf das zugrunde gelegte Kälteversorgungskonzept und die dortigen Kältespeichermöglichkeiten eingegangen. Zur Abbildung des Gebäudes wird ein detailliertes Gebäudemodell aus (Koschany, 2012) vereinfacht, in MATLAB implementiert und um ein Kühlmöbelmodell ergänzt. Anschließend wird der modellprädiktive Ansatz anhand einer Simulationsuntersuchung mit einer weiteren Methode aus (Klein et al., 2016) und mit einer herkömmlichen Basisstrategie zur Be- und Entladung thermischer Speicher verglichen, um das mit diesen Ansätzen erschließbare Potenzial zur Verschiebung des Strombezugs aufzuzeigen.

KÄLTEVERSORGUNGSKONZEPT DES SUPERMARKTES

Derzeit werden in Supermärkten üblicherweise direktverdampfende Verbundkälteanlagen eingesetzt. Diese sind aufgrund fehlender Speichermöglichkeiten für eine Flexibilisierung des Strombezugs der Kompressionskältemaschine nicht geeignet. Durch den Einsatz alternativer Kältemittel wie z. B. Propan, welche aus Sicherheitsgründen nur in kleinen Füllmengen eingesetzt werden, wird jüngst vermehrt auf kleine dezentrale Kältemaschinen in Tiefkühlmöbeln in Verbindung mit zentralen indirekten Kälteanlagen zurückgegriffen.

Das Prinzip zeigt Abbildung 1: Eine zentrale Kältemaschine stellt die benötigte Kälteenergie auf einem Temperaturniveau um 0 °C bereit. Wenn kein Wärmebedarf vorhanden ist, wird die Abwärme über ein Rückkühlwerk an die Außenluft abgegeben, andernfalls kann sie als Abwärmenutzung an das Heizsystem des Supermarktes abgegeben werden. Die Verteilung der Kälte an die einzelnen Kühlmöbel/-räume erfolgt über einen Solekreislauf. In diesen wird ein Sole- oder Eisspeicher eingebunden, welcher eine Entkopplung von Kältebereitstellung und -verbrauch ermöglicht. Dadurch werden der Betrieb der zentralen Kältemaschine und damit deren Strombezug zeitlich verschiebbar. Die Normalkühlmöbel (NK, Nutztemperaturniveau: 3 - 7 °C) können direkt über die Sole gekühlt werden. Tiefkühl-

möbel (TK) werden aufgrund des niedrigeren Betriebstemperaturniveaus von ca. -22 °C über kleine dezentrale Kältemaschinen versorgt, die ihre Abwärme wiederum an den zentralen Solekreislauf abgeben. Damit reduziert sich der Temperaturhub und Strombedarf dieser dezentralen Kältemaschinen. Deren Strombezugszeiten sind bei diesem Konzept jedoch nicht beeinflussbar. Derartige Anlagenkonzepte mit entsprechend weiterentwickelten Kühlmöbeln werden inzwischen auf dem Markt angeboten (Viessmann, 2017).

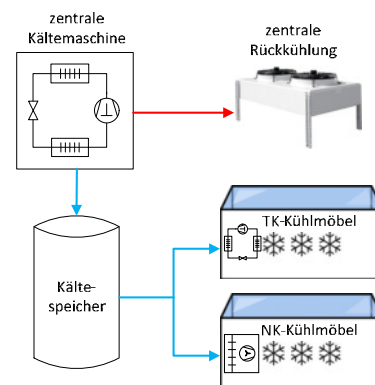


Abbildung 1: Indirekte Kälteanlage mit thermischem Speicher zur Versorgung von Kühlmöbeln in einem Supermarkt.

Mit solchen Anlagenkonzepten lässt sich ein signifikanter Teil des Strombezugs für die Kältebereitstellung z. B. mit den im Folgenden vorgestellten Methoden netzdienlich verschieben.

METHODEN ZUR MODELLPRÄDIKTIVEN FAHRPLANERSTELLUNG

Zunächst wird die von den Autoren entwickelte Methode zur prädiktiven Fahrplanerstellung mittels Optimierungsfunktion vorgestellt. Details hierzu sind (Bachseitz et al., 2018) zu entnehmen. Zum Vergleich werden eine regelbasierte Strategie mittels Greedy-Algorithmus aus (Klein et al., 2016) und eine konventionelle Basisstrategie für die Be- und Entladung thermischer Speicher herangezogen. Die Basisstrategie bildet das Verhalten eines Kälteerzeugers ab, der bei Überschreiten einer oberen Grenztemperatur im unteren Bereich des Kältespeichers mit der Kälteproduktion beginnt und den Speicher belädt, bis eine untere Grenztemperatur im oberen Bereich des Kältespeichers unterschritten wird.

Einsatz einer Optimierungsfunktion

Grundlage des für die Fahrplanerstellung verwendeten eigenen Optimierungsansatzes (Bach-

seitz et al., 2018) bilden Vorhersagen für die Nutzkältebelastung sowie für ein Anreizsignal. Letzteres gibt durch seinen Wert vor, ob zu einem Zeitpunkt Strom möglichst bezogen werden soll (Wert z. B. gleich null) oder möglichst nicht (Wert z. B. gleich eins). Die Optimierungsmethode ermöglicht es, beliebige externe Anreizsignale heranzuziehen, z. B. einen variablen Strompreis, der hier exemplarisch Verwendung findet. Für den Vorhersagezeitraum (Prädiktionshorizont) wird die Kältebelastungsvorhersage als Zählerstandkurve dargestellt. Diese Kurve gibt an, wie viel Kälteenergie bis zu einem bestimmten Zeitpunkt mindestens bereitgestellt sein muss (s. Abbildung 2, *minimale Erzeugerenergie*). Verschiebt man diese Kurve um die Kapazität des thermischen Speichers vertikal nach oben erhält man eine parallele Kurve, welche die bis zu einem bestimmten Zeitpunkt maximal nutz- bzw. speicherbare Kälteenergie und damit maximale Kälteerzeugung angibt (Kurve *maximale Erzeugerenergie* in Abbildung 2). Die beiden Kurven bilden einen Korridor, in dem sich die dritte Zählerstandkurve, die sich aus den zu planenden Betriebszeiten des Kälteerzeugers ergibt, bewegen kann (Kurve *optimierte Erzeugerenergie* in Abbildung 2). Der Korridor bildet somit die mögliche Flexibilität der Kälteerzeugung und deren Grenzen ab. Nun können durch geeignete Methoden die Betriebszeiten und auch Modulationsgrade des Kälteerzeugers so gewählt werden, dass der sich aus der thermischen Zählerstandkurve (*optimierte Erzeugerenergie*) über Umrechnung mit dem Energy Efficiency Ratio (EER) ergebende Strombezug möglichst gut zum Anreizsignal passt.

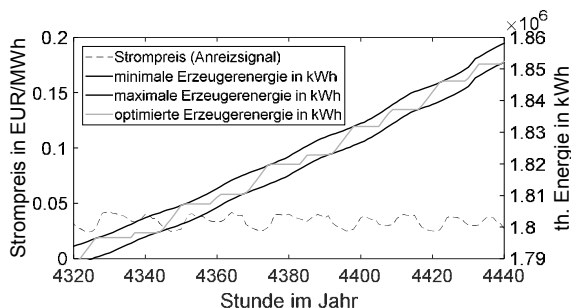


Abbildung 2: Darstellung der modellprädiktiven Fahrplanerstellung mit Zählerstandkurven.

Dieses Optimierungsproblem lässt sich als Minimierung einer (nicht-)linearen multivariablen Zielfunktion mit Nebenbedingungen darstellen, welches im vorliegenden Fall mithilfe der Funktion „fmincon“ aus der MATLAB-Optimization-Toolbox gelöst wird (MATLAB, 2018).

Zur Optimierung der Fahrplanerstellung wird die Zielfunktion für einen bestimmten Prädiktionshorizont wie folgt definiert:

$$\min_m \sum_{i=1}^n \dot{Q}_{th,max} \cdot m_i \cdot EER_i^{-1} \cdot \Delta t \cdot p_i \quad (1)$$

Die zugehörigen Nebenbedingungen sind die obere und die untere Begrenzung der Zählerstandkurve der erzeugten Kälte für jeden Zeitschritt i :

$$\left(Q_{th,Sp} + \sum_{j=1}^i \dot{Q}_{th,max} \cdot m_j \cdot \Delta t \right) - \left(Q_{th,präd,i} + C_{Sp} \right) \leq 0 \quad (2)$$

$$Q_{th,präd,i} - \left(Q_{th,Sp} + \sum_{j=1}^i \dot{Q}_{th,max} \cdot m_j \cdot \Delta t \right) \leq 0 \quad (3)$$

sowie die Begrenzungen des Modulationsgrads des Kälteerzeugers für jeden Zeitschritt i :

$$0 \leq m_i \quad (4) \qquad m_i \leq 1 \quad (5)$$

Die Zählerstandkurve für die Kältebelastungsvorhersage ergibt sich aus der prädizierten thermischen Verbraucherleistung:

$$Q_{th,präd,i} = \sum_{j=1}^i \dot{Q}_{th,präd,j} \cdot \Delta t \quad (6)$$

Tabelle 1: Nomenklatur

Formelzeichen	Beschreibung
i	Index: aktueller Zeitschritt im Prädiktionshorizont
n	Anzahl der Zeitschritte im Prädiktionshorizont
$\dot{Q}_{th,max}$	maximale, thermische Leistung des Kälteerzeugers
m	Modulationsgrad des Kälteerzeugers
EER	Energy Efficiency Ratio des Kälteerzeugers
Δt	Zeitschrittweite
p	Anreizsignal/Strompreis
j	Index: laufender Zeitschritt (von 1 bis i)
$Q_{th,präd}$	Wert der prädizierten Zählerstandkurve für den Kältebedarf
C_{Sp}	thermische Speicherkapazität des Kältespeichers
$Q_{th,Sp}$	im Kältespeicher gespeicherte Kälteenergie zu Beginn des Prädiktionshorizonts
$\dot{Q}_{th,präd}$	prädizierte thermische Verbraucherleistung

Das Ergebnis der Optimierung ist ein Fahrplan für den Kälteerzeuger, welcher für jeden Zeitschritt i des Prädiktionshorizonts den Modulationsgrad m_i (0 - 100 %) vorgibt (s. Abbildung 2, Kurve *optimierte Erzeugerenergie*). Da die notwendigen Vorhersagen, z. B. für das Wetter und das Nutzungsverhalten, nur für einen begrenzten Zeitraum hinreichend genau sind, wird die Optimierung in regelmäßigen Zeitabständen gemäß der Methode des gleitenden Horizonts mit aktualisierten Informationen wiederholt. Über die Vorgabe des Speicherladzustands $Q_{th,Sp}$ zu Beginn jeder Optimierung lässt sich auch eine Abweichung des realen Kälteverbrauchs von der Kältebedarfsprognose korrigieren. Der endgültige Fahrplan setzt sich schließlich aus den gleitend wiederholten Optimierungen zusammen.

Einsatz eines Greedy-Algorithmus

Eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung optimierter Betriebszeiten von strombasierten Wärme- und Kälteerzeugern ist in (Klein et al., 2016) beschrieben. Dort wird ein regelbasierter Ansatz verfolgt. Basis bilden wiederum die Lastvorhersage und ein einfaches Speichermodell mittels einer Kapazität. Dargestellt wird der Verlauf des Speicherladezustands über dem Betrachtungszeitraum. Ausgehend von einem voll beladenen Speicher nimmt dessen Ladezustand ohne Wärme-/Kälteproduktion aufgrund des Verbrauchs kontinuierlich ab. Die Zeitpunkte, in denen Wärme/Kälte erzeugt werden soll, werden über Regeln bestimmt. Zunächst werden der Zeitpunkt, in dem der Speicher zuletzt voll war, und der Zeitpunkt, in dem die Kurve des Speicherladezustands negativ wird, ermittelt. In dem Zeitraum zwischen diesen Zeitpunkten wird derjenige Zeitpunkt mit dem günstigsten Anreizsignal gesucht, in dem noch keine Wärme-/Kälteproduktion eingeplant ist, und dort eine Wärme-/Kälteproduktion eingeplant. Dadurch verschieben sich die beiden oben genannten Zeitpunkte. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis der Speicherladezustand im Betrachtungszeitraum nicht mehr negativ wird. Weitere Regeln verhindern ein Ansteigen des Speicherladezustands über die Speicherkapazität hinaus und bewirken ggf. eine Modulation des Wärme-/Kälteerzeugers. Dieser Ansatz wurde hier gegenüber der Darstellung in (Klein et al., 2016) um die Funktion des gleitenden Horizonts erweitert und in MATLAB implementiert.

MODELL ZUR LASTVORHERSAGE

Zur Untersuchung der Flexibilisierung der Kältebereitstellung in Supermärkten wurde ein reduziertes, schnell berechenbares Modell in der Programmierumgebung MATLAB unter Verwendung der Toolboxen Simulink und Simscape erstellt. Es beinhaltet ein Modell für die Gebäudehülle des Beispielsupermarktes, in dem auch die Nutzung in Form von internen Lasten abgebildet wird, und Modelle für die Kühlmöbel, welche die Kältelast berechnen.

Gebäudemodell

Abgebildet wird ein typischer Supermarkt mit ca. 1.600 m² Nettogrundfläche und ca. 1.100 m² Verkaufsfläche (s. Abbildung 3). Der energetische Standard entspricht der EnEV 2009.

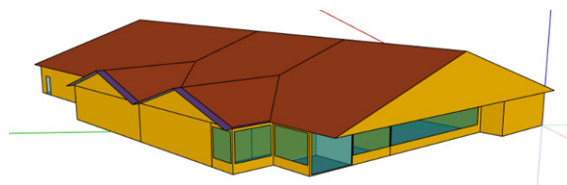


Abbildung 3: 3D-Ansicht des Gebäudemodells für den Supermarkt (Koschany, 2012).

Ausgangsbasis des verwendeten Gebäudemodells stellt ein detailliertes, 21-zoniges Modell aus (Koschany, 2012) dar, welches auch zur Validierung herangezogen wird. Das Modell ist in TRNSYS aufgebaut und benötigt aufgrund seiner großen Detaillierungstiefe verhältnismäßig lange Rechenzeiten. Diese sind für einen modellprädiktiven Ansatz mit vielen Rechenläufen nicht akzeptabel.

Aus diesem Grund wurde daraus ein reduziertes thermisch-energetisches Gebäudemodell entwickelt und in MATLAB implementiert (Herz, 2017). Dieses beinhaltet nur noch zwei Zonen: die Hauptzone und den Dachraum als nicht temperierte Pufferzone. Die Wärmeübertragung innerhalb der beiden Zonen wird mit einem Zwei-Stern-Modell mit separaten Lufttemperatur- und Strahlungsknoten abgebildet. Das gesamte thermische Netzwerk des reduzierten Modells ist in Abbildung 4 dargestellt.

Ein weiterer Schritt der Modellreduktion ist die Abbildung als N-Kapazitäten-Modell nach (Rouvel, 1972), welches auch im Modell der VDI 6007 Blatt 1 (VDI 6007, 2015) Verwendung findet. Jedes Bauteil wird mit einer aus seinem Aufbau berechneten Kapazität und den entsprechenden thermischen Widerständen abgebildet,

so dass dessen dynamisches thermisches Verhalten vereinfacht, aber hinreichend genau wiedergegeben wird.

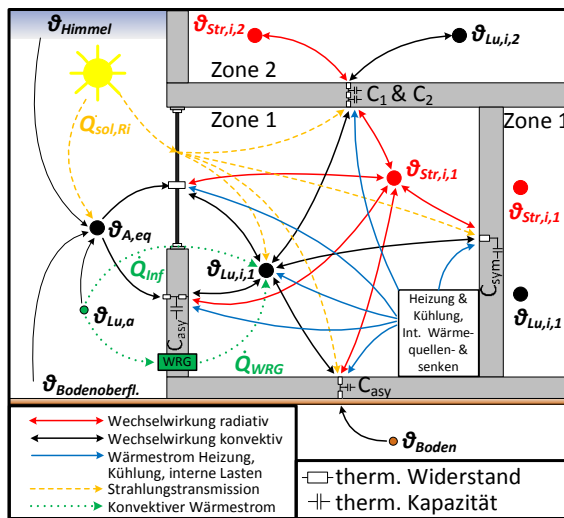


Abbildung 4: Thermisches Netzwerk des reduzierten Gebäudemodells (Herz, 2017).

Der Modellansatz und dessen Implementierung in MATLAB wurde zunächst anhand der Typräume L (leicht) und S (schwer) der (VDI 6007, 2015) und den dort beschriebenen 12 Testfällen validiert (Herz, 2017). Dabei wurden die Reaktionen der Raumtemperaturen bzw. der Leistungen der idealen Heizung und Kühlung auf Änderungen folgender Parameter bzw. Randbedingungen hin überprüft:

- Bauteilschwere des Raums
- konvektive und radiative interne Lasten
- Außenlufttemperatur
- Bodentemperaturen
- Einstrahlung auf opake Außenbauteile
- solare Wärmegewinne durch transparente Bauteile (Außenfenster)
- Luftwechselrate.

Die Anforderungen nach (VDI 6020, 2016) Tabelle 2 für die Validierung mittels statistischer Kennwerte (Typ a) werden in allen Testfällen sehr gut erfüllt. Nach dieser erfolgreichen Validierung wurde der Supermarkt mit diesem reduzierten Modellansatz abgebildet.

Die Validierung des reduzierten Supermarktmodells erfolgte anhand des detaillierten TRNSYS-Modells. Hierfür wurden Validierungsszenarien definiert, welche sich an den Testfällen in (VDI 6007, 2015) orientieren. Die Abweichungen zwischen den Raumlufttemperaturen liegen größtenteils deutlich unter einem Kelvin. Die Abweichungen der Heiz- und Kühlleistungen zur

Raumkonditionierung liegen in den einzelnen Validierungsszenarien mit 5 - 10 % in einem akzeptablen Bereich. Die Validierung anhand einer Jahressimulation ergibt, dass die Jahresenergiebedarfe für die Heizenergie mit einer Abweichung von maximal 3,2 % sehr gut übereinstimmen. Der Kältebedarf des Gebäudes selbst (ohne Kühlmöbel) ist im reduzierten MATLAB-Modell gleich Null; im detaillierten TRNSYS-Modell ist er sehr gering, nämlich ca. um den Faktor 1.000 kleiner als der Heizenergiebedarf. Hier macht sich die Modellreduktion des Innenraums auf eine Zone bemerkbar und einen relativen Vergleich der Raumkühlenergien unmöglich. Der geringe Raumkühlenergiebedarf ist durch die in der Validierung konstant angesetzten Wärmeströme an die Kühlmöbel zu erklären. Die Validierung des reduzierten Gebäudemodells wird trotzdem als erfolgreich bewertet, da insbesondere die für die Entwicklung von Betriebsstrategien bedeutende Dynamik sowohl der Temperaturen als auch der Leistungen sehr gut wiedergegeben wird. Die Genauigkeit der Temperaturen und Jahresenergiebedarfe ist sehr gut, die der Heiz-/Kühlleistungen ist für den Anwendungszweck ausreichend. Das reduzierte Modell ist somit für die Ermittlung der Lastvorhersagen gut geeignet.

Kühlmöbelmodell

Die Kühlmöbelmodelle dienen dazu, den Nutzkältebedarf, der von der zentralen Kälteanlage gedeckt werden muss, und die Wechselwirkung mit dem Innenraum des Supermarktes abzubilden. Die Modelle für die Kühlmöbel der Normalkühlung und der Tiefkühlung wurden in Anlehnung an (Glavan et al., 2016) erstellt. Dort ist ein RC-Modell eines realen Kühlmöbels beschrieben, dessen Parameter durch Messungen bestimmt wurden. Es eignet sich besonders gut dafür, in der Simscape-Umgebung umgesetzt zu werden und benötigt aufgrund seiner Einfachheit nur kurze Rechenzeiten. Im Modell von (Glavan et al., 2016) wird der Wärmeaustausch im Kühlmöbel und mit der Umgebung als Ein-Stern-Modell abgebildet. Dabei wird das Kühlgut anhand von zwei Kapazitäten/Temperaturknoten, die Wand als eine Kapazität und ein Temperaturknoten in Wandmitte, sowie der Verdampfer mit Abtauheizung abgebildet.

Dieses Kühlmöbelmodell wurde zur Einbindung in das hier verwendete reduzierte Supermarktmodell modifiziert. Innerhalb des Kühlmöbels

wird die Betrachtung des Verdampfers mit Abtauheizung zunächst vernachlässigt und die Kapazität des Kühlgutes in einem Knoten zusammengefasst. Zur Anbindung des Kühlmöbelmodells an das Zwei-Stern-Modell des Supermarktes wurde ein zusätzlicher Temperaturnoten an der Wandoberfläche eingeführt, über welchen der Wärmeaustausch mit dem Supermarkt getrennt nach Strahlung und Konvektion betrachtet werden kann. Die thermischen Widerstände wurden entsprechend aufgeteilt.

Zudem wird ein Luftaustausch mit dem Supermarktraum, verursacht durch das Öffnen der Kühlmöbeltüren, abgebildet, so dass Kühlmöbel- und Gebäudemodell auch darüber in Wechselwirkung treten. Abbildung 5 zeigt das verwendete RC-Modell.

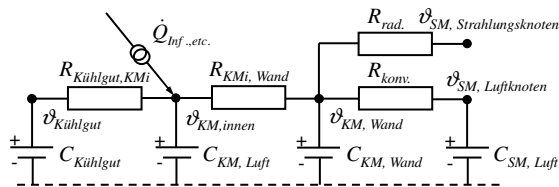


Abbildung 5: RC-Schaltbild des Kühlmöbelmodells.

Wärmeeinträge in die Kühlmöbel durch interne Wärmequellen, z. B. Beleuchtung, werden durch entsprechende Wärmeströme mit Zeitprofilen berücksichtigt. Zur Ermittlung der abzuführenden Wärmeleistungen werden die Kühlmöbelinnentemperaturen und damit auch die Kühlguttemperaturen auf einem Sollwert von 4 °C (NK) bzw. -22 °C (TK) gehalten und die Wärmeströme am Kühlmöbeltemperaturknoten erfasst. Dies entspricht einer idealen Regelung der Wärmeabfuhr, für die die Kapazität des Kühlgutes nicht benötigt wird. Sie wurde mit abgebildet, um künftig Betriebsstrategien untersuchen zu können, welche die Kühlguttemperatur beeinflussen. Die abzuführenden Wärmeströme der Tiefkühlmöbel werden entsprechend des EER um den Strombedarf der dezentralen Kältemaschinen erhöht, da deren Abwärme auch über den Solekreislauf abgeführt wird. Die Summe der Kältebedarfe beider Kühlmöbelarten bildet die Kältelastvorhersage, welche in der Fahrplanermittlung verwendet wird. (Koch, 2018)

SIMULATIONSUNTERSUCHUNGEN

Mit den oben vorgestellten Modellen und Methoden zur Fahrplanerstellung wurden Simulationsuntersuchungen durchgeführt, welche den Betrieb der zentralen Kälteversorgung über ein

Jahr abbilden und den Vergleich der verschiedenen Betriebsstrategien ermöglichen.

Ermittlung Kältelastprofil

Mit dem Gesamtmodell (Gebäude + Kühlmöbel) wurde das Kältelastprofil der Kühlmöbel ermittelt, welches für die Fahrplanermittlung als ideale Prognose Verwendung findet. Eingangsdaten sind die Wetterdaten des Testreferenzjahres (TRY) für die Region 13 (BBSR, 2011), Zeitpläne für die Anzahl der Personen, aus welchen sowohl die internen Wärmelasten für das Gebäudemodell als auch die Intensität des Luftaustausches der Kühlmöbel mit dem Supermarktraum abgeleitet wurden, und Zeitpläne für die Öffnungszeiten des Supermarktes, welche bei den Luftwechselraten und internen Wärmequellen durch Beleuchtung berücksichtigt werden. Die Annahmen entsprechen (Koschany, 2012). Der Jahressimulation wurde eine Einschwingphase von 3 Monaten vorangestellt.

Auslegung Kälteerzeuger und Kältespeicher

Zur Auslegung des Kälteerzeugers diente die in Abbildung 6 dargestellte Jahresdauerlinie des Kältebedarfs der Kühlmöbel, welche aus vorstehend beschriebener Simulation resultiert.

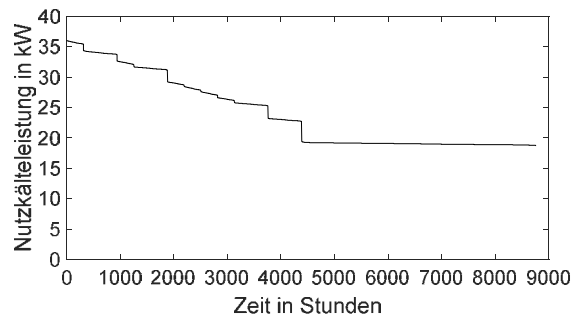


Abbildung 6: Jahresdauerlinie des Kältebedarfs der Kühlmöbel.

Üblicherweise werden der Kälteerzeuger auf die maximal benötigte thermische Leistung, welche hier ca. 37 kW_{th} beträgt, und der Pufferspeicher auf die Mindestlaufzeit des Kälteerzeugers von unter einer Stunde ausgelegt. Die Auslegung hat einen entscheidenden Einfluss darauf, wie weit die Kältebereitstellung gegenüber der Kältenutzung überhaupt verschiebbar ist. Da die Simulation nicht die reale Anlagenauslegungsleistung wiedergibt, wird der Kälteerzeuger in den anschließend vorgestellten Beispielen einmal mit 37 kW_{th} und einmal mit 55 kW_{th}, was ca. dem 1,5-fachen der simulierten Leistung entspricht, angesetzt. Der Kältespeicher wird so ausgelegt,

dass er jeweils vier Volllaststunden des Kälteerzeugers zwischenspeichern kann.

Strompreis als exemplarisches Anreizsignal

Für die netzdienliche Fahrplanermittlung dient beispielhaft der Börsenstrompreis der European Power Exchange (EPEX SPOT) als Anreizsignal. Verwendet wird der Day-Ahead-Preis für das Jahr 2014 in stündlicher Auflösung (EPEX, 2014). Er schwankt in einem Bereich von -6,5 ct/kWh bis +8,8 ct/kWh um den Mittelwert von +3,28 ct/kWh. Dieser Preis bildet nicht die gesamten anfallenden Stromkosten ab, da sämtliche weitere Kosten, Abgaben und Steuern fehlen. Dies schränkt die Aussagekraft jedoch nicht ein, da die Stromkosten lediglich als Maß dafür dienen, wie gut eine Betriebsstrategie in der Lage ist, den Kälteanlagenbetrieb auf die Dynamik dieses Anreizsignals hin anzupassen.

Ergebnisse und Vergleich der Methoden zur Fahrplanerstellung

Für die konventionelle Basisstrategie ergeben sich Stromkosten (EPEX, 2014) von ca. 2.300 €. Bei dieser Betriebsweise findet keinerlei Anpassung an das Anreizsignal statt, so dass der Strombezug über das Jahr gesehen in etwa zum Durchschnittspreis erfolgt.

In einer ersten Variante wird eine Auslegung des Kälteerzeugers auf eine thermische Leistung von 37 kW_{th} und des Speichers auf eine Kapazität von 148 kWh_{th} betrachtet. Würde die gesamte jährliche Kälteerzeugung mit dieser installierten Leistung ausschließlich in die Zeiträume günstigster Strompreise (EPEX, 2014) verlagert, ergäbe sich diese maximal mögliche Kostenreduktion zu ca. 492 €. Wird die Kälteerzeugerleistung in einer zweiten Variante auf 55 kW_{th} und die Speicherkapazität auf 220 kWh_{th} erhöht, liegt die maximal mögliche Stromkostenreduktion bei ca. 735 €. Wie weit die mit den hier untersuchten Methoden ermittelten Fahrpläne und Anlagenkonfigurationen diese Potenziale ausnutzen, wird anhand der jeweils ermittelten Kostenreduktion und deren Verhältnis zur maximal möglichen Kostenreduktion dargestellt, siehe Tabelle 2.

Die knappere Auslegung des Kälteerzeugers und Speichers in Variante 1 ermöglicht eine geringe Flexibilität, so dass nur geringe absolute Kostenreduktionen, d. h. Verschiebungen, erreicht werden. Variante 2 bietet eine deutlich größere Flexibilität, welche von der Optimie-

rungsfunktion gemäß Gleichung (1) am besten genutzt wird.

Tabelle 2: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

	Kostenreduktion absolut / relativ	
	Variante 1	Variante 2
Maximal mögliche Kostenreduktion	492 €	735 €
Greedy-Algorithmus	129 € / 26,3 %	312 € / 42,5 %
Optimierungsfunktion (1)	245 € / 51,7 %	415 € / 56,5 %

Den Vergleich aller drei Betriebsstrategien anhand der Zählerstandkurven für einen Zeitausschnitt zeigt Abbildung 7. Die beiden vom Greedy-Algorithmus und der Optimierungsfunktion (1) optimierten Zählerstandkurven ähneln sich grundsätzlich. Ein nennenswerter Unterschied liegt jedoch darin, dass der Greedy-Algorithmus aufgrund der dort hinterlegten Regeln nicht in der Lage ist, den Kälteerzeuger so zu modulieren, dass dessen optimierte Erzeugerkurve entlang der Kurve für die minimale Erzeugerenergie verläuft. Dies ist nur bei Erreichen der Kurve für die maximale Erzeugerenergie möglich. Dadurch kann das Verschiebepotenzial im Gegensatz zur Optimierungsfunktion (1) nicht vollständig genutzt werden.

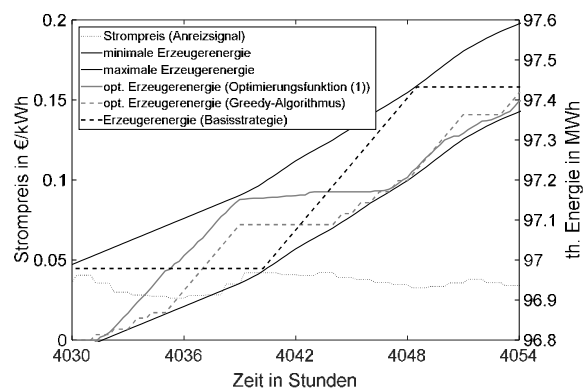


Abbildung 7: Vergleich der optimierten Erzeugerzählerstandkurven mit der Basisladestrategie für Variante 2.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der vorliegende Beitrag zeigt, dass mit den vorgestellten Methoden zur modellprädiktiven Fahrplanerstellung die Kältebereitstellung von Supermärkten an ein Anreizsignal angepasst werden kann, wenn ein indirektes Kälteanlagen-system eingesetzt wird. Die Optimierungsfunktion (1) erschließt einen größeren Teil des maximal möglichen Optimierungspotenzials als der

Greedy-Algorithmus. Das Lastprofil sowie die Auslegung des Kälteerzeugers und Speichers haben einen großen Einfluss auf das Verschiebepotenzial und werden daher weiter untersucht. Insbesondere das Modell für die Kühlmöbel ist noch zu verbessern. Das hier vorgestellte und in (Bachseitz et al., 2018) detailliert beschriebene Vorgehen kann auf beliebige strombasierte Wärme- und Kälteerzeuger und Anreizsignale angewendet werden und bietet damit ein breites Anwendungsspektrum.

DANKSAGUNG

Das diesem Beitrag zugrunde liegende Vorhaben „FlexControl – Netzdienliche Betriebsführungsstrategien für eine energieeffiziente Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden im GHD-Sektor“ wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET1359C gefördert. Die Autoren danken dem Mittelgeber für die Unterstützung und dem Projektträger Jülich (PTJ) für die Betreuung des Vorhabens.

LITERATUR

AGEB AG Energiebilanzen e. V. (Hrsg.). Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland 1990 - 2016, Berlin/Bergheim Germany.

Bachseitz, M.; Pfeiffer, D.; Koenigsdorff R.; Becker, M. 2018. Prädiktive Optimierung der Betriebsführung von Kälteanlagen für das elektrische Lastmanagement, Veröffentlichung in Vorbereitung.

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR): Testreferenzjahr-Datensatz 2011, Handbuch und Datensatz, www.bbsr.bund.de - Projekt: Aktualisierte und erweiterte Testreferenzjahre (TRY) von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse, 23.04.2011.

EPEX SPOT Day-Ahead-Preise, online abrufbar unter: <http://www.epexspot.com/de/markt/daten/dayaheadauktion>, 24.04.2018.

FlexControl – Netzdienliche Betriebsführungsstrategien für eine energieeffiziente Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden im GHD-Sektor, <https://www.netzdienlichegebäude.de/>, 27.04.2018.

Glavan, M.; Gradisar, D.; et al. 2016. Cost optimisation of supermarket refrigeration system with hybrid model, Applied Thermal

Engineering, 103 (2016), pp. 56-66, Elsevier Verlag, München Germany.

Herz, A. 2017. Erstellung eines reduzierten thermisch-energetischen Gebäudemodells für modellprädiktive Regelstrategien, Masterarbeit, Hochschule Biberach, Germany.

Klein, K.; Langer, R.; Kalz, D.; Herkel, S.; Hennig, H.-M. 2016. Grid support coefficients for electricity-based heating and cooling and field data analysis of present-day installations in Germany, Applied Energy 162 (2016), pp. 853-867, Elsevier Verlag, München Germany.

Koch, F. 2018. Modellierung von Kühlmöbeln in Supermärkten, Forschungsarbeit, Hochschule Biberach, Germany.

Koschany, V. 2012. Modellbildung und Energiebilanzanalyse mit TRNSYS am Beispiel von Supermärkten, Bachelorarbeit, Hochschule Biberach, Germany.

MATLAB Optimization Toolbox, <https://de.mathworks.com/products/optimization.html>, 30.04.2018.

Netzreaktive Gebäude – Ganzheitliche Bewertung von Bauphysik und Gebäudeenergiesystemen einschließlich ihrer Rolle in der Energiewirtschaft – Energie, Exergie, Leistungsbezug und -abgabe, <https://www.netzreaktivegebäude.de/>, 27.04.2018.

Rouvel, L. 1972. Berechnung des wärmetechnischen Verhaltens von Räumen bei dynamischen Wärmelasten, FfE-Berichte Nr. 2 in Brennstoff-Wärme-Kraft 24 (1972), Nr. 6, pp. 245-262. http://www.gebsimu.de/Rouvel_Berechnung_des_waermetechnischen_Verhaltens_von_Raerumen_bei_dynamischen_Waermelasten__BWK_1972_6.pdf, 14.04.2017.

VDI 6007 Blatt 1 - Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden - Raummodell. VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG), Düsseldorf, 2015.

VDI 6020 (Entwurf) - Anforderungen an thermisch-energetische Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation. VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG), Düsseldorf, 2016.

Viessmann 2017. ESyCool-green, ESyCool classic – Nachhaltige Energiesysteme für den Lebensmitteleinzelhandel, Produktbroschüre, Mainz Germany.

INTERACTIVE SOLAR POTENTIAL SIMULATION FOR EARLY STAGE URBAN PLANNING

I. Bratoev¹, G. Schubert¹, A. Chokhachian², C. Bonnet², F. Petzold¹ and T. Auer²

¹ Chair of Architectural Informatics, TUM Department of Architecture, Technical University of Munich, Munich, Germany

² Chair of Building Technology and Climate Responsive Design, TUM Department of Architecture, Technical University of Munich, Munich, Germany

ABSTRACT

The early design stages of urban planning have a great impact on indoor comfort and energy aspects. Alternative power supply options, based on solar potential, should be considered in the early stages of design, as they may constitute highly efficient substitutes. Existing software solutions for such simulations require higher level of detail from models, precise input parameters and have long, non-interactive simulation runtimes. This is in stark contrast to the rapid changes that happen to the imprecise models used in early design stages. The focus of the paper is the core concept, theoretical approach and the prototypical implementation of a real-time, interactive algorithm focused on solar potential for buildings.

INTRODUCTION

The effects of decisions taken in the early design stages have significant effects not only on the subsequent planning phases, but also on construction operations and the use of the building (MacLeamy, 2004). It is therefore even more essential to be able to assess these effects at an early stage of planning, particularly in the field of energy planning. However, energy estimates take place in the later phases through analyses and simulations that require highly accurate models and data – information that is not available in early planning phases. It is therefore necessary to find approaches and solutions that enable an estimation of energy factors based on imprecise, incomplete data and at the same time allow embedding in early planning phases.

CDP // Collaborative Design Platform

In recent years, a research group has investigated the seamlessly embedding of simulation and analysis tools in the early planning and design phases. In addition to the definition of relevant requirements for design tools. The conceptual basis of the existing CDP // Collaborative Design Platform (Schubert, 2014) bridges the gap between the digital decision supporting tools and established design tools in the creative planning phases. This allows participants to work with familiar tools and simultaneously display analyses and simulations directly in the model or hand-drawn sketches that extend the scope of assessment by additional digital levels.

The system structure can be shown as follows: The hardware is based on a large-format multi-touch table built in-house (Figure 1). The table surface serves (Figure 1 A) as a work surface and shows the digital image of the figure ground plan. Additionally an on-top depth camera allows for real-time reconstruction of all physical objects placed on the table. In this way, all design ideas are also directly available as digital data in the form of models. This data serves as the basis for the simulations and analyses displayed on the table surface. Due to the real-time connection, a change in the object has a direct effect on the simulations, so that the effects are directly visible. To enable the creation of different analysis tools a plugin framework was integrated into the CDP (Figure 2) to allow for a standardized handling of user interactions and events and enable an easy way to visualize the results of simulation and analysis methods in the CDP framework.

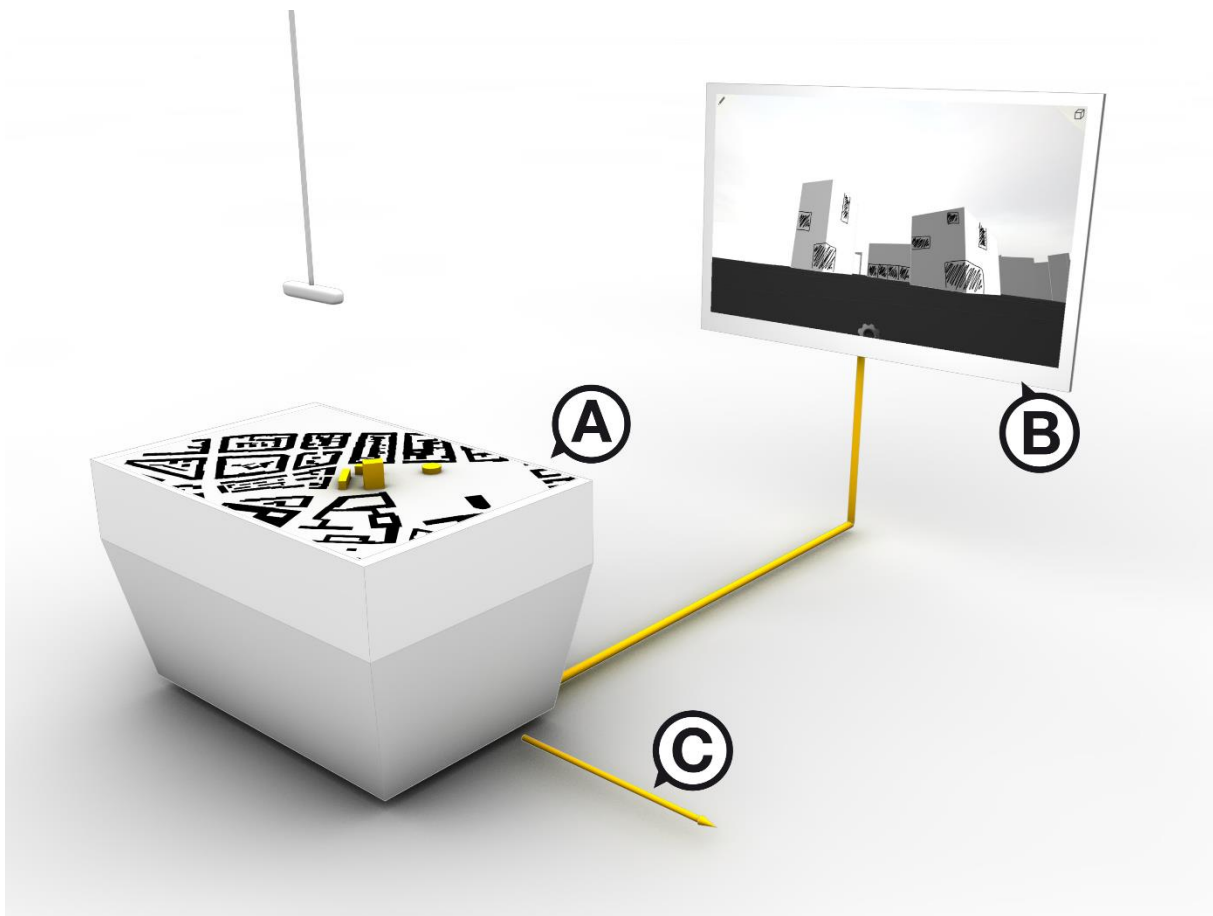


Figure 1: Hardware Setup of the design platform: A) Table Surface; B) 3D Perspective View; C) Flexible Extensions

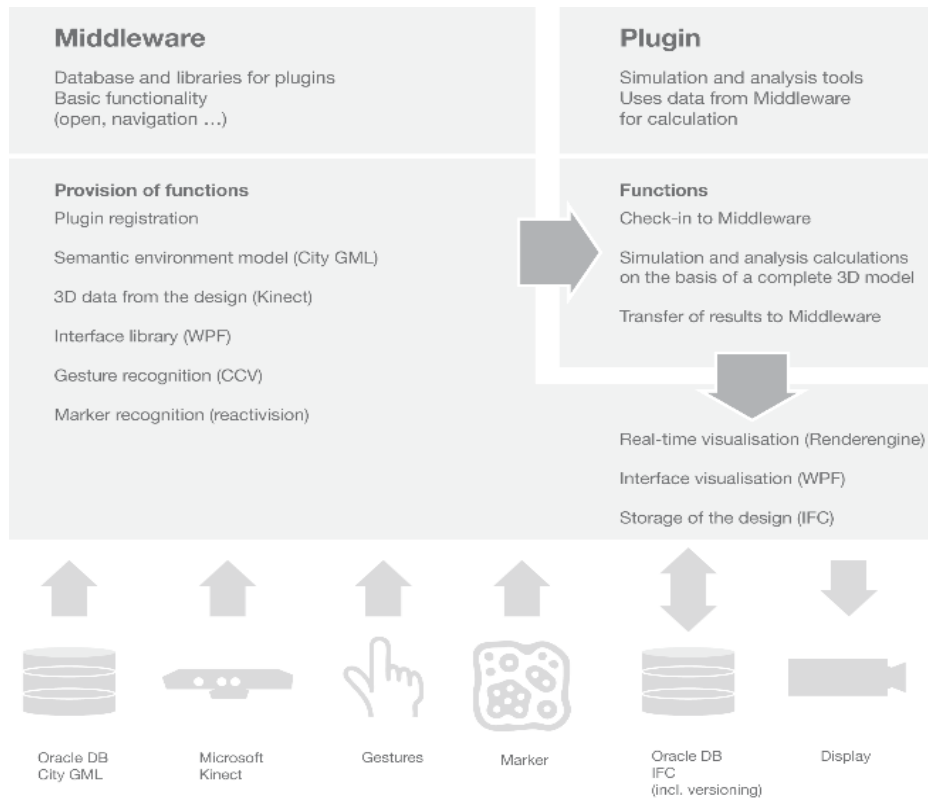


Figure 2: Software Framework of the design platform: the simulation is built as a plugin

CONCEPT

Taking into consideration the described design platform, this paper proposes a method and prototypical implementation of an energy analyses simulation focused on the solar potential of individual buildings in an urban environment in real-time.

Related Works

For the purposes of the research project, a few tools and approaches for analyzing the solar potential of buildings were selected and observed.

The RADIANCE (Ward, 1994) software serves as a core for many popular commercial plug-ins and tools. It utilizes a backwards raytracing algorithm that considers both diffuse and specular reflections. It is an ideal base for complex detailed models, where precise results are essential. Due to its freeware nature it is widely utilized in applications related to solar potential estimates and daylighting analysis.

As an improvement to the preexisting ESRA clear-sky model (Hofierka, 1997), r.sun (Hofierka et al, 2002) enables calculations to be performed for large areas. Reflectance and shadow maps are produced for the different types of surfaces through the discretization of different input parameters such as terrain, latitude, and radiation irradiance and irradiation raster. The model support of different time steps and intervals.

A widely popular software solution for radiation models is the Solar Analyst (Fu et al, 1999), developed for ArcView GIS (ESRI 1999) as an extension. The method divides the sky into different sectors defined by the zenith and azimuth coordinates. It computes a set of radiation maps based on a uniform or standard overcast sky.

All of these software solutions share a few similar drawbacks when it comes down to their integration in the early stages of urban planning. The algorithms used deliver high precision result for detailed models. Applying them to the lower level of detail models that are used in the early

design stages would be highly impractical. Another issue related to their highly precise computation potential is, that they require non-interactive computational times and are not geared towards handling changes to the simulation models during the process.

Theory

The goal of the proposed approach is to compute the energy potential of optimally place photovoltaic solar panels and how that would relate to the energy requirements of the building itself.

The computation of the total radiation flux is based on the approach proposed by (Holbert 2011). It is the sum of the direct radiation flux:

$$I_D = I_{DN} \cos(\theta) \quad (1)$$

the diffuse-scattered radiation flux:

$$I_{DS} = C I_{DN} \left[\frac{1 + \cos(\beta_2)}{2} \right] \quad (2)$$

and the reflected radiation flux:

$$I_{DR} = I_{DN} \rho (C + \sin(\beta_1)) \left[\frac{1 - \cos(\beta_2)}{2} \right] \quad (3)$$

where I_{DN} is the direct normal irradiance to the ground, θ is the collector angle, β_1 is the altitude angle and β_2 is the tilt angle from the ground. A, B and C are the apparent solar irradiation, atmospheric extinction coefficient and the ratio of diffused radiation on a horizontal surface to the direct normal irradiation respectfully. (ASHRAE 1995)

Roofs facing north, northwest and northeast (azimuth of $+135^\circ$ to -135°) were excluded due to the low solar radiation and the correspondingly low efficiency and economy of power generation. If no roof information is provided (type, orientation, inclination, etc.) it is assumed that it is a flat roof.

The amount of electricity that can be generated per year per roof area of each individual building was determined using an average annual

efficiency factor. For a better interpretation of the results, this value was shown in relation to the power requirements of the respective building. Since the real electricity consumption of the building is not known in principle, the demand was estimated based on statistical area-specific values (Frondelet et al., 2008).

IMPLEMENTATION

The most computationally intensive part of the proposed approach is the assertion if parts of the roof are occluded by other buildings and objects. That is why the algorithm consists of a two-step approach: Step 1 computes a fast, optimal situation. Step 2 improves iteratively the result.

The two-step approach can be divided in 3 general phases (Figure 3). These 3 phases are then divided into three background threads. The „preprocessing” phase computes the static building data that does not change over the course of the simulation. The “fast” phase computes an idealized real-time result. In the “accurate” phase, the idealized result is improved, by taking into consideration shadow occlusion.

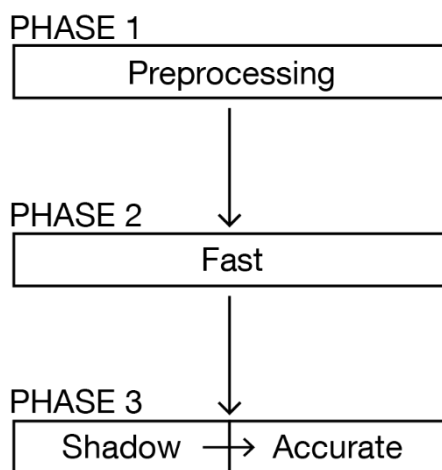


Figure 3: The three main phases of the algorithm

Phase 1: Preprocessing

As a first step in the preprocessing phase, the plan area is roughly discretized based on latitude and longitude coordinates. This is done since the difference of the solar altitude and azimuth angle between two points that are only a few meters apart is negligible. Then for each of the discretized coordinates the sun elevation and direction, and

the solar azimuth are computed and stored for each time step in which the sun would have been visible.

In the preprocessing phase, three major operations happen per building. The first is the computation of the estimated electricity consumption of buildings. Based on the contained data in the OpenStreet Map model the energy reference area (*erf*) is obtained. This is either the total living/usable area or as:

$$erf = l * area * scale_factor \quad (4)$$

where *l* is the number of floors, not counting the basement, the *area* is the building floor area and the *scale_factor* is a value in the range [0,1] that defines how much of the floor area is actually usable. After the energy reference area is computed it is multiplied with a statistical energy value, based on the type of building and its age. This type of data can either be directly read from a file or preloaded into the simulation.

In parallel, the buildings are subdivided into convex parts using the Hertel-Mehlhorn algorithm (Hertel et al, 1983). This is done to simplify the shadow generation and the occlusion tests in the next steps.

After the segmentation, the roof of the building is discretized for the purpose of shadow computations. A 2D Bounding Box (O'Rourke 1985) is generated for the roof, and then it is discretized with a Cartesian grid. Each cell that does not consist of more than 50% roof is then removed from the list. The cells themselves contain only a position in 3D Space and its corresponding approximation in latitude and longitude coordinates.

Phase 2: Fast Thread

The goal of the fast thread is to deliver an instant result that can then be improved gradually. The thread performs an idealized scenario for each roof, meaning that it is not occluded by anything. The ideal potential is computed as:

$$potential = tsrf * sp * psf \quad (5)$$

where *tsrf* is the solar radiation flux, *psf* is the annual efficiency factor for photovoltaic panels (STMUG 2011) and *sp* is the total amount of solar panels, that could be optimally placed on the roof.

The solar panel count is computed based on the total roof surface area scaled by a factor for unusable space (skylights, dormers, chimneys, air conditioning, etc.) (Müller 2009) and a second factor that represents optimal positioning of the solar panels on a flat roof (STMUG 2011). For non-flat roofs, the orientation and the inclination of the roof are taken into consideration for the optimal positioning factor. This computation is then split per building per time interval as a singular function and executed in parallel. Each result for each time interval for each building is then stored, so it can be improved by the second pass of the algorithm. Since this thread performs only computations that are done in constant time, results can be visualized for the user in real time.

Phase 3: Accurate Threads

Once the thread is complete, the second phase begins. There are two processes that run in parallel one generates the shadows for each building for each time interval. The second one uses the results of the first to compute a realistic potential for the building by expanding on Eq. (5) by adding an occluded factor that represents how much of the roof would be in shadow for that time interval.

The test, if a point is occluded by another object can be reduced from a three dimensional problem to a two dimensional problem, since the bases of all objects are on the same plane (topology of the area is not taken into consideration). By projecting the 3D object to a plane, the occlusion test can be reduced to checking if a point is inside of a polygon. The projection vector is the sun direction for the specific time interval. This test is further simplified, since all buildings are split into convex shapes only. This means that the projection of the convex 3D parts is then in turn also a convex polygon (Martin et al, 2002).

As a further optimization for the occlusion test, each shadow for each time interval also has a 3D Bounding Box generated. The minimum and maximum points of this box are computed using the points of the building volume and the projected 2D shadow polygon (Figure 4). A check is then executed to identify if a point is within a box in constant time and is used as a fast way to skip occlusion tests for shadows and buildings that are far away. A final bounding box for each

building is constantly updated during the shadow computation thread. Its points are computed using the building volume points and the complete shadowing area, produced by all of the shadows from each time interval. This bounding box represents the total area that is shadowed by the building through the whole time span (Figure 4).

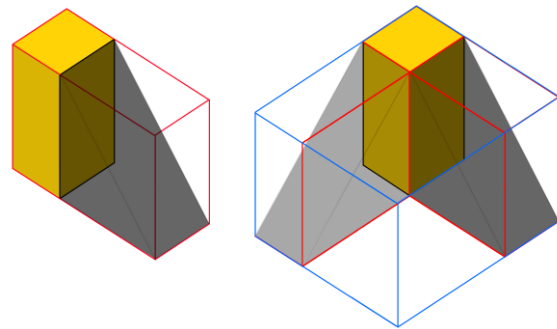


Figure 4: Bounding Box for a single shadow (red, left); Bounding Box for all shadows (blue, right)

When the shadows for each building for one time step are computed, the second process does the occlusion test. Since the roofs were already discretized in a previous step, it projects the center point of each cell to the ground plane, using the same sun direction vector as the projection vector, and then tests if the point is contained within one of the shadow polygons. Once each cell for the roof has been tested, the occluded proportion is used as the occluding factor for (5) and the previously stored result is then updated.

Real-time Interactivity

To have a simulation that reacts to the changes of the planed area made by the user three cases have to be handled: when a new building is placed, a building is moved or rotated and when a building is removed. What happens in all three cases as a first step is a stop of all running threads. Once the threads are terminated, the different cases are then handled. As an optimization for this part the buildings were extended with three variables that track how much work has been already done by the three threads. Once the threads are started, they execute their methods only on the buildings that are marked for update.

When a new building is added to the plan area, it starts the optimal simulation thread to deliver an

instant approximation for the solar potential of the building. The shadow creation thread is then executed exclusively for the new building. Since the new building will produce shadows that will affect the solar potential of other neighboring buildings, all other buildings have to be checked if they would be shadowed by the new addition. For this purpose a fast Bounding Box overlapping test between the complete shadowing Bounding Box of the new building and the Bounding Box of the roofs of each other building is performed. The corresponding buildings that will be affected by the new addition are then marked for solar potential recomputation. The threads are then started again with the updated tracking variables.

Similarly, when a building is removed, the solar potential of neighboring buildings would improve. Using the same overlapping tests as with the case of a new building being added, affected buildings are marked. Then the information about the removed building is deleted from the lists and the threads are restarted.

The most complex case is the movement of a building in the plan area. The movement of a building consist of two events. First the neighboring buildings around the original position of the building would have a solar potential gain, since there will be one less occludes. Second, the neighboring buildings around the new position of the building would have a solar potential loss. The overlapping test is first used in the original position of the building using the complete shadowing Bounding Box and roof Bounding Boxes of all buildings. The affected buildings are marked and then the building is moved and its new shadows are recomputed using the shadow creation thread. After that, the same overlapping test is performed between the new complete shadowing Bounding Box and all roof Bounding Boxes. After the affected buildings are marked, the threads are restarted.



Figure 5: Representation of the percentage of electricity consumption that can be covered by solar energy; buildings marked in red are excluded from the analysis.

VALIDATION

To validate the implementation of the proposed approach an area in the vicinity of Munich was selected. The time interval is one year with steps for each hour. Due to the low level of roof information in that area, all roofs were set to the flat roof type and the solar panels to have a 35° degree inclination. The values of the simulation were then extracted and compared with the results of the corresponding radiation values calculated with the ASHRAE tool and Radiance.

The first tool used for validation “ASHRAE Clear Day Model Solar Calculator” was developed by the University of Minnesota based on calculations by (Kuen et al, 1998). This model also uses location-based data (latitude and longitude) without consideration of weather data and exclusively for a clear sky. For the validation, hourly direct and diffuse solar radiation values were calculated to determine the monthly solar potential. Figure 6 show the linear regression for the annual solar radiation in comparison between the implemented simulation and the ASHRAE tool. The detailed analysis of the results yields a determination coefficient factor of 0.97 to 0.99, which confirms the high accuracy of the implemented method compared to the ASHRAE tool.

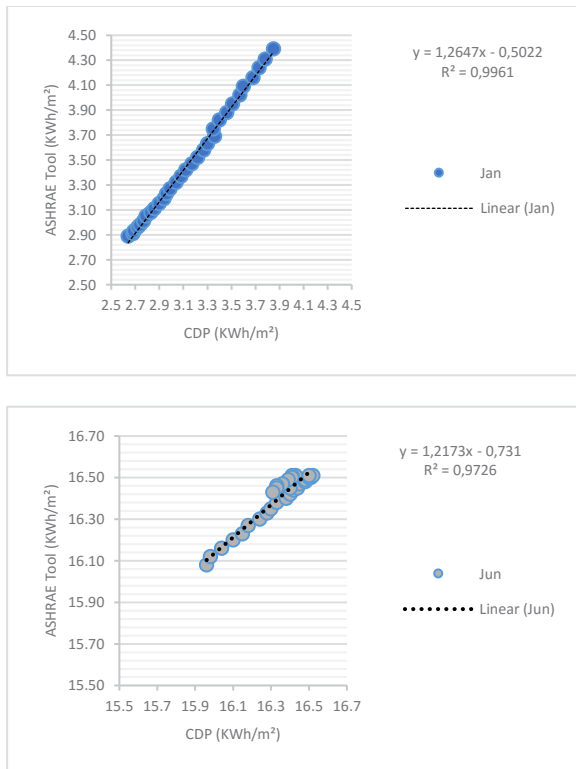


Figure 6: Monthly global solar Radiation (January, July)

The second tool used for the validation is Radiance, which takes weather data for the plan area under consideration including direct and diffused horizontal radiation and clouds. The tool provided significantly lower values for the solar irradiation (Figure 7). One of the main reasons for this drastic difference between the results from the implemented simulation and the radiance simulation is the high cloud coverage around the Munich plan area, derived from the local weather data.

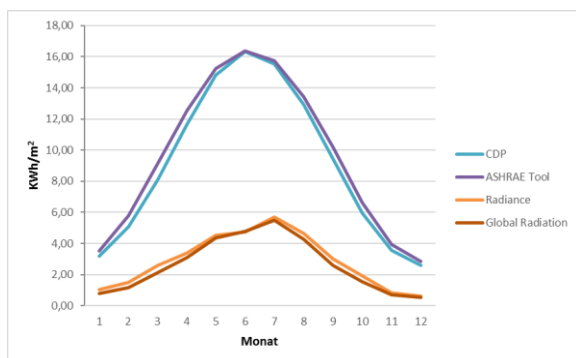


Figure 7: Monthly comparison of solar radiation values for the city of Munich

CONCLUSION / FUTURE WORK

The implemented simulation for calculating the solar energy potential is intended for comparative studies in the early stages of urban planning in order to compare and evaluate corresponding design variants. The proven overestimation of the solar potential due to the exclusion of local weather data can be neglected as long as the results serve exclusively for the comparison of variants.

A future improvement on the implemented approach is to include the aforementioned weather data into the mathematical model of the simulation.

For the improvement of the occlusion tests, the planning area can be subdivided using different type of spatial partition strategies. This could greatly improve the computation time for the different cases in real-time interactivity of the implementation.

REFERENCES

- ASHRAE, 1995., Chapter 30 “Solar Energy Utilization”.
- ESRI, 1999. ArcView GIS 3.2. Environmental Systems Research Institute, Inc., Redlands.
- Frondel M., et. al., 2008, Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte für das Jahr 2005, Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI Essen)/ frosa Gesellschaft für Sozialforschung und statistische Analysen mbH, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Auftraggeber)
- Fu P., Rich P., 1999. Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scale, Proceedings of the 19th annual ESRI user conference.
- Hertel S., Mehlhorn K., 1983. Fast Triangulation of Simple Polygons, Proceedings of the 1983 International FCT-Conference on Fundamentals of Computation Theory, p.207-218.
- Hofierka J., Suri M., 2002. The solar radiation model for Open source GIS: implementation and application, Open source GIS-GRASS users conference, p.11-3.

- Hofierka J., 1997. Direct solar radiation modelling within an open GIS environment, Proceedings of JEC-GI'97 conference in Vienna, Austria, IOS Press Amsterdam, p.575-584.
- Holbert K.E., 2011. Solar Energy Calculations, Handbook of Renewable Energy Technology, p. 189-204.
- Kuen T.H., Ramsey J.W., Threlkeld J.L., 1998, Thermal Environmental Engineering, 3rd Edition.
- MacLeamy P., 2004, MacLeamy curve, Collaboration, Integrated Information, and the Project Lifecycle in Building Design and Construction and Operation, WP-1202
- Martin D., Fekete J.D., Torres J.C., 2002. Flattening 3D objects using silhouettes, EUROGRAPHICS 2002, Volume 21, No. 3, p.239-248.
- Müller M., 2009. Entwicklung von Methoden zur Ermittlung des Solarpotentials auf kommunaler Ebene, Master Thesis, München.
- O'Rourke J., 1985. Finding Minimal Enclosing Boxes, International Journal of Computer and Information Sciences, Vol. 14, No. 3, p.183-199.
- Schubert G., 2014, Interaction forms for digital design: a concept and prototype for a computer-aided design platform for urban architectural design scenarios, Dissertation Technical University of Munich, Department of Architecture, Chair of Architectural Informatics
- STMUG, 2011, Leitfaden Energienutzungsplan, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit, Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie, Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innen (Hrsg.)
- Ward, G.J., 1994. The RADIANCE lighting simulation and rendering system, Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques, SIGGRAPH, p.459-72.

GEGENÜBERSTELLUNG ZWEIER MODELLBASIERTER OPTIMIERUNGEN FÜR DEN WÄRMEPUMPENBETRIEB

J. Buderus¹, C. Betzold¹, S. Bordin¹, K. Kandasamy¹ und A. Dentel¹

¹Energie Campus Nürnberg – Energieeffiziente Systeme der Gebäudetechnik, Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, Nürnberg, Germany

KURZFASSUNG

Modellprädiktive Regelstrategien für Wärmepumpen ermöglichen es, die Betriebsweise an externe Einflüsse, wie bspw. flexible Stromtarife, anzupassen. Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei modellbasierte Optimierungsansätze mit Hilfe eines Hardware-in-the-Loop Prüfstands untersucht und verglichen. Hierzu werden ein einfacher sowie ein detaillierter Ansatz zur Modellierung einer Wärmepumpe und eines thermischen Energiespeichers verfolgt. Neben den verschiedenen Modelltiefen kommen auch unterschiedliche Optimierungsalgorithmen (MILP und GA) zum Einsatz. Grundsätzlich ist zu sagen, dass beide Optimierungsansätze den Betrieb der Wärmepumpe in Niedrigpreisphasen verschieben. Vergleicht man die beiden Ansätze, unterscheiden sich diese hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten, ihrer Rechenzeit sowie ihrer Prognosegenauigkeit. In den untersuchten Tagesszenarien mit einem am Markt verfügbaren börsenorientierten Privatkundenstromtarif fallen die Einsparungen jedoch sehr gering aus. Im Vergleich zu einem wärmegeführten Anlagenbetrieb ergibt sich eine durchschnittliche Einsparung von unter 1 % pro Tag.

ABSTRACT

Model predictive control strategies allow adapting the operation of heat pumps to external influences such as flexible energy tariffs. In this study, with the help of a Hardware-in-the-Loop test bench, two model based control approaches are compared. For this purpose, simplified and detailed models of a heat pump and a thermal energy storage device are developed and used with different optimization techniques (MILP and GA). These two approaches differ in terms of

their application, computing time as well as accuracy. In general, optimization based control strategies allow a shifting of the electrical loads to low price phases. Assuming a stock market based electricity tariff for private households, the resulting cost savings are quite low. Compared to heat led operation the average cost reduction is less than 1 % per day.

EINLEITUNG

Wärmepumpen (WP) stellen eine vielversprechende Alternative zur Wärmebereitstellung in Gebäuden dar. Unter Verwendung von Strom aus regenerativen Energien können sie einen entscheidenden Beitrag zur Sektorenkopplung und zum Ausbau der Erneuerbaren Energien leisten (Heinrich-Böll-Stiftung, 2018). In Kombination mit thermischen Energiespeichern (TES) ermöglichen WP Lastverschiebungen, da zeitweise überschüssiger Strom in Form von Wärme gespeichert und diese zu einem späteren Zeitpunkt verwendet werden kann. Eine Optimierung der Betriebszeiten durch gezieltes Zuschalten von WP ermöglicht somit die fluktuierende und nicht direkt steuerbare Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen (z. B. Sonne und Wind) besser zu nutzen. Zur Erstellung eines optimierten Betriebsplans bieten sich modellprädiktive Regelstrategien (MPC) an, die Modelle der Anlagentechnik in Kombination mit Prognosedaten (bspw. Wetter-, Heizlast- und Strompreisprognose) berücksichtigen. Im Vergleich zu einer konventionellen wärmegeführten Anlagensteuerung werden dabei externe Einflüsse (flexibler Stromtarif, Verfügbarkeit eigens produzierten Stroms etc.) hinzugezogen.

Vorteile einer modellprädiktiven Regelung von geothermischen WP im Gebäudebereich werden u.a. in (Hoogmartens et al., 2012) und (Verhelst,

2012) aufgezeigt. In (Halvgaard et al., 2012) und (Finck et al., 2017) werden modellprädiktive Strategien zur Einbindung von WP in ein Smart Grid simulativ untersucht. In (Halvgaard et al., 2012) zeigt der optimierte Betrieb einer geothermischen WP unter Verwendung eines flexiblen Strompreises Stromkostensparnisse von 25 - 35 % im Vergleich zu einer traditionellen WP-Steuerung mit konstantem Strompreis. Auch in (Finck et al., 2017) kann mittels MPC für ein System aus einer modulierenden WP und einem TES unter Verwendung eines variablen Strompreises im Vergleich zu einer WP ohne TES eine Stromkostensparnis von bis zu 44 % erzielt werden.

Da modellprädiktive Regelstrategien Modelle des zu optimierenden Systems benötigen, muss zunächst die Frage nach der Modellierungstiefe sowie dem resultierenden Parametrierungsaufwand beantwortet werden. Detailliertere Modelle liefern meist genauere Ergebnisse, erfordern jedoch auch einen höheren Parametrierungsaufwand sowie höhere Rechenzeiten.

Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei MPC-Ansätze zur Steuerung von WP verglichen. Im ersten Fall wird eine detaillierte Modellierung der Anlagentechnik verfolgt. Für den zweiten Ansatz werden einfache Modelle gewählt. Die Komplexität der Anlagenmodelle wirkt sich auf die Wahl des Optimierungsalgorithmus aus. Somit wird für den detaillierten Ansatz ein genetischer Optimierungsalgorithmus (GA) in MATLAB (MathWorks, 2015) verwendet, da dieser auch nicht lineare Modelle verarbeiten kann. Die einfachen Modelle der WP und des TES werden in einem Mixed-Integer Linear Programming (MILP) Solver implementiert. Die Vor- und Nachteile beider Ansätze werden im Rahmen dieser Arbeit analysiert und diskutiert. Beide Ansätze werden an einem Hardware-in-the-Loop Prüfstand (HIL-Prüfstand) über einen Zeitraum von sechs Stunden getestet und die Ergebnisse gegenübergestellt. Zusätzlich werden vier Tagesoptimierungen durchgeführt, um mögliche Kosteneinsparungspotentiale besser beurteilen zu können.

METHODISCHE VORGEHENSWEISE

Hardware-in-the-Loop Prüfstand

Der verwendete HIL-Prüfstand ermöglicht das Testen thermischer Erzeugungsaggregate unter realistischen Bedingungen. Mit Hilfe einer steu-

erbaren Wärmequelle und Wärmesenke kann eine thermische Leistung zur Verfügung gestellt sowie abgenommen werden. Für die in dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen kommt eine geothermische WP in Kombination mit einem TES zum Einsatz.

Die WP verfügt über eine thermische Leistung von 10,5 kW (Soleeintritt: 0 °C / Heizungswasseraustritt: 45 °C), einen Coefficient of Performance (COP) von 3,68 und eine elektrische Leistungsaufnahme von 2,84 kW (Glen Dimplex, 2018). Der verwendete Wärmespeicher hat ein Füllvolumen von 500 l. Der Prüfstand ist in Abbildung 1 dargestellt.

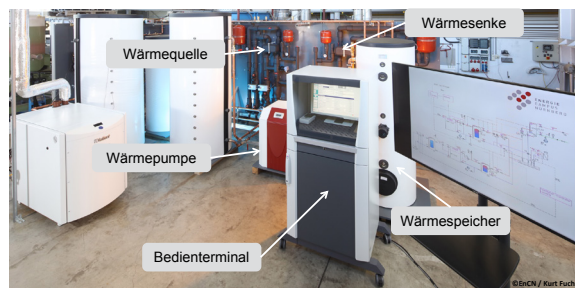


Abbildung 1: Hardware-in-the-Loop Prüfstand

Modellbildung

Die Ableitung eines optimierten Betriebsplans der Wärmeerzeugung erfordert Modelle, die das zu erwartende Betriebsverhalten prognostizieren können. Hierzu wurden Berechnungsmodelle der WP sowie des TES in MATLAB erstellt.

Wärmepumpe

Das entwickelte WP-Modell bildet die geothermische Sole-/Wasser-WP ab. Zur Modellentwicklung wurden Messdaten des HIL-Prüfstands verwendet. Wie bereits beschrieben, werden zwei Modelle für die WP entwickelt, die sich hinsichtlich ihrer Modellkomplexität unterscheiden.

Das einfache Modell zeichnet sich lediglich durch die Angabe der maximalen thermischen Leistung sowie den in diesem Betriebszustand vorhandenen COP aus. Da die Leistungsaufnahme und die Wärmeerzeugung der WP von der Verdampfungs- und Verflüssigungstemperatur abhängen, wird für das einfache Modell der mittlere Temperaturbereich gewählt. Das System wird mit einer maximalen Speichertemperatur von 55 °C und einer minimalen Speichertemperatur von 45 °C betrieben, die Soletemperatur

wird mit ca. 10 °C annähernd konstant gehalten. Somit ergeben sich eine mittlere thermische Leistung ($\dot{Q}_{th,GWP,simple}$) von 10,88 kW, eine mittlere elektrische Leistung ($P_{el,GWP,simple}$) von 3,0 kW und ein mittlerer COP von 3,6.

Bei dem detaillierten Modell fließen die Verflüssigungs- und Verdampfungstemperaturen in die Leistungsermittlung mit ein. Somit kann das Modell individuell auf die bestehenden Temperaturverhältnisse eingehen. Die Modellparametrierung erfolgt auf Basis der in Tabelle 1 dargestellten Messdaten.

Tabelle 1: Leistungsdaten der Wärmepumpe

Eintritts- temperaturen in °C Sole / Heizung	Th. Leistung in kW	El. Leistung in kW	COP
5/30	11	2,3	4,8
5/40	10,4	2,7	3,9
5/50	9,7	3,0	3,2
10/30	12,5	2,4	5,2
10/40	12,1	2,6	4,7
10/50	11,2	3,0	3,7

Mit Hilfe der Messdaten aus Tabelle 1 werden zwei Parametersätze (b_n) auf Basis multipler linearer Regression in MATLAB ermittelt. Gleichung (1) in Kombination mit den entsprechenden Parametersätzen dient zur Berechnung der thermischen bzw. elektrischen Leistungsaufnahme. Gleichung (1) ist eine Modifikation des Modells einer Kompressionswärmepumpe nach (Wetter et al., 1996).

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{th,GWP,detail} \text{ bzw. } P_{el,GWP,detail} = & b_1 + b_2 \cdot g_{evap,norm} + \dots \\ & + b_3 \cdot g_{cond,norm} + b_4 \cdot g_{evap,norm} \cdot g_{cond,norm} + \dots \\ & + b_5 \cdot g_{evap,norm}^2 + b_6 \cdot g_{cond,norm}^2 \end{aligned} \quad (1)$$

mit:

$$g_{evap/cond,norm} = \frac{g_{evap/cond}}{273,15} + 1 \quad (2)$$

Tabelle 2 zeigt die ermittelten Parameter, die im Weiteren für das detaillierte WP-Modell verwendet werden, sowie die jeweiligen Determinati-

onskoeffizienten (R^2). Anhand der errechneten thermischen Leistung und eines konstanten Heizungswassermassenstroms wird die entsprechende Vorlauftemperatur der Wärmepumpe ermittelt.

Tabelle 2: Parameter zur Berechnung der Leistungen

	\dot{Q}_{th} ($R^2=0,998$)	P_{el} ($R^2=0,983$)
b_1	-159,46	-26,96
b_2	0	0
b_3	238,86	42,77
b_4	$1,55 \cdot 10^{-11}$	-74,61
b_5	41,65	41,63
b_6	-111,92	18,65

Thermischer Pufferspeicher

Das einfache Modell des TES wird durch einen einzelnen Kapazitätsknoten dargestellt, so dass der thermische Speicher als ideal durchmischt angesehen wird. Zu- bzw. abgeführte thermische Leistung wird in diesem Knoten bilanziert und es wird geprüft, ob die vorgegebene Speicherkapazität eingehalten wird. Auf Basis des Füllvolumens, des Speichermediums (Wasser $c_p = 4180 \text{ J/(kgK)}$ / $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$) sowie der Temperaturgrenzen ($\vartheta_{max} = 55 \text{ °C}$ / $\vartheta_{min} = 45 \text{ °C}$) kann die thermische Speicherkapazität ermittelt werden.

$$Q_{th,Kap} = V_{speicher} \cdot \rho_{Wasser} \cdot c_{p,Wasser} \cdot (g_{max} - g_{min}) \quad (3)$$

Aufgrund der vorgegebenen Temperaturspreizung von 10 K kann eine thermische Energiemenge von 5,8 kWh in dem TES gespeichert werden. Die Wärmeverluste werden konstant mit 0,018 kW angenommen.

Für das detaillierte Speichermodell wurde ein Schichtenspeichermodell erstellt, wie es in (Becker, 2006) beschrieben wurde. Das verwendete Speichermodell besitzt drei Temperaturschichten deren aktuelle Temperatur nach folgender Gleichung berechnet wird:

$$\dot{g}_i = C \cdot (\sum \dot{Q}_{konv} + \sum \dot{Q}_{kond} + \sum \dot{Q}_{mix} + \sum \dot{Q}_{verlust}) \quad (4)$$

mit:

$$\dots\dots\dots C = \left(\frac{V_{Speicher}}{k} \cdot \rho_{Wasser} \cdot c_{p,Wasser} \right)^{-1} \quad (5)$$

Der Wärmetransport durch Konvektion (Lade- und Entladeleistung) wird in der Variablen \dot{Q}_{konv} zusammengefasst. Den Wärmeaustausch zwischen den Speicherschichten ($k = 3$) durch Wärmeleitung stellt \dot{Q}_{kond} und die Speicherverluste über die Oberfläche $\dot{Q}_{Verlust}$ dar. Die Speicher- verluste werden auf Basis einer konstanten Um- gebungstemperatur von 20 °C, einem U-Wert von 0,3 W/(m²K) und einer Speicher- oberfläche von 5,4 m² ermittelt. Die Vermischung der Tem- peraturschichten wird durch die Variable \dot{Q}_{mix} beschrieben. Diese ist besonders wichtig, wenn sich der Einlass der WP nicht in der obersten Schicht befindet und somit die oberste Schicht nicht zwingend die wärmste Schicht darstellt. Dies kann ebenfalls beim Einsatz elektrischer Heizstäbe vorkommen, die meist im mittleren Bereich des Speichers integriert sind.

Optimierungsumgebung

Der Optimierungsansatz mit einfachen Modellen wurde in MATLAB in eine MILP-Umgebung implementiert. Dieser Optimierungsalgorithmus ist in der Lage eine gemischt-ganzzahlige Optimierung durchzuführen und dabei lineare Nebenbedingungen zu beachten. Vorteile dieses Optimierers sind die schnelle Rechenzeit ($t_{opt,mean} < 1$ s) sowie die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Ein Nachteil ist, dass die Modelle sowie die Kostenfunktion durch lineare Gleichungen darstellbar sein müssen. Aus diesem Grund eignet sich dieser Optimierer nicht für die Implementierung des detaillierten Wärmepumpenmodells.

Hierzu wurde ein weiterer Optimierungsansatz gewählt. Dieser verwendet einen genetischen Optimierungsalgorithmus (GA) in MATLAB, der nach dem Prinzip der Evolutionstheorie arbeitet. Vorteil dieses Optimierers ist, dass er auch Funktionen höheren Grades verarbeiten kann. Nachteilig sind zum einen die längeren Rechenzeiten ($t_{opt,mean} = 25,9$ s). Des Weiteren liefert der genetische Algorithmus nicht zwingend reproduzierbare Ergebnisse trotz gleicher Randbedingungen.

Für die Untersuchung der Optimierungsansätze werden ein Optimierungs- und Prognosehorizont von sechs Stunden gewählt. Um auf eventuelle Störgrößen eingehen zu können, erfolgt alle 15 Minuten eine gleitende Optimierung. In Summe werden bei einer Betriebszeit des HIL- Prüfstands von sechs Stunden somit 24 Anla-

genfahrpläne erstellt. Eventuelle Störgrößen können Ungenauigkeiten der Modelle oder beispielsweise Abweichungen von der thermischen Lastprognose sein.

Beide Optimierungsansätze verwenden folgende Kostenfunktion:

$$K = \sum_{t=1}^n (P_{el,WP,t} \cdot timestep \cdot k_{el,t}) \quad (6)$$

Gleichung (6) ermittelt die Kosten, welche sich durch die von der WP aufgenommene elektrische Leistung ($P_{el,WP,t}$) je Zeitschritt ergeben. Dabei stellt $k_{el,t}$ den Strompreis zum jeweiligen Zeitschritt dar. Ziel der Optimierung ist es, die Betriebskosten über den Optimierungszeitraum zu minimieren. Dabei müssen jedoch die Nebenbedingungen der Optimierung stets erfüllt werden. Diese sind die Deckung der thermischen Leistung sowie das Einhalten der Temperaturgrenzen des Speichers ($\vartheta_{max} = 55$ °C und $\vartheta_{min} = 45$ °C).

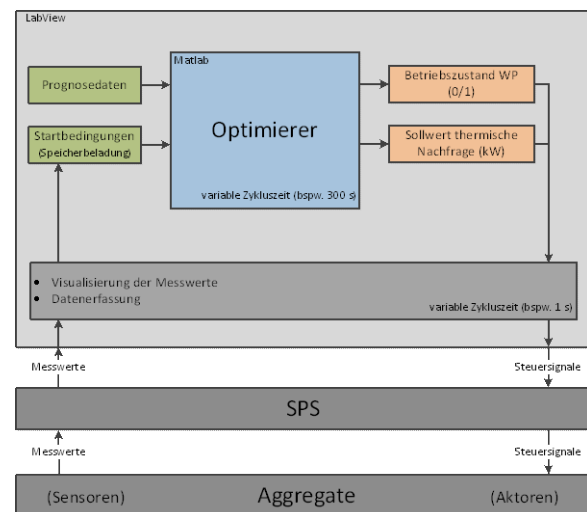


Abbildung 2: Schematische Darstellung Optimierungsablauf

Die Regelung und Steuerung des Prüfstands sowie der Hardwarekomponenten erfolgt mit Hilfe der Software LabVIEW (National Instruments, 2015). Hier ist neben einer grafischen Nutzeroberfläche, die das Beobachten der Messdaten und die manuelle Steuerung der Aggregate ermöglicht, auch die Optimierung implementiert. Zu Beginn jedes Zeitschritts (alle 15 Minuten) ruft LabVIEW die Optimierung in MATLAB auf und liefert dabei aktuelle Messdaten (Speichertemperaturen) sowie aktualisierte

Last- und Preisprognosen. Abbildung 2 zeigt den zeitlichen Ablauf der Prüfstandssteuerung.

Für die Erfassung des aktuellen Ladezustands des thermischen Speichers ist dieser mit drei gleichmäßig verteilten Temperatursensoren ausgestattet. Für das vereinfachte Speichermodell wird aus den drei Messwerten die mittlere Speichertemperatur gebildet. Nach Abschluss der Optimierung erhält LabVIEW Sollwerte für die WP (AN/AUS) und für die abzufahrende thermische Last, welche im nachfolgenden Kapitel beschrieben wird. Die Ansteuerung sowie die Messdatenerfassung erfolgt mit Hilfe einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS). Bei dem für die Optimierung verwendeten Prozessor handelt es sich um einen Intel Core i7-4770T mit 2,5 GHz und 32 GB RAM.

Testszenarien

Zur Evaluierung der beiden Optimierungsansätze werden die in Abbildung 3 dargestellten Profile für die thermische Last und einen zweistufigen Strompreis angenommen. Die grau hinterlegten Abschnitte markieren dabei die Hochpreisphasen (HT: Hochtarif, NT: Niedertarif).

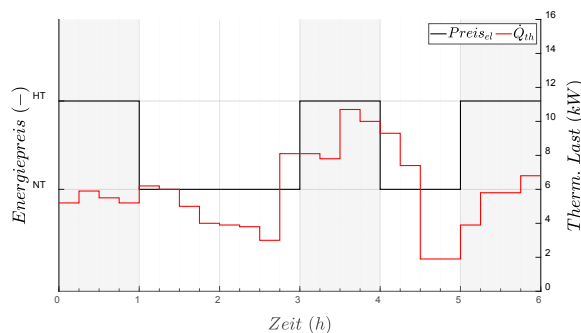


Abbildung 3: Szenarien für Strompreis und thermische Last

Die Prognosedaten enthalten Werte im 15 Minuten-Takt. Wie bereits beschrieben, generiert jede Optimierung einen Fahrplan für einen Optimierungshorizont von sechs Stunden und benötigt somit auch entsprechende Prognosedaten. Um auch im letzten Zeitschritt ausreichend Daten zur Verfügung zu haben wurden die Prognosedaten dupliziert, so dass sich ein Datensatz von insgesamt zwölf Stunden ergibt.

ERGEBNISANALYSE

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der untersuchten Optimierungsansätze den

Messdaten des realen Betriebs gegenübergestellt und evaluiert.

Abbildung 5 zeigt die Schaltsignale der WP (AN/AUS). Zum einen ist das tatsächliche am Prüfstand abgefahrte Schaltsignal sichtbar (rote Linie). Des Weiteren ist das prognostizierte Schaltsignal des ersten Optimierungslaufs zum Zeitpunkt $t = 0$ dargestellt.

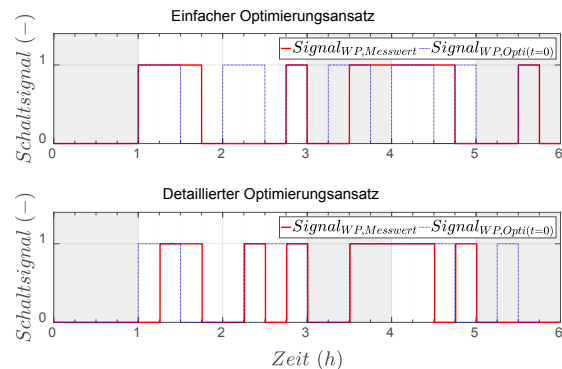


Abbildung 4: Schaltsignale der Wärmepumpe

Aus Abbildung 5 wird deutlich, dass sich der tatsächliche Betrieb der WP von dem prognostizierten Verlauf der ersten Optimierung unterscheidet. Durch das Prinzip des gleitenden Optimierungs- und Prognosehorizonts ändert sich der optimale Fahrplan der WP. Die gleitende Optimierung besitzt den Vorteil, dass auf Ungenauigkeiten der Modelle sowie fehlerhafte Prognosen reagiert werden kann.

Abbildung 5 zeigt ebenfalls, dass beide Optimierer einen Betrieb während der Hochpreisphase meiden. Auf Grund der begrenzten Kapazität des thermischen Speichers sowie einer definierten Mindestvorlaufzeit von 45 °C zum Wärmeverbraucher kann der Betrieb jedoch nicht komplett in die Niedrigpreisphase verschoben werden (siehe Betrieb zwischen Stunde 3 und 4). Dies wird auch in Abbildung 6 deutlich, die die thermische Wärmeleistung sowie die elektrische Leistungsaufnahme der WP zeigt. Neben den realen Messdaten sind hier auch die Modellprognosen der gleitenden Optimierung dargestellt. Die Messdaten zeigen, dass die thermische Leistung und die elektrische Leistungsaufnahme der WP nicht konstant sind. Dies ist hauptsächlich durch die schwankenden Temperaturen auf der Verflüssigerseite der WP zu erklären, da die Soletemperatur auf der Verdampferseite in diesem Versuch nahezu konstant bei 10 °C gehalten wird. Es wird deutlich,

dass es gerade nach längeren Betriebszeiten zu einer Verschlechterung des COP der WP kommt. Die thermische Leistung sinkt und die elektrische Leistungsaufnahme steigt an. Dies ist auf eine steigende Temperatur im TES zurückzuführen.

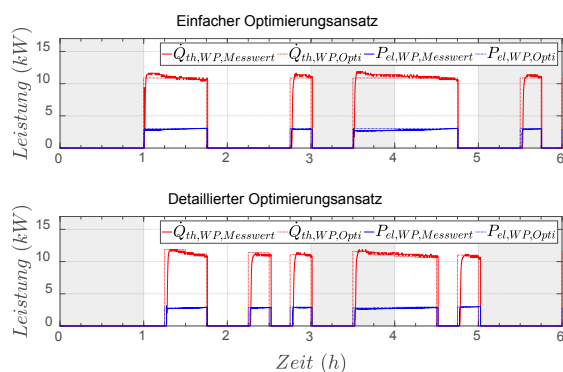


Abbildung 5: Thermische und elektrische Leistung der WP

Abbildung 6 verdeutlicht, dass das WP-Modell des vereinfachten Optimierungsansatzes lediglich konstante Leistungsdaten liefert, wohingegen das detailliertere Modell auf die schwankenden Temperaturbedingungen reagiert.

Eine weitere zentrale Komponente des Gesamtsystems ist der TES, der für eine Entkopplung der Wärmeerzeugung und der Wärmenachfrage sorgt. Hierdurch ist ein flexibler Betrieb der WP erst möglich. In Abbildung 7 wird der zeitliche Verlauf des Speicherfüllstands (State of Charge, SOC) dargestellt. Hierbei ist zu erwähnen, dass sich die Berechnungen des SOC im einfachen und detaillierten Ansatz unterscheiden. Im einfachen Modell wird anhand des ermittelten Energieinhaltes in kWh der aktuelle SOC berechnet. Für das detaillierte Modell, in dem auch die Temperaturen der einzelnen Schichten berechnet werden, wird jede Speicherschicht unabhängig voneinander betrachtet. Liegt eine Schichttemperatur unter 45 °C wird der entsprechende Energieinhalt dieser Schicht als 0 kWh interpretiert.

Es wird deutlich, dass beide Modelle den realen Verlauf qualitativ gut abbilden. Beide Optimierungsansätze beladen den TES im Bereich der Niedrigpreisphase (Stunde 1 bis 3), um in der darauffolgenden Hochpreisphase die gespeicherte Energie nutzen zu können. Nach 3,5 Stunden ist jedoch der Speicher soweit entladen, dass ein Zuschalten der WP trotz Hochpreis-

phase notwendig ist, um eine Deckung der thermischen Nachfrage zu garantieren.

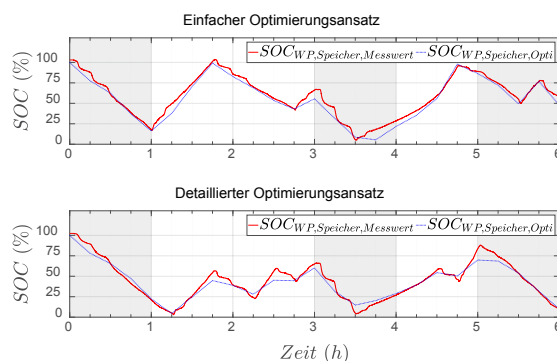


Abbildung 6: State of Charge des thermischen Speichers

Der beschriebene Versuchsablauf zeigt, dass beide Ansätze eine Verschiebung der Betriebszeiten der Wärmepumpe hin zu Zeiten des Niedrigtarifs bewirken und diese am Prüfstand abgefahren werden können. Um eine Abschätzung von potentiellen Kosteneinsparungen durchzuführen, wurden vier Tage (je 24 h) unabhängig voneinander betrachtet. Hierbei wurde jeweils der gesamte Prognosezeitraum von 24 h optimiert. Als Eingangsgrößen wurden vier verschiedene börsenorientierte Preisprofile sowie ein gleichbleibendes Lastprofil verwendet. Die Preisprofile spiegeln reale Daten der Stadtwerke Haßfurt für vier Tage in der Heizperiode wieder (Stadtwerke Haßfurt, 2018). Preisprognose und Lastprofil sind in Abbildung 7 und Abbildung 8 zu sehen. Die Preisprofile weisen unterschiedlich große Schwankungen auf.

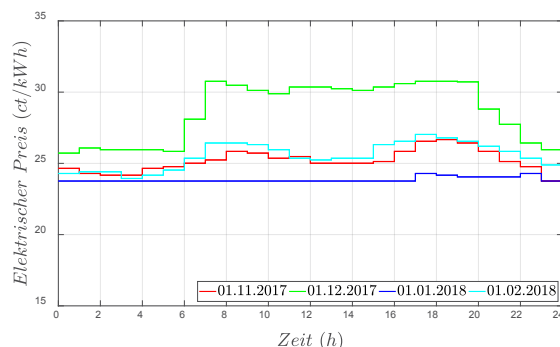


Abbildung 7: Flexible Preisprofile

Als Referenzfall wird ein wärmegeführter Betrieb der WP mit thermischem Speicher herangezogen. Die WP wird immer bei einem SOC von 0 % aktiviert und bei einem SOC von 100 % deaktiviert. Der aktuelle Strompreis wird bei dieser Betriebsweise nicht beachtet. Für die

wärmegeführte Betriebsweise kommen die gleichen Modelle wie bei dem vereinfachten Optimierungsansatz zum Einsatz.

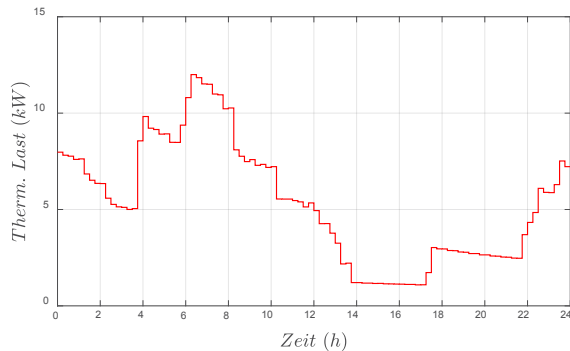


Abbildung 8: Thermisches Lastprofil - Tag

Abbildung 9 zeigt beispielhaft ein Optimierungsergebnis des vereinfachten Ansatzes für das Preisprofil des 01. Dezember 2017. Es wird auch hierbei deutlich, dass der Optimierer eine Betriebsweise in Zeiten hoher Preise meidet. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass die Wärmepumpe über den Tag verteilt sehr viele Schaltzyklen durchläuft. Dies wirkt sich negativ auf die Lebensdauer des Kompressors aus. Durch den Einsatz eines größeren thermischen Speichers könnte die Taktung reduziert und das Lastverschiebungspotential weiter gesteigert werden.

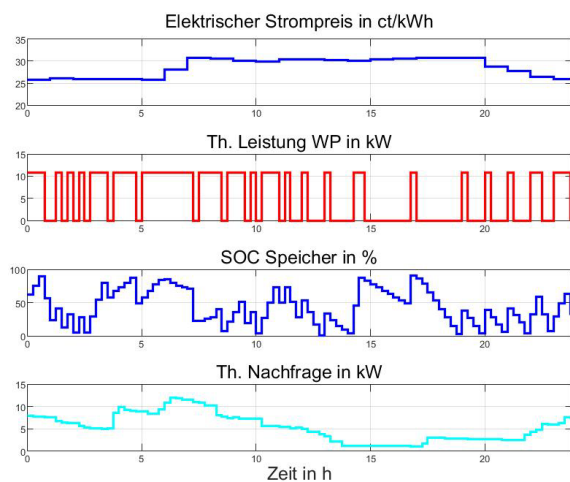


Abbildung 9: Einfacher Optimierungsansatz – Dezember

Tabelle 3 zeigt einen Kostenvergleich der verschiedenen Betriebsweisen. Da der genetische Optimierer bei jeder Optimierung unterschiedliche Ergebnisse liefert, wurden hier jeweils fünf Optimierungsläufe durchgeführt und anschließend der Mittelwert der Betriebskosten gebildet.

Tabelle 3: Kostenvergleich Tagesoptimierung

	Wärmegeführter Betrieb	Einfacher Optimierungsansatz	Detaillierter Optimierungsansatz
01. Nov. 2017	8,59 €	8,52 €	8,47 €
01. Dez. 2017	9,66 €	9,59 €	9,59 €
01. Jan. 2018	8,17 €	8,14 €	8,09 €
01. Feb. 2018	8,69 €	8,63 €	8,63 €

Es zeigt sich, dass die optimierten Betriebsweisen eine geringe Kostenersparnis gegenüber der wärmegeführten Betriebsweise aufweisen. Diese liegt durchschnittlich lediglich bei 0,07 € pro Tag. Ein Grund für die geringe Einsparung ist zum einen die Größe des thermischen Speichers. Ein größerer Speicher würde es erlauben höhere Mengen thermischer Energie in Zeiten geringer Strompreise zu erzeugen und diese für Hochpreisphasen vorzuhalten. Ein weiterer Grund ist, dass die Schwankungen des Strompreises im Tagesverlauf lediglich bei etwa 5 ct/kWh liegen.

ZUSAMMENFASSUNG

Generell ist zu sagen, dass die untersuchten modellprädiktiven Regelstrategien für WP, in Kombination mit TES, Prognosen und flexiblen Stromtarifen, Kosteneinsparungspotentiale bieten. Dabei ermöglichen sie eine Verschiebung des WP-Betriebs hin zu Zeiten niedriger. Mit der aktuellen Preisstruktur fallen die Einsparung jedoch sehr gering aus.

In den Testläufen liefern beide Optimierungsansätze sowie die implementierten Modelle zufriedenstellende Ergebnisse. Der einfache Optimierungsansatz bietet die Vorteile eines geringen Parametrierungsaufwandes, kurzer Rechenzeiten sowie der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Nachteilig ist, dass gerade das Modell der geothermischen WP auf einen definierten Betriebspunkt ausgelegt ist. Da in dem hier

gezeigten Versuchsdurchlauf die Soleeintrittstemperatur nahezu konstant bleibt, liefert das vereinfachte Modell auch hier zufriedenstellende Ergebnisse. Schwanken jedoch die Betriebstemperaturen auf der Sole- und der Heizungswasserseite der Wärmepumpe stärker, resultiert dies in höheren Modellabweichungen.

Hier bietet der detaillierte Optimierungsansatz Vorteile. Da das WP-Modell die Sole- und Heizungswassereintrittstemperatur zur Berechnung der thermischen und elektrischen Leistung berücksichtigt, liefert es zuverlässigere Ergebnisse über einen großen Betriebsbereich. Auch das TES-Modell ist in der Lage dynamisch auf äußere Einflüsse (bspw. Umgebungstemperatur) einzugehen. Nachteilig hier sind jedoch wesentlich höhere und nicht konstante Rechenzeit des genetischen Optimierungsalgorithmus sowie die Nichtreproduzierbarkeit der Ergebnisse.

In zukünftigen Forschungsarbeiten sollen die Regelstrategien unter stärker schwankenden Betriebsbedingungen getestet werden. Zusätzlich soll untersucht werden, wie sich eine Erhöhung der Speichergöße, der Anzahl der modellierten Speicherschichten sowie eine entsprechende Erhöhung der Sensoranzahl im thermischen Speicher (aktuell drei Schichten bzw. Sensoren) auf die optimierte Betriebsweise auswirken. Auf Grund der geringen Einsparungen unter Verwendung aktuell verfügbarer flexibler Stromtarife wird zukünftig der Fokus auf die Optimierung des Wärmepumpenbetriebs in Kombination mit Photovoltaikanlagen gelegt.

DANKSAGUNG

Die beschriebene Arbeit wurde im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts „SENSIBLE – Storage-enabled sustainable energy for buildings and communities“ durchgeführt. Das Projekt wird im Rahmen des Forschungs- und Innovationsprogramms Horizon2020 der Europäischen Union, unter der Grant Agreement Nummer 645963, gefördert.

LITERATUR

Becker, R. 2006. Optimierung thermischer Systeme in dezentralen Energieversorgungsanlagen. Ph. D. thesis, Technische Universität Dortmund.

Finck, C., Li, R., Zeiler, W. 2017. Operation of heat pumps for smart grid integrated

buildings with thermal energy storage. In: Proceedings of 12th IEA Heat Pump Conference, The 12th IEA Heat Pump Conference 2017, Rotterdam, June 2017.

Glen Dimplex. 2018. Datenblatt SI 11TU. Online: <http://www.dimplex.de/pdf/de/SI11TU.pdf>. (abgerufen am 27.04.2018).

Halvgaard, R., Poulsen, N. K., Madsen, H., Jørgensen, J. B. 2012. Economic Model Predictive Control for Building Climate Control in a Smart Grid, 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), Washington, DC, 2012, pp. 1-6.

Heinrich-Böll-Stiftung, Green European Foundation, European Renewable Energies Federation, Le Monde diplomatique, 2018. Energieatlas 2018, Berlin.

Hoogmartens, J., Helsen, L. 2012. GEOTABS - Towards optimal design and control of geothermal heat pumps combined with thermally activated building systems in offices. Final Report, Katholieke Universiteit Leuven.

MathWorks. 2015. MATLAB. Version R2015a.

National Instruments 2015. LabVIEW. Version 2015.

Stadtwerke Haßfurt. 2018. Stromtarif haStrom EEX. Online: <https://plusservices.de/300/energy/hastromeex> (abgerufen am 02.08.2018)

Verhelst, C. 2012. Model predictive control of ground coupled heat pump systems for office buildings. Dissertation. Katholieke Universiteit Leuven, Leuven. Department of Mechanical Engineering.

Wetter, M., Afjei, Th. 1996. TRNSYS TYPE 401 Kompressionswärmepumpe inklusiv Frost- und Taktverluste, Zentralschweizerisches Technikum Luzern, Horw Schweiz.

UNTERSTÜTZUNG KOMMUNALPLANERISCHER PROZESSE MIT CITYGML-BASIERTER ANBINDUNG MODELICA-GETRIEBENER QUARTIERSSIMULATIONEN

S. Ebertshäuser¹, P. von Both¹, M. Wirtz², T. Brüggemann³, S. Ochse³, M. Lauster², A. Malhotra⁴, J. Frisch⁴, P. Remmen², D. Müller², C. van Treeck⁴ und S. Wallner¹

¹ Building Lifecycle Management (BLM), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Germany,
² Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate (EBC), RWTH University, Aachen, Germany,
³ GEF Ingenieure AG, Leimen, Germany,
⁴ Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen (E3D), RWTH University, Aachen, Germany

KURZFASSUNG

Eine integrale Planung städtischer (Energie-) Systeme bedarf einer planungsbegleitenden Unterstützung durch IT-basierte Planungs- und Simulationenwerkzeuge. Die durchgängige Anwendung dieser digitalen Planungshilfsmittel wird allerdings bislang insbesondere durch den sehr hohen Aufwand bei der Spezifizierung und Erfassung benötigter Datengrundlagen sowie eine mangelhafte Interoperabilität zwischen den Systemen gehemmt.

Im Rahmen eines Forschungsverbundprojektes wird dieses Problemfeld mittels praxisbezogener Prozessanalysen genauer spezifiziert und die technische und fachliche Integration durch die prozessbezogene Spezifikation relevanter Informationsbedarfe sowie die Entwicklung einer darauf aufbauenden, bidirektionalen Schnittstelle auf Basis des etablierten virtuellen Stadtmodellstandards CityGML verbessert.

Als exemplarisches Anwendungsszenario innerhalb kommunaler Planungsprozesse wurde die Ausweisung von Vorranggebieten der Fernwärmenutzung basierend auf einer räumlichen Analyse des Wärmebedarfs für verschiedene Entwicklungsszenarien mittels einer bidirektionalen standard-basierten Koppelung von CityGML und Modelica ausgearbeitet.

ABSTRACT

A process accompanying support from side of IT based planning and simulation tools is needed for an integrated planning of urban (energy) systems. Up to now especially tedious effort for specification and collection of necessary information base as well as insufficient interfaces and deficient interoperability between systems inhibit a consistent application of these planning aids throughout the process.

This problem area is further specified by practice-related process analysis in the framework of a joint research project in order to improve the technical and professional integration by process-related specification of relevant information demand and based upon that develop a bidirectional interface as extension to the established CityGML standard. A meaningful application scenario for a bidirectional coupling of the standards CityGML and Modelica has been worked out addressing the creation of preferential sites to the (exclusive) use of district heating based on spatial analyses of heat demand sketching possible different development scenarios.

EINLEITUNG

Simulationen auf Stadtebene, beispielsweise für die Erstellung von Prognosen (Wärmeatlanten etc.) oder dynamische Energieflussberechnungen, gehen bislang einher mit einem sehr hohen Aufwand für die Spezifikation und Erfassung der benötigten Datenbasen. Unzureichend unterstützte oder fehlende Standards zugunsten einer vereinheitlichten Verfahrensmethodik sowie zur technischen Umsetzung erschweren ein generisches Vorgehen bei der Modellierung. In der Praxis beeinträchtigen zahlreiche Medienbrüche bei der inter- und intradisziplinären Abstimmung sowie eine zumeist mehrfach redundante Datenhaltung und -erfassung die Zeit- und Kosteneffizienz kommunaler Planungsprozesse. Bisher sind jedoch noch keine zielführenden Ansätze zur Koppelung von semantischen Stadtmodellen, wie dem dazu prädestinierten Format CityGML, mit objektorientierten Simulationssprachen (bspw. Modelica) erkennbar.

Das gemeinsam mit der RWTH Aachen (E3D sowie EBC) und der GEF Ingenieur AG durch-

geführte Projekt „EnEff:Stadt ModelSim“ setzt sich daher zum Ziel, die Lücke zwischen der Entwicklung und Anwendung von IT-gestützten Planungshilfsmitteln auf Stadtquartiersebene nachhaltig zu verringern. Durch die Realisierung eines durchgängigen intelligenten Datenflusses sollen die Einstiegshürden zu modellgestützten Planungs- und Simulationswerkzeugen drastisch gesenkt werden. Mittels der Einbindung und dezidierten Weiterentwicklung des CityGML-Standards der SIG3D soll dieser Prozess eine dynamische Analyse mit Hilfe objektorientierter Simulation sowie die Rückführung von (aggregierten) Ergebnissen in das Stadtmodell unterstützen. Ein im Vorgängerprojekt ISIS (FKZ: ET12345) entwickelter Prozesspilot zur Flächennutzungs- und Sanierungsplanung dient dabei als Rahmen des Anwendungsszenarios.

LÖSUNGSANSATZ UND VORGEHEN

Um die Zielsetzungen – eine maßgebliche Reduktion des Bearbeitungsaufwands und die Qualitätsverbesserung energetischer Simulationen urbaner Systeme sowie die Realisierung konsequent modellgestützter kommunaler Planungsprozesse – zu erreichen, steht die Entwicklung einer bidirektionalen objektorientierten Schnittstelle zur Koppelung einer Modelica-basierten Simulationsumgebung mit einem erweiterten semantischen Stadtmodell im Fokus des Vorhabens.

Mit dem in Abbildung 1 dargestellten, zu erreichenden Zielszenario wird der dafür avisierte Lösungsansatz anhand eines idealisierten an-

gestrebten Soll-Prozesses verdeutlicht.

Eine kollektive und einheitliche kommunale Informationsbasis wird in einer Stadtmodell-Management-Plattform verwaltet. Dabei können verschiedene Planungszustände parallel in unterschiedlichen Detaillierungsgraden (Level of Detail) abgebildet werden sowie unterschiedliche, projekt- bzw. rollenbezogene Sichten auf den Gegenstand generiert werden. Neben der Erfassung expliziter Informationen können so auch empirische oder typologische Daten abgebildet werden. Durch intelligente, grafik- und struktur-gestützte Filtermechanismen lassen sich projektbezogene Partialmodelle für die Simulation kapseln und als valide CityGML-Datei (Inputwerte für die Modelica-Simulation) exportieren.

Die CityGML-Dateien werden anschließend in die Modelica Umgebung importiert und dienen nach manueller Erweiterung im Konvertierungs- bzw. Importmodul der konkreten Objektinstanziierung des jeweiligen Anwendungsfalls. Dabei wird auf die entsprechend dem spezifizierten Simulations-Anwendungsfall speziell im Hinblick auf die Abbildbarkeit und Koppelung der im Stadtmodell vorhandenen multiskaligen Detaillierungsebenen (LOD) erweiterte Objektbibliothek zurückgegriffen. Dadurch kann mittels des Mappings der CityGML-Klassen zu den kohärenten Klassen der Modelica-Bibliothek eine automatisierte Instanziierung für den konkreten Anwendungsfall unterstützt werden. Durch die beidseitige Modellierung unterschiedlicher Konkretisierungsstufen (von generischen, typbasierten Ansätzen in frühen Planungsphasen bis hin

zu expliziten, detaillierten Gebäudeinformationen) kann ein planungsbegleitender Optimierungsansatz im Sinne der Integralen Planung unterstützt werden.

Ausgewählte Simulationsergebnisse werden (teils aggregiert) als valides CityGML-Partialmodell aus der Simulationsumgebung exportiert. Dabei beibehaltene Bezüge auf das Ursprungsmodell er-

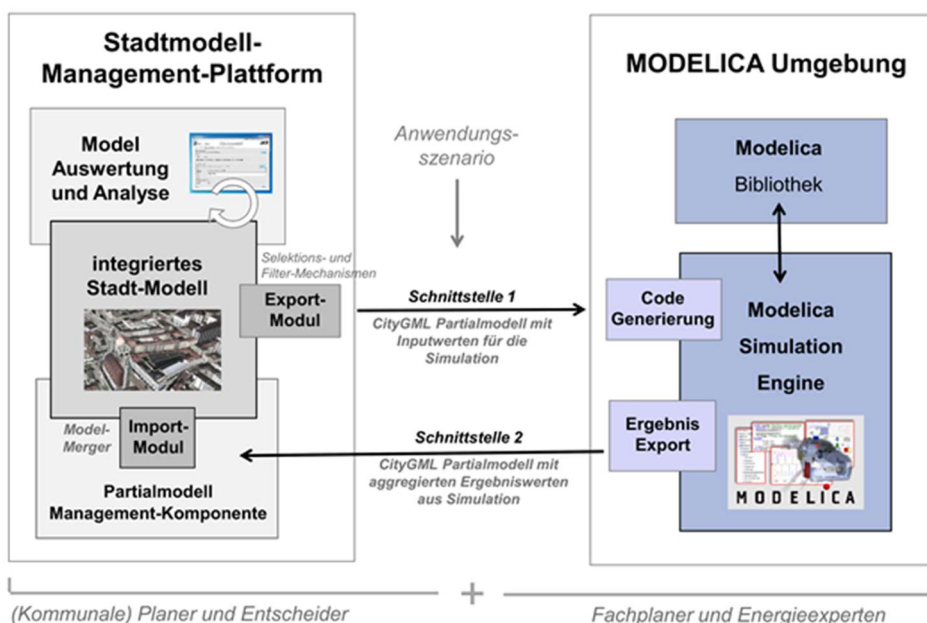


Abbildung 1 angestrebter Ziel-Prozess des Verbundvorhabens

möglichen beim Zurückspielen in die Modell-Management-Plattform eine Reintegration der simulierten Ergebnisdaten in das vorhandene Stadtmodell, das so schließlich dem Auswertungswerkzeug für ganzheitliche Analysen zugänglich gemacht werden kann. Auf den Anwendungskontext abgestimmte Konzepte zur semantischen Visualisierung, wie bspw. eine differenzierte farbliche Auszeichnung der Stadtobjekte entsprechend konkreter Ausprägungen relevanter energetischer Attribute, erleichtern dabei die Interpretation der Analyseergebnisse und den Vergleich alternierender Varianten.

Für die diesem idealtypischen Soll-Prozess unterlegte Konzeption einer bidirektionalen Kopplung von virtuellen Stadtmodellen auf der einen und Berechnungs- und Simulationswerkzeugen auf der anderen Seite soll im Vorhaben szenariobasiert die Machbarkeit sowie deren Mehrwert belegt werden.

INHALT UND THEMATISCHER AUFBAU DES BEISPIELSZENARIOS

Basis für die Entwicklung einer praxisgerechten Schnittstelle ist eine prozessbezogene Identifizierung der auszutauschenden Informationsbedarfe im Rahmen von Anwendungsfällen mit realem Praxisbezug. Zur Spezifikation und formalen Abbildung dieser Art von Datenaustauschszenarien als praxisorientierte Grundlage von Schnittstellenentwicklungen existieren für virtuelle Gebäudemodelle in der Bauwerksplanung normative Verfahren wie das *Information Delivery Manual* (IDM – ISO 29481-1:2016). Da für den kommunalen Kontext diese Methoden bislang fehlen, bietet es sich an, diese Ansätze im Rahmen des Projekts zu übertragen. Die identifizierten Prozesse und zugehörigen Akteure werden daher methodisch in BPMN (Business Process Modeling Notation) formalisiert und darauf aufbauend prozessbezogene Informationsbedarfe spezifiziert.

Unter Einbindung des Praxispartners mit langjähriger Erfahrung in der Umsetzung kommunaler energetischer Optimierungsprozesse, insbesondere im Bereich von Wärmenetzen, wurde der Anwendungsfall in der kommunalen Bauleitplanung verortet. Ein im Vorgängerprojekt entwickelter Prozesspilot zur konsistenten Abbildung aller dazugehörigen Prozesse und organisatorischen Strukturen sowie rechtlichen Bezüge diente dabei als übergeordneter Rahmen.

Vorbereitende Bauleitplanung

Im Zuge der Energiewende wurde in den letzten Jahren das Themenspektrum des Flächennutzungsplans als strategisches Instrument der Kommunalplanung erweitert. Mit der Berücksichtigung umweltbezogener Themen, insbesondere der Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP), wurde das Instrumentarium im Sinne eines ganzheitlichen Planungsansatzes erweitert.

Diese Weiterentwicklungen werden dabei vornehmlich in einem „Top-Down“-Verfahren umgesetzt, d.h. durch Änderung der für das auf Ebene der Kommune geltende Satzungsrecht maßgebenden Gesetzesvorgaben (BauGB). Mittels einer entsprechend vorgegebenen Erweiterungsprozedur können allerdings Kommunen zusätzlich auch selbst gemäß dem eigenen Bedarf die in der Planzeichenverordnung (PlanVZ) vorgegebenen generellen Festsetzungsmöglichkeiten der Flächennutzungsplanung (FNP) erweitern bzw. spezialisieren (vgl. § 5 (2) BauGB in Verbindung mit § 2 (2) PlanV 90), wie es bspw. die Stadt Esslingen als Vorreiterkommune bei der Neuaufstellung des FNP durchgeführt hat [ESS 2012]. Die dabei aus dem informellen Planungsinstrument *Energienutzungsplan* in die satzungsrechtliche Bauleitplanung aufgenommenen „Vorranggebiete Energienutzung und Energieeffizienz“ [HIL 2013] bilden einen geeigneten Rahmen für das Anwendungsbeispiel unseres Projektes. Konkret geht es um die im Rahmen der vorbereitenden Bauleitplanung durchzuführende Lokalisierung von Vorranggebieten zur Nutzung von Fernwärme.

Anwendungsfall: Identifizierung möglicher Fernwärmevorranggebiete

In der initialen Phase der Flächennutzungsplanung werden die Weichen für die im finalen Plan abzubildenden Inhalte gestellt. Die vorgegebene Vorgehensweise sieht vor, zunächst die lokal relevanten Themen zu identifizieren. In Form eines Vorentwurfes wird schließlich eine erste abgestimmte Fassung der beabsichtigten strategischen Zielstellungen der Öffentlichkeit kommuniziert, um Stellungnahmen zu ermöglichen. Sind deren Eingaben dann im Vorentwurf eingearbeitet, kann dieser als Ergebnis der ersten Phase in den Prozess der eigentlichen Entwurfserstellung eingehen.

Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt der ersten Phase „Erstellung Vorentwurf“ eines FNP Aufstellungs- bzw. Fortschreibungsverfahrens mit den vorgegebenen Schritten zur Erstellung eines Vorentwurfes als (eigenständige) Teilprozesse in BPMN. Diese beginnen nach der offiziellen Initiierung des Vorhabens zur Aufstellung bzw. Fortschreibung des Flächennutzungsplans durch die öffentliche Bekanntmachung.

Dieser Prozess besteht wiederum aus zwei Teilprozessen: Teilprozess A beinhaltet eine iterative Untersuchung der verfügbaren Informationen, welche für die Bestandsaufnahme der lokalen Ist-Situation herangezogen werden können. Darauf aufbauend wird im Teilprozess B ein Spektrum möglicher Zukunftsentwicklungen betrachtet. Die Erkenntnisse aus Ist-Analyse und Zukunftsszenarien bilden die Grundlage für die Erarbeitung von Vorschlägen für mögliche Fernwärmeverrangsgebiete, die mit (potenziellen) Versorgern und ggf. weiteren Akteuren abgestimmt und im letzten Schritt den politischen Entscheidungsträgern zur Entschlussfassung vorgelegt werden.

Im Weiteren werden diese beiden Prozesse A und B für den ModelSIM-Anwendungsfall konkretisiert.

Bestandsaufnahme und Analyse lokaler Ist-Situation (Teilprozess A)

Im ersten Teilprozess des Anwendungsfall werden alle relevanten Informationen erhoben, die eine Analyse der Wärmeversorgungsstruktur und des Wärmebedarfs möglichst gebäude-

scharf ermöglichen. Methodisch erfolgt zunächst eine Recherche zur Verfügbarkeit von Daten zur Gebäudehülle und -nutzung, zur Gebäudetechnik für Wärmeversorgung (Heizungstechnik, Energieträger, etc.) und zum Wärmeverbrauch/-bedarf. Für die Beschreibung der Gebäude sind ALKIS-Daten eine häufig genutzte Datenquelle. Die Recherche bildet die Grundlage der Entscheidung über die weitere Methodik der Modellierung: Liegen keine expliziten Daten für die Gebäudehülle (z.B. aus Bauantrag) und die Wärmeversorgung vor (z. B. Verbrauchsdaten, Energieausweis), bietet es sich an, den Gebäudebestand mit Hilfe einer Typologie zu kategorisieren. Datenlücken werden durch Schätzungen geschlossen. So wird ein Modell des Ist-Zustands generiert [BSM 2011], mit dem ein Jahreswärmebedarf für jedes Gebäude ermittelt werden kann.

Analyse Zukunftsszenarien lokale Situation (Teilprozess B)

Mit Hilfe der erstellten Datenbasis können verschiedene Szenarien möglicher zukünftiger Entwicklungen berechnet werden. Zur Ableitung von Zukunftszuständen aus der Ist-Situation bietet sich die Szenario-Methodik an. Ausgehend vom Modell für den Ist-Zustand können verschiedene zukünftige Entwicklungen mit ihren Randbedingungen definiert und anschließend berechnet werden. Für die Szenario-Definition werden Schlüsselfaktoren, welche die Entwicklung beeinflussen, identifiziert und analysiert. Durch Parametervariation werden Szenarien generiert, berechnet und die Ergebnisse

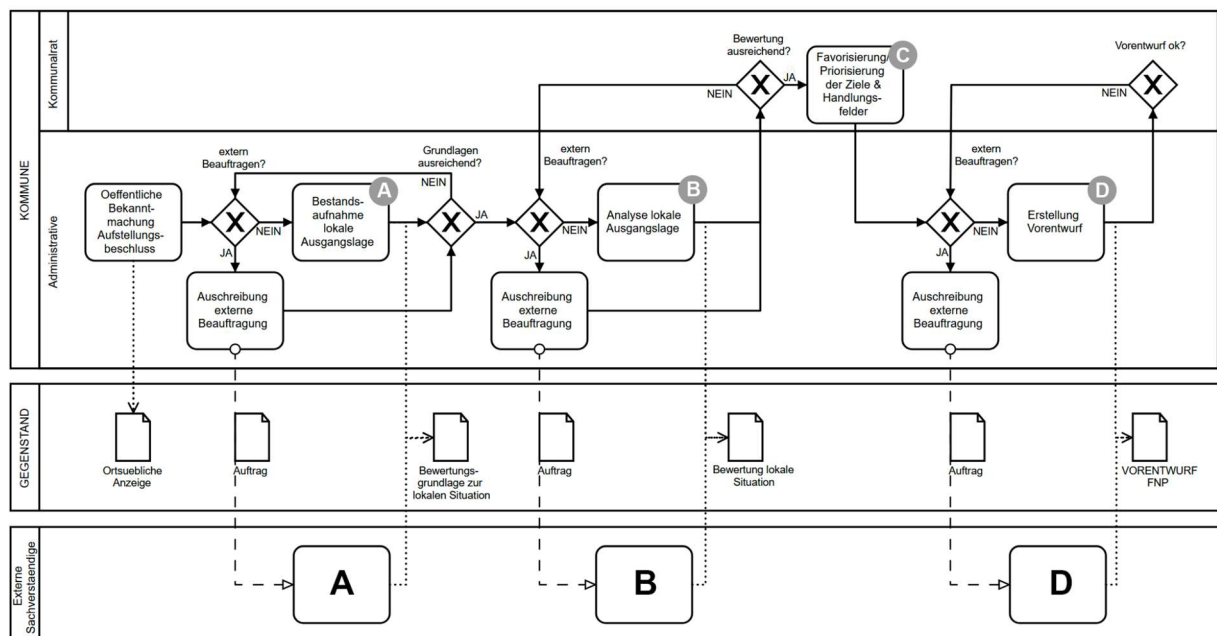


Abbildung 2 Ausschnitt FNP-Vorentwurf (BPMN)

am Ende auf den Untersuchungsgegenstand zurückübertragen [KOS 2008]. Auf dieser Informationsbasis erfolgt eine Strategieentwicklung. Typische Szenarien im Zusammenhang mit der Wärmebedarfsentwicklung sind Ziel-Szenarien mit Vorgabe eines CO₂-Ziels, eines ambitionierten Sanierungsstandards, einer Verdoppelung des Sanierungsumfangs etc.. Sie ermöglichen als Ergebnis dieses Teilprozesses Aussagen zu zukünftigen Wärmebedarfen in identifizierten Stadtgebieten, die einen Ausbau des Fernwärmenetzes dahingehend (fachlich) begründen können.

Fokus auf praxisrelevante Aspekte im Anwendungsfall

Als Grundlage für die Spezifizierung von Informationsbedarfen wurden im Anwendungsfall praxisrelevante Aspekte identifiziert und konkretisiert. So stellt bspw. der Jahresenergieverbrauch bzw. -bedarf der Bauwerke eine wichtige Größe sowohl für die Erhebung des Ist-Zustandes als auch für darauf basierende kommunale Entwicklungsszenarien dar. Hinzu kommt in beiden Teilprozessen die Berücksichtigung des Umfangs energetischer Gebäudesanierungen. Auf diesen Werten können einerseits weitere Berechnungen konkreterer Verbrauchswerte aus literaturbasierten typischen Verbräuchen basieren, wenn die Erhebung des Ist-Zustandes aufgrund lückenhaft verfügbarer Verbrauchsdaten auf (empirisch erhobenen) Daten zu einer Typologie aufbaut. Andererseits kann damit bei der Berechnung zukünftiger Energieverbräuche ein sanierungsbezogener Beiwert als Optimierungsziel gebildet werden. Des Weiteren sind Topologie und Lage des Leitungsnetzes ein wichtiger Aspekt bei der Bewertung der lokalen Ist-Situation. Hieraus lassen sich in den Entwicklungsszenarien bspw. prädestinierte Gebiete für einen Fernwärmeausbau erkennen. Neben diesen grundlegenden Aspekten spielen als Bewertungsgrundlage sowie zur Veranschaulichung der Ergebnisse weitere Aspekte als Aggregate eine Rolle. Hierzu stellen Wärmebedarfsdichte bzw. Wärmebedarfsliniendichte sowie die Wärmeleistungsdichte gewichtige Aspekte des im Anwendungsfall behandelten Gegenstands dar. Sie erleichtern das (fachliche) Bewerten der erhobenen Daten zum Ist-Zustand und verdeutlichen die in den Analysen befundenen zukünftigen Entwicklungsszenarien.

Die Behandlung dieser Aspekte wird auf Seiten der Praxis aufgrund der hohen Spezifität kommunaler Ausgangsbedingungen oftmals durch individuelles Vorgehen der Fachleute geprägt. Ziel des Projektes ist daher die Generalisierung dieser Prozesse und Inhalte als Basis einer Schnittstellenentwicklung. Einen wichtigen Schritt stellt dabei die Vereinheitlichung der Berechnungs- bzw. Simulationsworkflows in Bezug auf die oben beschriebenen Aspekte mit einer generalisierten Aufbereitung der Prozesse und Informationsbedarfe in BPMN dar. (vgl. Abbildung 3). Die BPMN-Bausteine einzelner Teilaspekte erleichtern aufgrund ihres einheitlichen/konvergenten strukturellen Aufbaus die Zusammenführung bei der Entwicklung der Gesamtschnittstelle.

KONKRETISIERUNG INFORMATIONS- BEDARFE DES ANWENDUNGSFALLES

Von entscheidender Bedeutung für beide Teilprozesse des Anwendungsfalles ist die Datenverfügbarkeit und -granularität. Da Daten zu Gebäudehülle, -technik oder -wärmeverbrauch oftmals unvollständig oder inkonsistent sind, werden zur Vervollständigung bzw. Verdichtung literaturbasierte (typologische) Daten herangezogen. Grundsätzlich können Untersuchungen auf Basis sowohl von Verbrauchsdaten zum Ist- und Entwicklungsstand als auch auf Basis von Bedarfsdaten aufgebaut werden. Ein differenzierter Umgang je nach verwendeten Ausgangsdaten – explizit oder typologisch bzw. verbrauchs- oder bedarfsdatenbasiert – stellt eine Grundanforderung an die Daten im Anwendungsfall dar, da diese nur bedingt vergleichbar sind. Insbesondere für die im zweiten Teilprozess B angesetzten Entwicklungsszenarien spielt das genaue Wissen um die einbezogenen Ausgangsdaten eine entscheidende Rolle beim Interpretieren der Prognoseergebnisse bzgl. deren Genauigkeit bzw. Belastbarkeit.

Erhoben werden daher aspektbezogen gegliederte Informationsbedarfe einerseits für verbrauchs-basierte und andererseits für bedarfs-basierte Ausgangsdaten jeweils für die Teilprozesse des Anwendungsfalles. Darüber hinaus werden zwei Ebenen von Datengranularität betrachtet, zum einen (GROBE) literaturbasierte bzw. typologische und zum anderen (FEINE) explizite Daten zu den Bauwerken bzw. Infrastrukturen. Die folgenden Abschnitte konkretisieren die

Informationsbedarfe des Anwendungsfalles in den beiden Bereichen von Ausgangsdaten.

Bedarfsbasierte Ausgangsdaten

Wenn die Datenbasis für ein Vorgehen mit Hilfe von gebäudespezifischen Datensätzen nicht ausreichend ist, kann mit Hilfe einer Gebäudetypologie ein Modell des Gebäudebestandes erstellt werden. Dazu werden zunächst alle Gebäude einzeln nach den Kriterien Nutzung, Größe (Nettogrundfläche und Gebäudehöhe), Stockwerkszahl, Baujahr und Sanierungsstand typisiert. Weitere für die Simulation notwendige Daten werden auf Basis von Grunddaten aus der Literatur ergänzt. Optional können bei der Datenanreicherung weitere gebäudespezifische Daten, wie der Konstruktionstyp (leicht, schwer), die Anbausituation, die Grundrissstruktur sowie Informationen zur Existenz und Nutzung von Dachstuben, Kellerräumen oder Dachgauben mitberücksichtigt werden.

Sofern bereits detaillierte gebäudespezifische Datensätze vorhanden sind, kann auf die Verwendung typologischer Daten weitgehend verzichtet werden. Die zur Simulation erforderlichen Daten umfassen dann detaillierte gebäudespezifische Angaben zu

- thermischen Zonen (Nettogrundfläche, Volumen, Infiltrationsrate)
- sowie deren Nutzungsrandbedingungen

(Benutzungs- und Betriebszeiten, Beleuchtung, Raumklima, interne Wärmegevinne, welche unter anderem durch Aktivitätsgrade, spez. Wärmeemissionen sowie Anwesenheitskoeffizienten der in der Zone befindlichen Geräte und Personen beschrieben werden) und

- den vorhandenen Gebäudebauteilen (Schichtaufbau, Wärmeübergangskoeffizienten, Flächeninhalt, Orientierung).

Da diese sehr detaillierten Gebäudedaten in aller Regel nicht vollständig vorliegen, muss zumeist in begrenzter Weise dennoch auf typologische Informationen zurückgegriffen werden.

Verbrauchsbasierte Ausgangsdaten

Gebäudescharfe, auf Messungen beruhende Wärmeverbrauchsdaten (d.h. FEIN-Daten) liegen in der Regel bei den Mietern oder Eigentümern der Gebäude vor, z. B. als vom Versorger gemessene Daten für die Abrechnung von Endenergieträgern wie Gas, Fernwärme oder Strom vor oder als selbst ermittelte Werte für den Verbrauch von Heizöl, Pellets, Briketts, etc. Für die Nutzung in der Modellierung sollten die Energieträger sowohl für die Heizung als auch für die Trinkwarmwassererwärmung vollständig erfasst werden. Für die Modellbildung sollten zudem witterungsbereinigte Durchschnittswerte über mehrere Jahre verwendet werden. Sind explizite

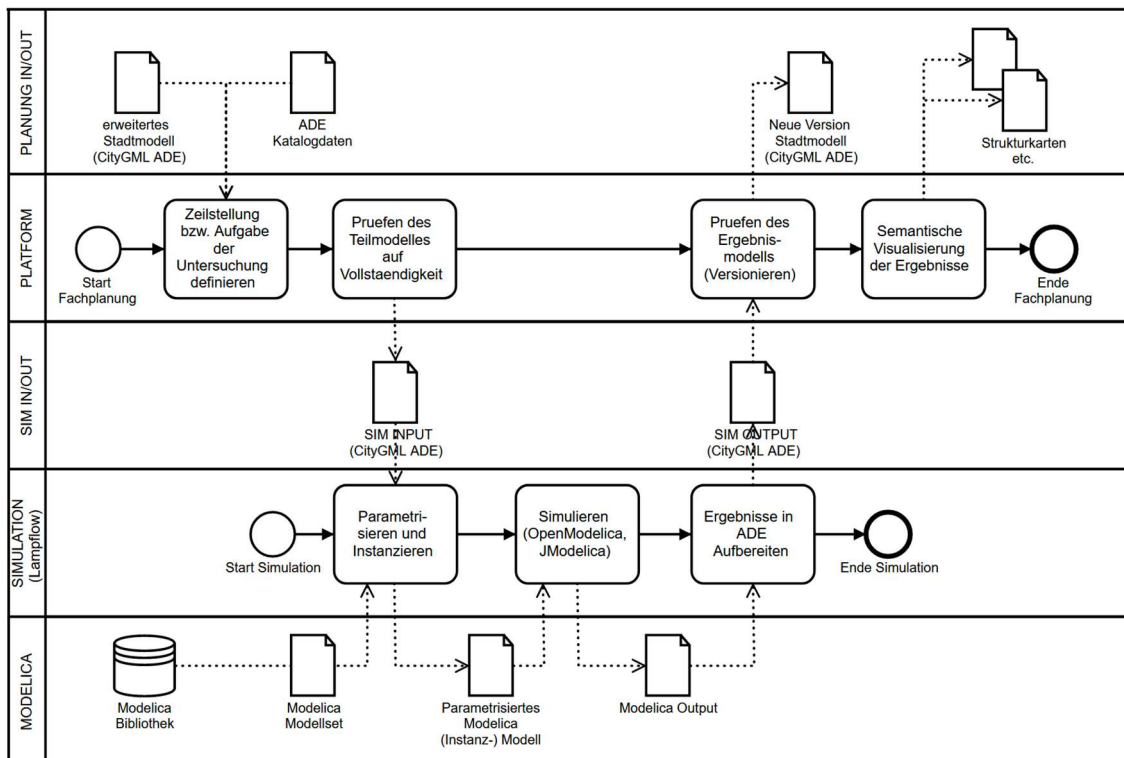


Abbildung 3 BPMN Prozessdiagramm Datenfluss durch Schnittstelle

Verbrauchsdaten nicht zu beschaffen, können alternativ typologische Kennwerte, die auf Basis von Verbrauchsdaten ermittelt wurden, verwendet werden (GROB-Daten).

Um die Wärmekennwerte für verschiedene Energieträger vergleichbar zu machen, empfiehlt sich eine Normierung auf sekundärseitige Endenergie (EEsek) unter Einbeziehung typischer oder expliziter Jahresnutzungsgrade der Anlagentechnik.

UMSETZUNGSSTRATEGIE

Formalisierung der Schnittstelle

Die Informationsbedarfe des Anwendungsfalles bilden im Rahmen des Projektes die inhaltliche Grundlage zum Formalisieren einer CityGML ADE zur Erweiterung dieses Standards mit Fokus auf die Anbindung Modelica-basierter energetischer Quartierssimulation. Die generell für das energetische Themenfeld von der SIG3D entwickelten Modellierungskonzepte der offiziellen Energy ADE werden bei dieser Schemamodellierung berücksichtigt. Damit sollen im Projekt (weiter-) entwickelte Abbildungskonzepte langfristig in die Standardisierungsarbeit einfließen können. Ein Augenmerk liegt dabei auf den bisher in der Energy ADE nicht berücksichtigten Informationsbedarfen, wie beispielsweise folgendes im Projektrahmen erarbeitete ADE Abbildungskonzept für typologische Daten: Mit dem Bereitstellen von Bezugsobjekten sowohl für die Typologie als auch deren Archetypen ermöglicht das Konzept dabei eine flexibel in dem Stadtmodell zusammenstellbare Einbindung dieser literaturbasierten Informationen. Für die im Anwendungsfall benötigten Gebäudetypologien z.B. Tabula [TAB 2016] werden mittels entsprechend exemplarisch aufbereiteten Katalogen sowohl die Klassifizierungsdimensionen, wie die Baualtersklasse, als auch weiterführende an den Archetypen untersuchte Merkmale, wie beispielsweise auf empirischen Zensusdaten ermittelte typische Verbräuche darüber referenziert.

Zu diesen bisher formalisierten Inputwerten der Simulation werden in der Schnittstelle schrittweise (mit Bezug zur folgenden Entwicklung einer Werkzeugkette) Abbildungskonzepte für die Simulationsergebnisse eingearbeitet.

Daten-Roundtrip mit Werkzeugkette

Über die Datenschnittstelle können die spezifizierten Informationen dann mit der Simulations-

domäne ausgetauscht werden (vgl. Abbildung 1). Hierfür werden auf fachlicher Seite der Simulation bzw. Berechnung entsprechende an die Datenschnittstelle angepasste Modelica-Simulationsmodelle in Bibliotheken vorgehalten, sodass darüber empfangene Inputdaten direkt zu deren Parametrisierung verwendet werden können. Außerdem sollen die von den parametrisierten Modelica-Modellen erbrachten Simulationsergebnisse ebenfalls mit der Datenschnittstelle abgebildet werden (bidirektionale Kopplung), damit sie ins Modell auf Seite der Planung zurückgeführt werden können. Dieser in Abbildung 3 schematisch dargestellte Datenfluss wird dabei durch eine im Rahmen des Projektes zu entwickelnde Werkzeugkette unterstützt:

Ausgangspunkt bildet die Modell-Management-Plattform, in der das integrierte Gesamtmodell verwaltet wird. In dieses fließen gemäß dem erweiterten Stadtmodellstandard die Informationen zur lokalen Ausgangssituation ein. Ergänzt werden kann in der Datenbasis dann mittels selektiver Editierungsmöglichkeiten wie beispielsweise die Einbindung von typologischen Informationen durch Setzen von Referenzen auf Katalogdaten. Mittels Filtermechanismen wird die Auswahl von Partialmodellen als Inputdaten für Simulation und Berechnung unterstützt. Gekapselt aus dem Gesamtmodell exportiert, werden diese Datensätze vor der Übergabe an die Simulationsseite einer regelbasierten Modellprüfung unterzogen. Die Kontrolle der inhaltlichen Vollständigkeit ermöglicht durch den qualifizierten Datenaustausch eine transparente und nachvollziehbare Modellqualitätssicherung der in die Plattform im- bzw. exportierten Daten.

Als Datenmanagement-Plattform innerhalb der Simulationsdomäne kommt die Open Source 3D-Geodatenbank 3DCityDB [STA 2009] zum Einsatz. Für den Import und Export kommen für standardkonforme CityGML-Datensätze die bereits in der 3DCityDB vorgesehene Funktionalitäten zur Anwendung. Für die in der ADE vorliegenden Daten wird auf eigens erstellte Import-/Exporttools zurückgegriffen.

Die Datenanreicherung sowie die Parametrierung und Instanziierung der Simulationsmodelle erfolgt mit Hilfe des Open Source Tools TEASER [REM 2017]. Als Kommunikationsschnittstelle zwischen der 3DCityDB und TEASER wird das ebenfalls frei verfügbare Webframework Django genutzt. Dieses ermög-

licht auf Basis einer objektrelationalen Abbildung eine einfache Kommunikation zwischen der 3DCityDB und der objekt-orientierten Datenverarbeitung in TEASER. Mit Hilfe einer eigens für TEASER erstellten sogenannten Django-App, werden die Input-Daten aus der 3DCityDB an TEASER übergeben. Für den Fall, dass keine vollständig parametrisierten gebäudespezifischen Datensätze vorliegen, werden in TEASER die noch fehlenden Daten durch literaturbasierte Grunddaten ergänzt. Auf Basis der angereicherten Datenbasis werden die entsprechenden Modelica-Modelle aus der Modell-Bibliothek AixLib [MUE 2016] ausgewählt, mit den zuvor berechneten Parametern belegt und instanziiert. Die parametrisierten Modellinstanzen werden anschließend ausgeführt bzw. simuliert und die Simulationsergebnisse in ihrer Rohform gesammelt. Die Simulation zur Wärmebedarfsberechnung erfolgt üblicherweise auf Basis einer stündlichen Zeitschrittweite. Von TEASER erstellte Simulationsmodelle können grundsätzlich in allen gängigen Umgebungen (Dymola, OpenModelica, JModelica) ausgeführt werden.

Im abschließenden Schritt werden die Simulationsergebnisse auf die notwendigen Daten reduziert, da die Modelica-Simulationen standardmäßig sehr detaillierte, zeitaufgelöste Informationen (z.B. Temperaturverläufe) enthalten, die nicht in der Schnittstelle abgebildet werden. Die reduzierten Simulationsergebnisse werden anschließend zurück in die 3DCityDB geschrieben und können von dort aus in das CityGML-Format exportiert werden.

Das von der Simulationsumgebung exportierte Ergebnismodell wird beim Einlesen in die Modell-Management-Plattform zunächst formal sowie inhaltlich regelbasiert geprüft. Zudem sichert ein stringentes Versionierungskonzept zur Verwaltung unterschiedlicher, auf Simulationsseite generierter Multivarianten- und Prognosemodelle die temporale Konsistenz rückgeführter Partialmodelle und verhindert gleichfalls ein Auseinanderlaufen unterschiedlicher Stände im Gesamtmodell. Mit regelbasierten Analysen sowie semantischer Visualisierung wird ein Auswertungswerkzeug die Aufbereitung der Simulationsergebnisse zu bedarfsgerechten Wärmekartierungen (Ergebnis Teilprozess A) bzw. Strukturkarten zur Begründung von Fernwärmeverranggebieten im FNP (Ergebnis Teilprozess B) unterstützen.

AUSBLICK

In dem bis Ende 2019 laufenden Projekt wird die Datenschnittstelle iterativ weiterentwickelt. Das in der Ausarbeitung befindliche Rückführungskonzept der Simulationsdaten in das Planungsmodell soll anhand von realer Beispieldaten einer Kommune exemplarisch evaluiert werden.

DANKSAGUNG

Wir danken für die finanzielle Unterstützung (FKZ 03ET1410) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).

LITERATUR

- [BSM 2011] Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit (Hrsg.). Leitfaden Energienutzungsplan.
http://www.bestellen.bayern.de/shoplinc/stmug_klima_00003.htm
- [ESS 2012] Stadt Esslingen am Neckar – Neuaufstellung Flächennutzungsplan 2030
https://www.esslingen.de/site/Esslingen-Internet-2016/get/params_E-2121192848/2832498/Erl%c3%a4uterungen%20Strukturkarten+19_10_2012I.pdf
- [HIL 2013] Hildebrandt, O. (2013) Energienutzungsplan Esslingen am Neckar
http://esslingenundco.de/site/Esslingen-und-CO/get/params_E-210857287/5675216/2013-10-30-Energienutzungsplan%20Esslingen%20Gesamtbericht%2029102013.pdf
- [KOS 2008] Kosow, H., Gaßner, R (2008): Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse
https://www.izt.de/fileadmin/publikationen/IZT_WB103.pdf
- [MUE 2016] Müller, D., Lauster, M., Constantin, A., Fuchs, M., Remmen, P. (2016): AixLib - An Open-Source Modelica Library within the IEA-EBC Annex 60 Framework
- [REM 2017] Remmen, P., Lauster, M., Mans, M., Fuchs, M., Osterhage, T., Müller, D. (2017): TEASER: an open tool for urban energy modelling of building stocks
- [STA 2009] Stadler, A., Nagel, C., König, G., Kolbe, T. H. (2009): Making Interoperability Persistent: A 3D Geodatabase Based on CityGML. In: Lee, J., & Zlatanova, S. (Eds.), 3D Geo-Information Sciences, Springer, Berlin/Heidelberg, 175-192.
- [TAB 2016] Tabula – DE Germany - Country Page; <http://episcopo.eu/building-topology/country/de.html>

BEURTEILUNG INNOVATIVER FASSADENLADENKONZEPTE - ERWEITERUNG DER VDI 6007-2

M. Franz¹, W. Stephan¹ und A. Schade²

¹ Institut für Energie und Gebäude, Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, Nürnberg, Germany

² Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Holzkirchen, Germany

KURZFASSUNG

Die energetischen, licht- und lufttechnischen Eigenschaften von Fassaden bestimmen wesentlich den Energiebedarf von und den Komfort in Gebäuden. Daher werden immer wieder neue innovative Fassadenkonzepte entwickelt und untersucht, so auch im interdisziplinären Projekt „FabioW, Fassadenladen - Hochtechnologie mit biogenen Werkstoffen - Ein universeller Baukasten als Neuinterpretation des Fensterladens“ (BMEL, FNR FKZ: 22031012). Im Gegensatz zu den Standardsystemen handelt es sich bei dem untersuchten Verschattungssystem um ein teiltransparentes, flexibles und mehrschichtiges System aus einem biogenen und nachwachsenden Werkstoff (ARBOBLEND®3896V, Rohstoffbasis Polymilchsäure), welches in dieser Art weder von der VDI 6007-2 (2012) oder ähnlichen Methoden (Stoll, 2005) vollständig abgebildet werden kann.

Zur Bestimmung und Beurteilung der energetischen und lichttechnischen Eigenschaften wurde das Berechnungsmodell der VDI 6007-2 (2012) weiterentwickelt und in EES (Klein et al., 2017) umgesetzt. Die Ergebnisse sind mit an Prüfständen des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik gemessenen Werten (im Labor und in situ) evaluiert und bestätigt worden. Ein Vergleich der ermittelten Kennwerte mit ausgewählten Referenzsystemen zeigt die Vor- und Nachteile des Konzepts. Die Kennwerte werden in das Gebäudesimulationsprogramm TRNSYS (Klein et al., 2017) integriert und Büroraumsituationen werden simuliert. Die Tageslichtnutzung und die Blendwirkung werden zusätzlich über ein detailliertes Geometriemodell im Tageslichtsimulationsprogramm RELUX (2015) abgebildet.

ABSTRACT

The energetic, light and ventilation properties of façades substantially determine the energy requirements of and the comfort in buildings. Therefore, new and innovative façade concepts are constantly being developed and investigated, as in the interdisciplinary project 'FabioW, Fassadenladen - Hochtechnologie mit biogenen Werkstoffen - Ein universeller Baukasten als Neuinterpretation des Fensterladens' (BMEL, FNR FKZ: 22031012). In contrast to the standard systems, the shading system investigated is a partially transparent, flexible and multilayered system made from a biogenic and renewable material (ARBOBLEND®3896V, raw material base polyactic acid), which in this way is not fully represented by either VDI 6007-2 (2012) or similar methods (Stoll, 2005).

For the determination and evaluation of the energetic and light properties, the calculation model of VDI 6007 (2012) was further developed and implemented in EES (Klein et al., 2017). The results have been evaluated and confirmed by means of test benches of the Fraunhofer-Institute for Building Physics (in laboratory and in situ). A comparison of the determined characteristic values with selected reference systems shows the advantages and disadvantages of the concept. The characteristics are integrated into the building simulation program TRNSYS (Klein et al., 2017) and office spaces are simulated. The daylighting and the glare effect are additionally represented via a detailed geometry model in the daylight simulation program RELUX (2015).

EINLEITUNG

Fassaden werden hauptsächlich durch die Kennwerte Energie- bzw. Lichtdurchgang und freie Lüftungsquerschnitte beurteilt. Nicht nur die Einzelkennwerte, die im Laborversuch und durch Detailsimulation ermittelt werden können, sondern die erzielbaren thermischen, lichttechnischen und lufttechnischen Bedingungen in den an die Fassaden angrenzenden Zonen beeinflussen maßgeblich den Erfolg von neuen Fassadensystemen.

Bei dem untersuchten Verschattungssystem Fassadenladen handelt es sich um ein teiltransparentes, flexibles und mehrschichtiges System aus einem biogenen Werkstoff (vgl. Abbildung 1).



Abbildung 1: Beispielhafter Aufbau des Fassadenladens

Um das untersuchte Verschattungssystem hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit, auch in Kombination mit dahinter liegenden Räumen, bewerten zu können, müssen bestehende Berechnungsmodelle angepasst und erweitert werden. Daneben werden die erzielbaren energetischen, licht- und lüftungstechnischen Randbedingungen untersucht und im Vergleich zu Referenzsystemen bewertet. In einem weiteren Schritt werden zur Validierung der simulierten Kennwerte diese mit Ergebnissen aus Messungen an Prüfständen (im Labor und in situ) evaluiert. Schließlich werden optimierte Profilanordnungen zur Verbesserung der Tageslichtnutzung und des Energieeintrags betrachtet.

MODELLERSTELLUNG

Bestimmung der energetischen und lichttechnischen Kennwerte - EES

Für die Berechnungen nach VDI 6007-2 (2012) wird der Gleichungslöser EES (Klein et al.,

2017) verwendet. Ziel ist die Bestimmung der Kenngrößen Abminderungsfaktor F_c (nur Verschattungssystem) und Gesamtenergiedurchlassgrad g_{tot} (Verschattungssystem in Kombination mit Verglasung), siehe Gleichung (1) und (2).

$$F_c = \frac{g_{tot}}{g_{Glas}} \quad (1)$$

$$g_{tot} = \tau_e + q_i \quad (2)$$

Der Lichttransmissionsgrad τ_v (nur Verschattungssystem) und Gesamtlichttransmissionsgrad $\tau_{v,tot}$ (Verschattungssystem in Kombination mit Verglasung) werden analog DIN EN 410 (2011) ermittelt, siehe Gleichung (3) und (4). Hierbei steht Index 1 für die erste Lage und Index 2 für die zweite Lage des Verschattungssystems Fassadenladen (von außen nach innen).

$$\tau_v = \tau_2 \cdot \frac{\tau_1}{(1 - \rho'_1 \cdot \rho_2)} \quad (3)$$

$$\tau_{v,tot} = \frac{\tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_{v,Glas}}{(1 - \rho'_1 \cdot \rho_2) \cdot (1 - \rho'_2 \cdot \rho_{v,Glas}) - \tau_2^2 \cdot \rho'_1 \cdot \rho_{v,Glas}} \quad (4)$$

In einem ersten Schritt müssen zunächst die spektralen Eigenschaften (Transmission, Reflexion und Absorption) der teiltransparenten Einzelprofile (Abbildung 2) bestimmt werden.

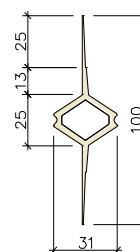


Abbildung 2: Querschnitt Einzelprofil des Fassadenladens

Da das für den Fassadenladen vorgesehene Einzelprofil aus unterschiedlichen Materialdicken besteht, werden die für die Berechnungen erforderlichen anteiligen spektralen Kennwerte für Transmission und Reflexion über Approximationsfunktionen zur Interpolation unter Berücksichtigung von im Labor für zwei definierte Materialstärken gemessenen strahlungsphysikalischen und lichttechnischen Kennwerten abgebildet.

(<https://www.pruefstellen.ibp.fraunhofer.de/de/akkreditierte-prueflabore/Feuchte/Strahlung.html>)

Gleichung (5) beschreibt dabei die Funktion zur Ermittlung des Transmissionsgrads τ und Gleichung (6) die Funktion zur Bestimmung des Reflexionsgrads ρ in Abhängigkeit der Materialdicke x , sowohl im sichtbaren als auch über den gesamten Wellenlängenbereich der optischen Strahlung. So ergeben sich beispielsweise für eine Dicke von 1,0 mm für den sichtbaren Wellenlängenbereich ein Transmissionsgrad von 0,26 sowie ein Reflexionsgrad von 0,62 und für den gesamten Wellenlängenbereich ein Transmissionsgrad von 0,28 sowie ein Reflexionsgrad von 0,55.

$$\tau = a \cdot e^{(-b \cdot x)} \quad (5)$$

$$\rho = a \cdot (1 - e^{(-b \cdot x)}) \quad (6)$$

Es werden zusätzlich die Temperaturen der einzelnen Schichten bzw. der Zwischenräume im Berechnungsmodell bestimmt. Wesentliche Parameter sind dabei die solare Einstrahlung, die Außen- bzw. Rauminnentemperatur, der konvektive Wärmeübergangskoeffizient h_c auf der Innen- bzw. Außenseite sowie der Wärmeaustauschkoeffizient h_v zwischen den einzelnen Schichten. Mit Hilfe dieser Temperaturen lassen sich die konvektiven Wärmeübergänge für natürlich durchlüftete Zwischenräume und daraus der sekundäre Wärmeabgabegrad q_i des Gesamtsystems berechnen.

In Ergänzung zur VDI-Richtlinie werden auch die zur Bestimmung der konvektiven Wärmeübergänge benötigten horizontalen Öffnungsflächen A_{ho} für natürliche Durchlüftung (Gleichung (7)) in Abhängigkeit des vertikalen Profilabstands d , der Profillänge l_{profil} , der Gesamtanordnungsbreite B und der Anzahl der Profile n bestimmt (siehe auch Abbildung 3).

$$A_{ho} = (d - l_{profil}) \cdot B \cdot (n - 1) \quad (7)$$

Zur Berücksichtigung der direkten solaren Einstrahlung über Öffnungen im Fassadenladen werden die ermittelten Kennwerte Gesamtergiedurchlassgrad g_{tot} , Gesamtstrahlungstransmissionsgrad $\tau_{e,ges}$ und Gesamtlichttransmissionsgrad $\tau_{v,tot}$ anteilig über die jeweiligen Höhenanteile (H_{frei} , H_{ges}) mit Hilfe der Gleichung (8) bis (10) bestimmt.

$$g_{tot,korr} = g_{tot} \cdot \left(1 - \frac{H_{frei}}{H_{ges}}\right) + g_{Glas} \cdot \frac{H_{frei}}{H_{ges}} \quad (8)$$

$$\tau_{e,korr} = \tau_{e,ges} \cdot \left(1 - \frac{H_{frei}}{H_{ges}}\right) + \tau_{e,Glas} \cdot \frac{H_{frei}}{H_{ges}} \quad (9)$$

$$\tau_{v,tot,korr} = \tau_{v,tot} \cdot \left(1 - \frac{H_{frei}}{H_{ges}}\right) + \tau_{v,Glas} \cdot \frac{H_{frei}}{H_{ges}} \quad (10)$$

Dies gilt auch für den nichtsenkrechten Strahlungseinfall in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe und der jeweiligen Anordnungsgeometrie.

Weiterhin erfolgt nach VDI 6007-3 (2012) eine Korrektur der Kennwerte für den nicht senkrechten Strahlungseinfall für direkte und diffuse solare Einstrahlung.

Für gemischte Anordnungen werden die Kennwerte für die Einzelbereiche Brüstung, Sichtfeld und Oberlicht (Abbildung 3) der Fassade ermittelt und anteilig über die Flächenverhältnisse gewichtet. Daraus ergeben sich die Kennwerte für das kombinierte Verschattungssystem Fassadenladen.

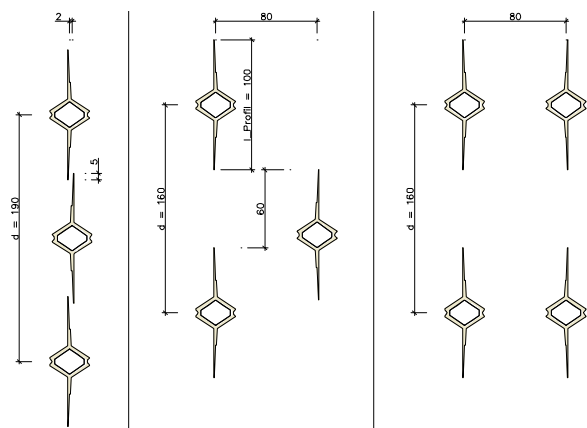


Abbildung 3: Profilanordnungen (von links nach rechts): Brüstung, Sichtfeld, Oberlicht (linke Seite entspricht jeweils der Sonne zugewandten Seite)

In den folgenden Betrachtungen wird eine gemischte Fassadenladen-Anordnung mit den Einzelanordnungen Brüstung ($h = 0,97$ m), Sichtfeld ($h = 0,90$ m) und Oberlicht ($h = 0,90$ m) untersucht.

Betrachtet werden neben dem Fassadenladen-System zusätzlich zwei Referenzsysteme, zum einen ein außenliegender Raffstore (Flachlamelle) und zum anderen ein außenliegender Textilscreen.

Als Verglasung wird eine 2-Scheiben-Wärmeschutzverglasung mit einem Energiedurchlassgrad g von 0,53 und einem Lichttransmissionsgrad τ_v von 0,78 berücksichtigt.

Bewertung der Tageslichtkennwerte - RELUX

Für die Bewertung des Lichtdurchgangs werden in der Simulationsumgebung RELUX (2015) weitere Modelle erstellt. Es werden der Tageslichtquotient und die Leuchtdichteverteilung, im Vergleich zu den Referenzsystemen bewertet. Dabei werden die Einzelprofile des Systems Fassadenladen mit ihren ermittelten anteiligen Lichttransmissions- und Lichtreflexionsgraden abgebildet. Die berechneten Tageslichtquotienten werden weiter in den thermisch-energetischen Simulationsberechnungen (TRNSYS, Klein et al., 2017) zur Bestimmung der Energiebedarfswerte bzw. zur Ermittlung der Tageslichtkennwerte benötigt.

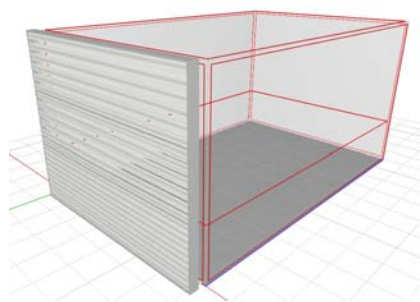


Abbildung 4: Dreidimensionales Raummodell (Büroraum, RELUX)

Als repräsentative Zone dient ein Büroraum mit Einzelnutzung und einer vollverglasten Fassade mit den Anordnungen Brüstung, Sichtfeld und Oberlicht (Abbildung 4). Der Raum hat eine Grundfläche von $19,8 \text{ m}^2$ ($3,60 \times 5,50 \text{ m}$) und ein Volumen von $56,8 \text{ m}^3$ ($h = 2,80 \text{ m}$) und ist nach Süden ausgerichtet. Der Boden hat einen Lichtreflexionsgrad von 0,40 und die Wände sowie die Decke von 0,80. Als Standort wird der Ort Holzkirchen in Bayern gewählt.

Thermisch-energetische und lichttechnische Gebäudesimulation - TRNSYS

Das Gesamtsystem Raum und Fassade wird durch eine thermisch-energetische und kombinierte lichttechnische Gebäudesimulation bewertet (TRNSYS, Klein et al., 2017). Beurteilt werden neben den jährlichen Energiebedarfswerten für Heizung, Kühlung und künstliche

Beleuchtung auch die Tageslichtkennwerte Tageslichtautonomie (DA) und kontinuierliche Tageslichtautonomie (CDA) für einen Büroraum mit natürlicher Belüftung und Einzelnutzung (Abbildung 5). Die Tageslichtautonomie bezeichnet den Anteil der Nutzungsstunden, in denen ein Raum oder ein Arbeitsplatz ausreichend mit Tageslicht versorgt ist, ohne dass Kunstlicht zugeschaltet werden muss. Die kontinuierliche Tageslichtautonomie gibt Auskunft darüber, zu wie viel Prozent der täglichen Benutzungszeit der Raum oder der Arbeitsplatz durch das vorhandene Tageslicht ausreichend beleuchtet wird.

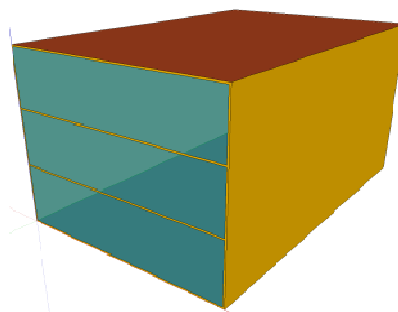


Abbildung 5: Dreidimensionales Raummodell (Büroraum, TRNSYS)

Die Randbedingungen bleiben gegenüber der Tageslichtsimulation unverändert. Die beiden Referenzsysteme werden jeweils entsprechend der solaren Einstrahlung auf die Fassade gesteuert, dabei beträgt die Aktivierungsgrenze 180 W/m^2 . Die Fassadenladenanordnungen sind hingegen unbeweglich vor der Fassade befestigt. Die Kunstlichtsteuerung erfolgt in Abhängigkeit der Tageslichtverfügbarkeit.

SIMULATIONSERGEBNISSE

Energetische und lichttechnische Kennwerte - EES

Tabelle 1 gibt die energetischen und lichttechnischen Kennwerte der untersuchten Systeme für senkrechten Strahlungseinfall wieder. Weiterhin ist das Verhältnis der freien Öffnungsfläche zur Gesamtfläche im geschlossenen Zustand angegeben. Dieser Wert ist vor allem hinsichtlich der natürlichen Belüftung der Räume von Bedeutung.

Es zeigt sich, dass der Abminderungsfaktor F_c für die Fassadenladen-Anordnung gegenüber den Referenzsystemen schlechter ist. Im Ge-

gensatz dazu lassen sich jedoch höhere Lichttransmissionsgrade erzielen. Dies ist zum einen auf die Teiltransparenz der Einzelprofile und zum anderen auf die offenen Bereiche der Fassadenladen-Anordnungen zurückzuführen. Ebenso steht zur natürlichen Belüftung ein höherer freier Öffnungsflächenquerschnitt zur Verfügung.

Tabelle 1: Energetische, licht- und lüftungstechnische Kennwerte für senkrechten Strahlungseinfall für die Fassadenladen-Anordnung und Referenzsysteme

System	F _c -Wert [-]	τ _v [-]	Verhältnis freie Öffnungsfläche zu Gesamtfläche im geschlossenen Zustand [-]
Fassadenladen (Brüstung - Sichtfeld - Oberlicht)	0,30	0,22	0,41
Raffstore	0,16	0,06	0,25
Screen	0,17	0,04	0,05

Abbildung 6 zeigt den korrigierten Abminderungsfaktor F_c sowie den korrigierten Lichttransmissionsgrad τ_v in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe für die Fassadenladen-Anordnung (Brüstung - Sichtfeld - Oberlicht) auf.

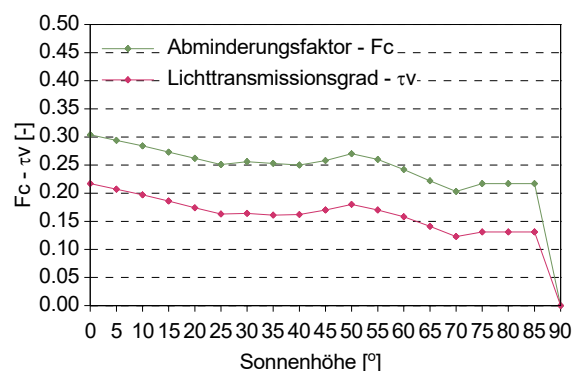


Abbildung 6: Fassadenladen, Abminderungsfaktor (F_c) und Lichttransmissionsgrad (τ_v) in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe (Kombination Brüstung - Sichtfeld - Oberlicht)

Tageslichtkennwerte - RELUX

Nach DIN 5034-1 (2011) ist der Tageslichtquotient ein Maß für die Tageslichtversorgung von Räumen in Gebäuden.

Tabelle 2 gibt für den untersuchten Büroraum den mittleren Tageslichtquotienten für die untersuchten Systeme im geschlossenen Zustand wieder. Diese Werte werden später in der thermisch-energetischen Gebäudesimulation zur Bestimmung des Kunstlichtbedarfs und der Tageslichtkennwerte benötigt. Es zeigt sich, dass sich mit der Anordnung Fassadenladen im Vergleich zu den Referenzsystemen im geschlossenen Zustand ein besserer Tageslichtquotient erzielen lässt.

Tabelle 2: Tageslichtquotient für die Anordnungen Fassadenladen und der Referenzsysteme - Büroraum

System	TLQ [-]
Fassadenladen (Brüstung - Sichtfeld - Oberlicht)	0,90
Raffstore	0,67
Screen	0,34

Nach DIN EN 12464-1 (2011) steht für die psychologische Blendung durch Tageslicht momentan kein genormtes Blendungsbewertungsverfahren zur Verfügung. Generell sollen zu hohe Leuchtdichten (Direktblendung) und zu hohe Leuchtdichteunterschiede vermieden werden. Weiterhin sind Reflexionen bzw. Spiegelungen auf dem Arbeitsplatz bzw. auf den Bildschirmen zu beschränken (Reflexblendungen). Aus verschiedenen Untersuchungen (Schmitz, 2003) gibt es dennoch Anhaltswerte zur Begrenzung der Blendung durch Tageslicht.

Aufgrund der offenen Bereiche in den Anordnungen des Fassadenladens kann es zu relativ hohen Leuchtdichteunterschieden im weiteren Blickfeld bzw. auf dem Fenster kommen. Abbildung 7 zeigt beispielhaft die Leuchtdichteverteilung auf dem Fenster (raumseitig) für den 21.12. um 12.14 Uhr. Zu erkennen sind dabei die relativ hohen Leuchtdichteunterschiede bzw. die relativ hohen maximalen Leuchtdichten aufgrund der offenen Bereiche im Bereich Oberlicht bei tiefstehender Sonne. Dies kann, je nach Orientierung des Arbeitsplatzes, zu störender Reflexblendung führen. Weiterhin ist zu beachten, dass es bei bestimmten Sonnenständen zu direkter Sonneneinstrahlung in den Raum kommen kann. Diese direkte Sonneneinstrahlung kann zu direkter Blendung oder aber zu Reflexblendungen durch zu helle Oberflächen führen.

Durch geschickte Anordnung der Profile und des Arbeitsplatzes ist es dennoch möglich dies einzuschränken.

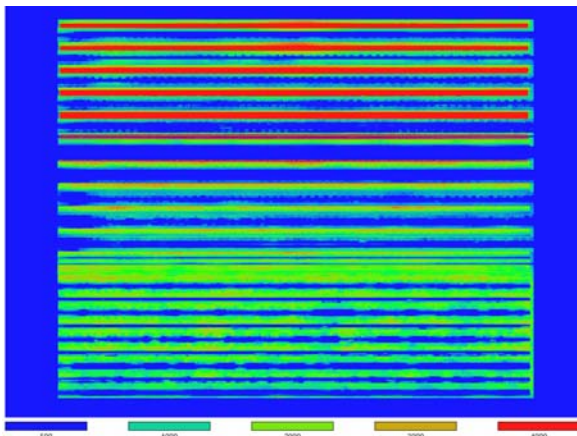


Abbildung 7: Bewertung der Leuchtdichteverteilung für den 21.12. (12.14 Uhr) - Falschfarbendarstellung

Thermisch-energetische und lichttechnische Gebäudesimulation - TRNSYS

Abbildung 8 gibt die jährlichen spezifischen Endenergiebedarfswerte für Heizen, Kühlen und künstliche Beleuchtung für die untersuchten Varianten wieder. Als Energieerzeuger werden zum einen eine Wärmepumpe zum heizen (Luft/Wasser, COP = 3,5) und zum anderen eine Kompressionskältemaschine zum kühlen (luftgekühlt, COP = 3,1) verwendet.

Abbildung 9 zeigt die Tageslichtkennwerte Tageslichtautonomie (DA) und kontinuierliche Tageslichtautonomie (CDA) für die untersuchten Varianten auf.

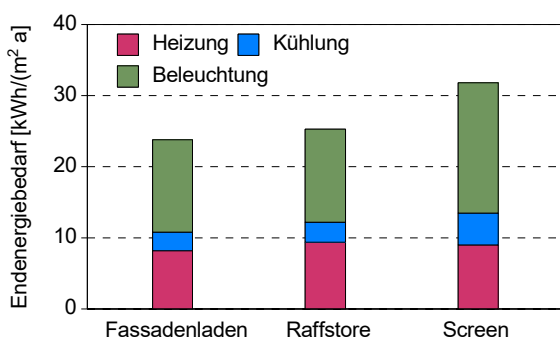


Abbildung 8: Jährlicher spezifischer Endenergiebedarf (Bürraum)

Es zeigt sich, dass für das System Fassadenladen bei allen Einzelkennwerten die niedrigsten Werte resultieren. Dies bedeutet eine Gesamteinsparung gegenüber dem Raffstore bzw. dem Screen von 6 % bzw. 25 %.

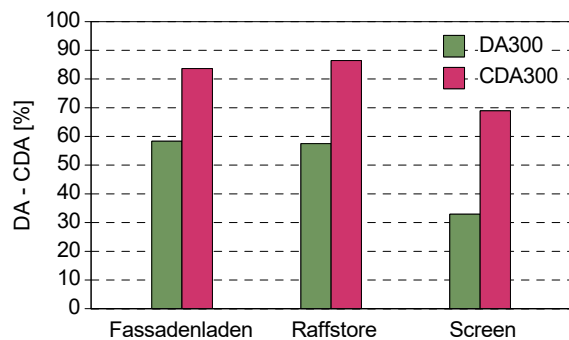


Abbildung 9: Tageslichtkennwerte - DA, CDA (Bürraum) - Bezugswertist der mittlere Tageslichtquotient

Der niedrigere Heizenergiebedarf resultiert aus der besseren Nutzung der solaren Wärmegevinne während der Heizperiode (Einsparung gegenüber dem Raffstore bzw. dem Screen: 13 % bzw. 9 %). In der Kühlperiode führt der dauerhaft geschlossene Zustand des Fassadenladens zu einem niedrigeren Kühlenergiebedarf (Einsparung gegenüber dem Raffstore bzw. dem Screen: 8 % bzw. 43 %). Die Referenzsysteme schließen erst ab einer solaren Einstrahlung von 180 W/m². Ebenso führen die niedrigeren Wärmelasten, aufgrund des geringeren Kunstlichtbedarfs durch die bessere Tageslichtversorgung im Raum mit Fassadenladen zu einem niedrigeren Kühlenergiebedarf. Der geringere Energiebedarf für das Kunstlicht bedeutet eine Einsparung gegenüber dem Raffstore bzw. dem Screen von 1 % bzw. 29 %. Der bessere Lichttransmissionsgrad des Fassadenladens führt dementsprechend zu besseren Lichtkennwerten Tageslichtautonomie und kontinuierliche Tageslichtautonomie gegenüber dem Screen und in etwa analogen Ergebnissen gegenüber dem Raffstore.

ABGLEICH MIT IN SITU UND LABORMESSUNGEN

Nachstehend werden die Kennwerte aus den Simulationsberechnungen mit den Ergebnissen aus in situ und Labormessungen verglichen. Der Gesamtenergiedurchlassgrad g_{tot} sowie der Lichttransmissionsgrad $\tau_{v,tot}$ des Fassadenladens in Kombination mit Verglasung wurde am kalorimetrischen Dach- und Fassaden-Prüfstand des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (Kersken et al., 2016) in situ gemessen. Der Lichttransmissionsgrad τ_v des Fassadenladens wurde zusätzlich im Labor mit dem Goniophotometer des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (de Boer

et al., 2010) gemessen. Abbildung 10 bzw. Abbildung 11 stellt den simulierten Abminderungsfaktor F_c bzw. Lichttransmissionsgrad τ_v der drei Einzelanordnungen Brüstung, Sichtfeld und Oberlicht für senkrechten Strahlungseinfall den Prüfstandsergebnissen gegenüber.

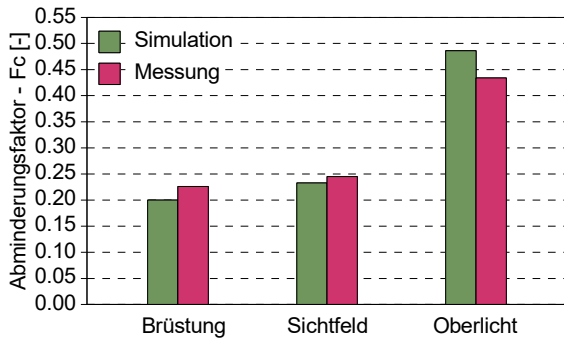


Abbildung 10: Vergleich der Simulationsergebnisse mit den in situ Messungen für senkrechten Strahlungseinfall - Abminderungsfaktor (F_c)

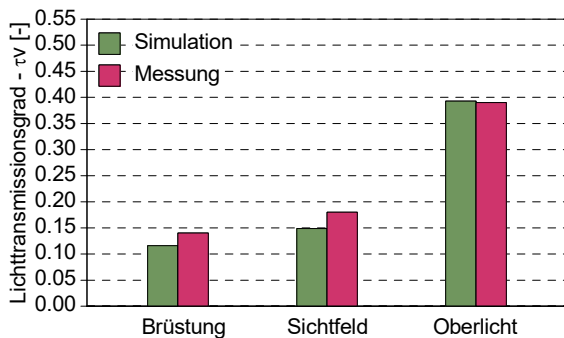


Abbildung 11: Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Labormessungen (Goniophotometer) für senkrechten Strahlungseinfall - Lichttransmissionsgrad (τ_v)

Wie die Diagramme zeigen, weichen die Simulationsergebnisse nur unwesentlich von den Messergebnissen ab (2 bis 6 Prozentpunkte). Die Unterschiede in Bezug auf den Abminderungsfaktor sind auf die unterschiedlichen Randbedingungen (solare Einstrahlung, Außentemperatur, Windgeschwindigkeit und dem daraus resultierenden konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten auf der Außenseite), welche zu unterschiedlichen sekundären Wärmeabgabegraden resultieren, zurückzuführen.

OPTIMIERUNG DER PROFILANORDNUNGEN

Ziele optimierter Profilanordnungen können unterschiedlich ausfallen, je nach dem in welchem Bereich der Fassade die jeweiligen Anordnungen vorgesehen sind. Dadurch bestimmt sich auch die Zielfunktion (Energieeintrag, Ta-

geslicht oder Blendwirkung). Will man ganzjährig direkte solare Einstrahlung und somit Blendung durch Tageslicht vermeiden (z. B. im Bereich Sichtfeld), kann durch geschickte Anordnung der Einzelprofile dies bewerkstelligt werden. Als erste Bedingung muss der senkrechte Profilabstand der Einzelanordnung y der senkrechten Überlappung z zwischen erster und zweiter Profillage entsprechen, dies verhindert direkte solare Einstrahlung bei niedrigen Sonnenständen. Um auch bei hohen Sonnenständen direkte Einstrahlung zu vermeiden, gilt weiterhin Gleichung (11) (vgl. Abbildung 12).

$$I_{\text{Sonne}} \leq I_{\text{Profil}} - z \quad (11)$$

Ziel ist es nun bei bekanntem Profilabstand y , Profillänge l_{Profil} und maximaler Sonnenhöhe $\gamma_{s,\text{max}}$ den horizontalen Lagenabstand zwischen den beiden Lagen x zu bestimmen. Dies zeigt Gleichung (12).

$$x = \frac{(l_{\text{Profil}} - z)}{\tan(\gamma_{s,\text{max}})} \quad (12)$$

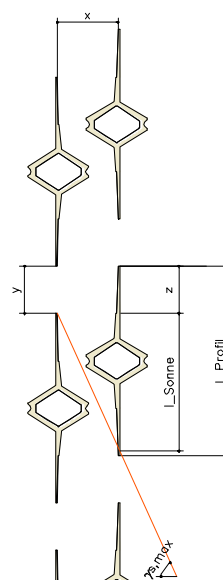


Abbildung 12: Optimierte Profilanordnung für den Bereich Sichtfeld (ganzjährige cut-off-Stellung)

Abbildung 13 zeigt eine optimierte Anordnung für den Bereich Oberlicht zur verbesserten Tageslichtnutzung.

Hierbei soll lediglich direkte solare Einstrahlung ab einer bestimmten Sonnenhöhe vermieden werden, um mehr Tageslicht zu nutzen und um auch den Heizenergiebedarf durch höhere solare Wärmegevinne zu senken. Gleichzeitig soll

störende Blendung vermieden werden. Zunächst gilt für die maximale Sonnenhöhe $\gamma_{s,max}$, Gleichung (13).

$$I_{Sonne,2} \leq I_{Profil} \quad (13)$$

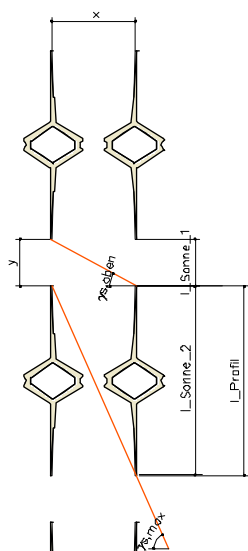


Abbildung 13: Optimierte Profilanordnung für den Oberlicht-Bereich (Tageslichtnutzung)

Ziel ist es wiederum bei bekanntem Profilabstand y , Profillänge I_{Profil} und bekannter maximaler Sonnenhöhe $\gamma_{s,max}$ den horizontalen Lagenabstand zwischen den beiden Lagen x zu bestimmen. Dies stellt Gleichung (14) dar.

$$x = \frac{I_{Profil}}{\tan(\gamma_{s,max})} \quad (14)$$

ZUSAMMENFASSUNG

Der vorliegende Beitrag beinhaltet die Weiterentwicklung und Umsetzung des Berechnungsmodells der VDI 6007-2 (2012) zur Beurteilung teiltransparenter, flexibler und mehrschichtiger Systeme aus biogenen Materialien. Diese Systeme werden weiterhin in den Simulationsumgebungen RELUX (Tageslichtverfügbarkeit, Blendung) und TRNSYS (Energiebedarfs- und Tageslichtkennwerte) umgesetzt. Die Ergebnisse der Simulationsberechnungen wurden mit Hilfe von Messungen an Prüfständen (im Labor und in situ) evaluiert. Hierbei weichen die Simulationsergebnisse nur unwesentlich von den Messergebnissen ab. Durch geschickte Anordnungen der Einzelprofile sind Optimierungen hinsichtlich der Tageslichtnutzung, des solaren Energieeintrags und der Blendwirkung möglich.

DANKSAGUNG

Das diesem Beitrag zugrunde liegende Vorhaben „Fassadenladen - Hochtechnologie mit biogenen Werkstoffen - Ein universeller Baukasten als Neuinterpretation des Fensterladens (FabioW)“ wurde mit Mitteln der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), ein Projektträger des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), unter dem Förderkennzeichen 22031012 gefördert.

LITERATUR

De Boer J., Panhans B., Stöbel F., 2010. Neue lichttechnische Bewertungsmöglichkeiten von Fassadensystemen: das IBP-Photogoniometer (IBP Mitteilung 499)

DIN 5034-1: 2011-07. Tageslicht in Innenräumen, Teil 1: Allgemeine Anforderungen

DIN EN 410: 2011-04. Glas im Bauwesen – Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen

DIN EN 12464-1: 2011-08. Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten, Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen

Kersken M., Sinnesbichler H., 2016. Kaliometrierverfahren zur in situ Messung des solaren Gesamtenergiedurchlassgrads (Messtechnik im Bauwesen, Sonderdruck)

Klein, S.A. et al., 2017. EES: Engineering Equation Solver, F-Chart, Madison USA

Klein, S.A. et al., 2017. TRNSYS 18: A Transient System Simulation Program, SEL, University of Wisconsin, Madison USA

Relux Informatik AG, 2015. ReluxPro, Version 2015.1.1 <http://reluxnet.relux.com/de/>

Schmitz, H.J., 2003. Akzeptanz von Arbeitsplatzbedingungen in Büros an Atrien unter besonderer Berücksichtigung der Tageslichtverhältnisse, Marburg

Stoll, J., 2005. Fenstermodell, kurzwellige Strahlung und thermische Austauschvorgänge, veröffentlicht in HLH, Nürnberg

VDI 6007-2 bis 3: 2012-03/04. Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden

KOMPLEXES PHYSIKALISCHES GEBÄUDEMODELL AUF BASIS DER MODELICA „BUILDINGS“ BIBLIOTHEK FÜR GEBÄUDE-ENERGIE-SIMULATIONEN

Y. Fürst¹, L. Keilmann¹, S. Brandt¹ und M. Kriegel¹

¹TU Berlin, Hermann-Rietschel-Institut, Berlin, Germany

KURZFASSUNG

Dieser Beitrag beschreibt die Implementierung eines komplexen physikalischen Gebäudemodells in MODELICA, welches die Parametrierung im Vergleich zu bereits existierenden Lösungen erheblich vereinfacht. Der Aufbau eines Gebäudes wird effizient mittels Vektoren und Matrizen umgesetzt. In einer simulationsgestützten Ermittlung der Wärmeanforderungen eines Bürogebäudes der TU Berlin wird die Anwendung des Modells demonstriert und das Ergebnis mit vorhandenen Messdaten verglichen. Das Modell ist auf GitHub verfügbar.¹

ABSTRACT

This contribution describes the implementation of a complex physical building model in MODELICA to simplify the parameterization compared to existing solutions significantly. The efficient construction of a virtual building is realized using vectors and matrices. To demonstrate the application of the model, the heating demand of an office building of the TU Berlin is estimated and compared to measurement data. The model is available on GitHub.¹

EINLEITUNG

In der EU und den USA sind Gebäude für über 40 % des Primärenergieverbrauchs verantwortlich (vgl. Cao et al. 2016). Laut dem BMWi (2018) sind im Jahr 2016 knapp ein Drittel des gesamten Endenergieverbrauchs in Deutschland auf die Heiz- und Warmwasserbereitstellung entfallen. Dies zeigt die Relevanz mit der der gebäudespezifische Anteil auf die Gesamtenergiebilanz des

Endenergieverbrauchs einwirkt und welches Potential in einer Steigerung der Energieeffizienz in diesem Bereich liegt.

Gebäude-Energie-Simulationen können hierbei einen wertvollen Beitrag leisten und Einsparpotentiale bereits in frühen Entwicklungsphasen aufzeigen sowie dabei helfen, Planungsfehler von vornherein zu vermeiden. Darüber hinaus ist es in der Regelungstechnik üblich eine entwickelte Regelung bzw. Steuerung zunächst in der Simulation zu testen, bevor eine Erprobung an realen Systemen vorgenommen wird. Mittlerweile sind viele Simulationsumgebungen und Modellierungssprachen verfügbar, die versuchen die Nachfrage in diesem Bereich zu befriedigen. Im Bereich der quelloffenen Open-Source Lösungen hat sich MODELICA als Standardwerkzeug etabliert und umfassende Modell-Bibliotheken wie die *AixLib*, *Buildings* oder *BuildingSystems* hervorgebracht (vgl. Müller et al. 2016; Wetter et al. 2015; Nytsch-Geusen et al. 2013). Mit Hilfe dieser Bibliotheken wird die dynamische Modellierung komplexer Gebäude-Energie-Systeme dank objektorientierter und akausaler Ansätze erheblich vereinfacht.

Da es sich bei Gebäuden und der installierten Gebäudetechnik im Allgemeinen um individuelle Lösungen handelt, müssen für die simulationsgestützte Analyse immer individuelle Modelle der Gesamtsysteme entwickelt werden. Je nach Komplexitätsgrad, stellt dies – auch unter Anwendung zuvor genannter Bibliotheken – eine Herausforderung dar: die Modellierung ist dabei nicht nur zeitaufwendig, sondern auch sehr fehleranfällig. Das vorgestellte Gebäudemodell ist aus

¹ <https://github.com/yfuerst/BuildingModel>

dem Anspruch entstanden diese Schwierigkeiten zu beseitigen und eine virtuelle Testumgebung bereitzustellen, die neben energetischen Untersuchungen, auch zur Entwicklung und Erprobung von Regelungen bzw. Steuerungen eingesetzt werden kann. Das Modell ist auf GitHub verfügbar.¹

Im Folgenden soll zunächst ein kurzer Überblick über das weite Feld der thermischen Gebäudesimulationen gegeben werden. In diesem Kontext soll vor allem deutlich werden, was unter einem komplexen physikalischen Gebäudemodell verstanden wird. Anschließend erfolgt die Vorstellung des Modells anhand eines einfachen Beispiels. Abschließend wird eine praktische Anwendung zur Bestimmung der Wärmeanforderungen demonstriert. Die Simulationsergebnisse werden mit den gemessenen Verbrauchsdaten eines Gebäudes auf dem Campus der TU Berlin verglichen und bewertet.

THERMISCHE GEBÄUDESIMULATION

Allgemein ergeben sich im Bereich der Modellierung zwei prinzipiell verschiedene Herangehensweisen:

- ein rein mathematisch orientierter Ansatz
- oder eine Modellstruktur auf Basis von physikalischen Zusammenhängen.

Die erste Herangehensweise beruht auf einer experimentellen Modellbildung, auch Systemidentifikation² oder *Black-Box-Modell* genannt. Dabei wird das zeitliche Verhalten der Eingangs- und Ausgangsgrößen gemessen und das Übertragungsverhalten zwischen diesen Größen mathematisch beschrieben. Dafür sind keine physikalischen Spezialkenntnisse des zu untersuchenden Systems erforderlich und es handelt sich um ein allgemein anwendbares Verfahren. Im Gegensatz zu einem *White-Box-Modell*, das auf einer physikalischen Modellbildung beruht, existieren jedoch keine physikalisch interpretierbaren Größen (wie z. B. die physikalischen Zustandsgrößen eines Systems). Das *Gray-Box-Modell* stellt eine Zwischenform dar, dem ein physikalisches Modell mit (einigen) unbekanntem physikalischen

Parametern zugrunde liegt. Während der Parameteridentifikation werden diese unbekanntem Parameter anhand experimentell ermittelter Messdaten identifiziert (vgl. Bohn und Unbehauen 2016).

Neben der mathematischen/physikalischen Charakterisierung kann eine Unterscheidung der thermischen Gebäudemodelle entsprechend ihrer mathematischen Komplexität erfolgen. In der Literatur werden verschiedene Ansätze vorgeschlagen, die häufig auf das elektrische Analogiemodell nach Beuken (1936) zurückgehen. Das N-K-MODELL³ nach Rouvel (1972) stellt die Grundlage der VDI 6020 Blatt 1 dar und bildet damit die Basis zur Validierung von Rechenverfahren zur thermischen Gebäudesimulation. Weitere Vereinfachungen führen auf das 2-K-MODELL, worauf die VDI 6007 Blatt 1 aufbaut. Modellansätze dieser Art gehören zur Klasse der linearen gewöhnlichen Differentialgleichungen (DGL), zu denen auch die aus der Systemtheorie bekannten Übertragungsglieder zählen. Zu modellierende Gebäude werden häufig in thermische Zonen zerlegt, wobei jede Zone durch DGL-Systeme abgebildet wird. Diese Herangehensweise bietet sich vor allem bei der Simulation von Quartieren an, um die Komplexität des Modells zu reduzieren.

Das vorgestellte Gebäudemodell bildet jeden Raum einzeln ab, berücksichtigt dabei jede Raumschließungsfläche inkl. der Orientierung und wird daher als *komplex* bezeichnet. Die Modellierung erfolgt physikalisch motiviert, was den Ursprung für die gewählte Bezeichnung des Titels dieses Beitrags wiedergibt.

GEBÄUDEMDELL

Bei der Erstellung des komplexen Gebäudemodells wurde Wert auf eine große Flexibilität und ein hohes Maß an Wiederverwertbarkeit gelegt. Das Ziel ist es, ein Modell bereitzustellen, mit dem ohne großen Aufwand nahezu beliebige reale Gebäude mathematisch abgebildet werden können. Gleichzeitig soll es sich um eine ausschließlich in MODELICA verfasste Implementierung handeln, um eine Abhängigkeit von anderen Programmiersprachen und zusätzlicher Software

² Die Identifikation von physikalischen Modellen wird Parameteridentifikation genannt.

³ K steht hierbei für Kapazität und N gibt die Anzahl der vorhandenen Kapazitäten im Modell an.

zu vermeiden. Es ist explizit nicht das Ziel einen Anwender anzusprechen, der es gewohnt ist ausschließlich mit graphischen Oberflächen zu arbeiten.

Die Grundlage des entstandenen Gebäudemodells stellt das Raummodell (RMB) aus der MODELICA *Buildings* Bibliothek (Wetter et al. 2015) dar. Es wird detailliert im Beitrag von Wetter et al. (2011) vorgestellt. Dabei handelt es sich um ein Einzel-Raummodell bestehend aus einem ideal durchmischten Luftvolumen. Das RMB kann aus einer beliebigen Anzahl von Bauteilen und Oberflächen zusammengesetzt werden, die alle an der Energieübertragung beteiligt sind. Jeder Typ eines opaken Bauteils wird durch ein eigenes Modell beschrieben, wobei es sich im Wesentlichen um äußere Bauteile mit und ohne Fenster sowie innere Bauteile handelt, die die eindimensionale Wärmeleitungsgleichung durch mehrschichtige Materialien modellieren. Auf der Außenseite des Raumes werden der konvektive Wärmeübergang zur Umgebung, der Strahlungsaustausch mit dem Himmel und die Absorption der Solarstrahlung berücksichtigt. Äußere Bauteile mit Fenster bestimmen darüber hinaus die einfallenden Solarstrahlungsanteile, die innerhalb des Raumes wirken. Im Inneren des Raums ermitteln vier separate Modelle die Aufteilung der transmittierten Solarstrahlung und innerer Strahlungsquellen auf die Innenraumflächen, den Strahlungsaustausch zwischen den inneren Oberflächen und die mittlere Strahlungstemperatur. Über spezielle Schnittstellen können von extern Verschattungsprofile, Stellsignale für elektrochrome Fenster und Profile für interne Wärmelasten vorgegeben werden. Eine weitere Schnittstelle erlaubt die Modellierung des Raumes als offenes System, wodurch die Betrachtung von Luftwechseln ermöglicht wird. Die Berücksichtigung der Umgebung erfolgt in Form von Wetterdaten.

Um die Parametrierung des RMB zu vereinfachen und die Anwendung in einem universellen Gebäudemodell zu ermöglichen, wurde ein erweitertes Raummodell (RME) entwickelt, das in Abbildung 1 dargestellt ist. Die Ergänzungen beziehen sich vor allem auf eine klare Definition der

Bauteile: „Außenwand“ mit und ohne Fenster, „Innenwand“, „Dach“ und „Fußboden“. Im Fall des Fußbodens wird unterschieden zwischen einem Raum im Erdgeschoss und einem Raum im Obergeschoss. Das Modell für das Dach kann zu- oder abgeschaltet werden, je nachdem ob es sich um einen Raum im Dachgeschoss handelt oder nicht.

Das umgesetzte Gebäudemodell verwendet mehrere Instanzen des RMEs, welche entsprechend dem realen Gebäude miteinander verknüpft werden. Jedes RME wird dabei über eine spezielle Vektor- und Matrix-Notation parametrisiert.⁴ Dazu gehört bspw. die Raumfläche, die Anzahl, Größe und Ausrichtung der Außenwände, die Anzahl und Größe der Innenwände oder die Position des Raumes innerhalb des Gebäudes. Die Verknüpfung der Räume untereinander wird über zwei quadratische Inzidenzmatrizen $\mathbf{R}, \mathbf{S} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ vorgenommen, wobei n der Anzahl der Räume entspricht. Die symmetrische Inzidenzmatrix \mathbf{R} gibt die Verknüpfung der Räume innerhalb eines Stockwerkes an, während die Inzidenzmatrix \mathbf{S} die Verknüpfung der Räume zwischen benachbarten Stockwerken definiert.

Um die Vorgehensweise bei der Parametrierung des Gebäudemodells deutlich zu machen, wird das Beispiel in Abbildung 2 betrachtet. Es handelt sich um ein zweigeschossiges Gebäude, bestehend aus vier Einzelräumen. Für eine bessere Übersicht sind zusätzlich die beiden Schnittebenen A–A und B–B in Abbildung 3 dargestellt. Die Innenwände der Räume und die Räume selbst werden entsprechend den Abbildungen in zufälliger Reihenfolge durchnummeriert. Um die Flexibilität des Modells aufzuzeigen, reicht Raum 1 über zwei Stockwerke und Raum 4 befindet sich oberhalb von Raum 2 und 3. Es ergeben sich die beiden Inzidenzmatrizen

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 0 & 1.1 & 2.2 & 3.1 \\ 1.1 & 0 & 2.1 & 0 \\ 2.2 & 1.2 & 0 & 0 \\ 1.3 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

und

und Skalare durch normale Symbole gekennzeichnet.

⁴ Entsprechend der gängigen Notation werden Vektoren und Matrizen im Folgenden durch **fette**

$$S = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.7 & 0 \end{pmatrix}.$$

Zur Konstruktion der Matrix R werden die Zeilen und Spalten entsprechend der Räume gedanklich durchnummeriert. Jeder besetzte Eintrag entspricht einer Verbindung vom Raum der Zeile zum Raum der Spalte. Die Einträge bestehen aus zwei Zahlen, die mit einem Punkt voneinander getrennt sind. Jede Zahl repräsentiert dabei die Schnittstelle der jeweiligen Innenwand. Die Zahl vor dem Punkt gehört zur Schnittstelle des Raums der Zeile, die Zahl nach dem Punkt gehört

zur Schnittstelle des Raums der Spalte. Demnach ist entsprechend der ersten Zeile Raum 1 mit Raum 2, 3 und 4 verbunden. Die Verbindung von Raum 1 zu Raum 2 erfolgt über die Schnittstelle der Innenwand 1 des Raumes 1 und die Schnittstelle der Innenwand 1 des Raumes 2. Analog ist die Schnittstelle der Innenwand 2 des Raumes 1 mit der Schnittstelle der Innenwand 2 des Raumes 3 und die Schnittstelle der Innenwand 3 des Raumes 1 mit der Schnittstelle der Innenwand 1 des Raumes 4 verbunden. Die Nulleinträge auf der Hauptdiagonalen folgen aus der Tatsache, dass die jeweiligen Räume nicht mit sich selbst verbunden sind.

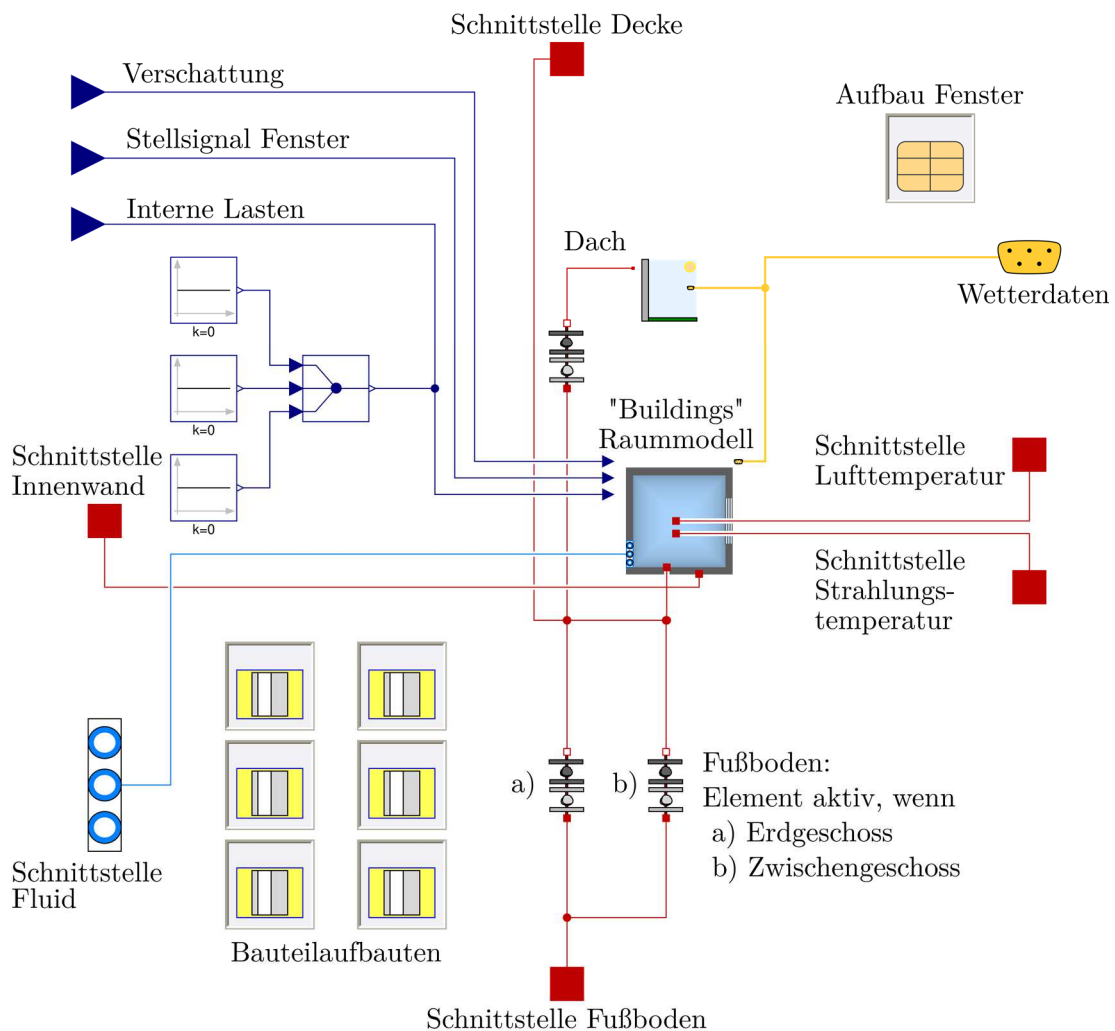


Abbildung 1: Die Parametrierung des Raummodells der „Buildings“ Bibliothek wird durch eine klare Struktur vereinfacht, wodurch das erweiterte Raummodell (RME) entsteht. Dargestellt sind verschiedene Schnittstellen und Bauteilaufbauten für opake und transparente Bauteile.

In der Matrix S sind die vertikalen Verknüpfungen der Räume definiert, wobei eine Zahl ungleich 0 einer vorhandenen Verbindung entspricht. Darüber hinaus stellt die Zahl den relativen Flächenanteil des Raums dar, über den die beiden Räume über ein Stockwerk verbunden. Die Zeilensummen von S müssen sich also immer zu 1 bei vorhandenen oder zu 0 bei nicht vorhandenen Verknüpfungen ergeben. Dabei werden nur die Verknüpfungen vom oberen zum unteren Stockwerk eingetragen. Am Beispiel ist zu erkennen, dass Raum 4 mit Raum 2 und 3 verbunden ist. Die Raumflächenanteile betragen entsprechend 30 % und 70 %. Damit sind die Kopplungen zwischen den Räumen definiert.

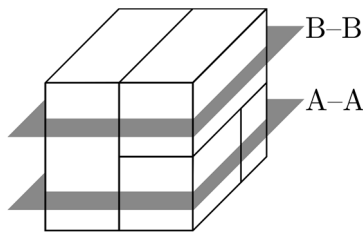


Abbildung 2: Beispielgebäude (dreidimensionale Ansicht) mit den Schnittebenen A-A und B-B

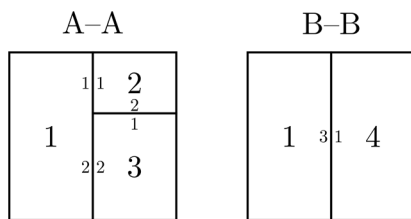


Abbildung 3: Schnittebenen A-A und B-B des Beispielgebäudes

Die Parametrierung der einzelnen Räume erfolgt ebenfalls in Form von Vektoren bzw. Matrizen. Der Vektor

$$\mathbf{A}_{\text{Raum}} = \begin{pmatrix} A_{\text{Raum1}} \\ A_{\text{Raum2}} \\ A_{\text{Raum3}} \\ A_{\text{Raum4}} \end{pmatrix}$$

gibt bspw. die vier Grundflächen für jeden einzelnen Raum vor. Die Reihenfolge der Einträge bezieht sich dabei auf die vorab gewählte Raumnummerierung (vgl. Abbildung 3). Die Vorgabe der Anzahl der Außenwände mit und ohne Fenster wird über die Vektoren

$$\mathbf{n}_{\text{außen,Fenster}} = \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{pmatrix} \text{ bzw. } \mathbf{n}_{\text{außen}} = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{pmatrix}$$

beschrieben. Der Parameter w_i bzw. e_i gibt die Bauteilanzahl des i -ten Raumes an. Analog bestimmt die Matrix

$$\mathbf{A}_{\text{außen}} = \begin{pmatrix} A_{\text{außen1,1}} & A_{\text{außen1,2}} & A_{\text{außen1,3}} \\ A_{\text{außen2,1}} & A_{\text{außen2,2}} & 0 \\ A_{\text{außen3,1}} & A_{\text{außen3,2}} & 0 \\ A_{\text{außen4,1}} & A_{\text{außen4,2}} & A_{\text{außen4,3}} \end{pmatrix}$$

die Gesamtfläche der Außenwände ohne Fenster. Die Anzahl der Zeilen entspricht wiederum der Anzahl der Räume. Die Anzahl der Spalten ergibt sich aus dem maximalen Eintrag in $\mathbf{n}_{\text{außen}}$. Im Beispiel besitzen Raum 1 und 4 drei Außenwände, Raum 2 und 3 dagegen nur zwei, weshalb die übrigen Einträge mit Nullen aufgefüllt werden.

ANWENDUNGSBEISPIEL

An der TU Berlin wird aktuell das Forschungsvorhaben „Innovatives Wärmemanagement für den Hochschulcampus“ durchgeführt, im Rahmen dessen auf dem kompletten Campus Energieverbräuche aufgezeichnet und Gebäudeeigenschaften erfasst werden (vgl. EnEff: HCBC 2016). Eines der untersuchten Gebäude wird als Anwendungsbeispiel herangezogen, um aufzuzeigen, dass mit dem vorgestellten Gebäudemodell plausible Vorhersagen der Wärmeanforderungen möglich sind. Gleichzeitig soll darauf aufmerksam gemacht werden, welchen Einfluss Randbedingungen und Annahmen auf Simulationsergebnisse haben können.

Es handelt sich um ein dreigeschossiges Bürogebäude bestehend aus insgesamt 39 Räumen, wobei es sich um 22 Büros handelt. Vom Gebäude ist der vollständige Grundriss als 2D CAD Modell vorhanden und der Aufbau sowie die bautechnischen Eigenschaften der Bauteile überwiegend bekannt. Auf Basis dieser sehr guten (und in der Praxis meist unüblichen) Datengrundlage wird die Modellierung vorgenommen.⁵ Es ergibt sich ein differential-algebraisches Gleichungssystem, bestehend aus 55.078 Gleichungen. Zur

⁵ Aus Gründen des Datenschutzes können die Daten leider nicht veröffentlicht werden.

Berücksichtigung der Witterungsverhältnisse wird ein Testreferenzjahr für den Standort Berlin verwendet. Da nicht bekannt ist welche Räume tatsächlich beheizt sind, werden von den Räumen pauschal alle Büro-, Seminar-, Sanitär- und Technikräume sowie die Küchen als beheizt angenommen. Damit verbleiben 9 unbeheizte Räume, bei denen es sich um Flure und Treppenhäuser handelt. Der Keller wird nicht explizit abgebildet und stattdessen als Randbedingung mit einer konstanten mittleren Lufttemperatur von 17 °C berücksichtigt. Die Heizperiode wird den Messdaten entnommen und ergibt sich zu den Zeiträumen 01.01.–17.05. sowie 05.10.–31.12. Als Luftwechsel werden die drei Fälle $n = 0 \text{ h}^{-1}$ (kein Luftwechsel), $n = 0,5 \text{ h}^{-1}$ (Mindestluftwechsel) und $n = 2 \text{ h}^{-1}$ (Bürogebäude) betrachtet. Zur Berücksichtigung von internen Wärmelasten, wurde ein gebäudebezogenes Lastprofil erstellt. Dieses untergliedert sich in je ein Profil für:

- Personen,
- Computer und
- Beleuchtung.

Das Personen-Lastprofil wurde durch die Multiplikation der angenommenen Personenzahl von 44 mit der thermischen Last von 70 W bestimmt (vgl. DIN V 18599-10). Das Computer-Lastprofil ergibt sich aus den Leistungsdaten der vorhandenen EDV-Geräte. Die Berechnung der Wärmelast durch künstliche Beleuchtung basiert auf dem vereinfachten Berechnungsverfahren nach DIN V 18599-4. Für alle Leistungsprofile wurden stündliche, wöchentliche und jährliche Zeitpläne erstellt. Beispielhafte wöchentliche Lastprofile sind Abbildung 4 zu entnehmen. Für die anschließende Bestimmung der Wärmeanforderungen wird eine Soll-Raumlufttemperatur von gleichbleibend 20 °C angesetzt. Eine Nachtabsenkung ist nicht vorgesehen.

Bei der Definition der Randbedingungen soll es nicht darum gehen die realen Gegebenheiten des Vergleichsgebäudes exakt wiederzugeben – ein solches Vorhaben stellt sich selbst bei der vorhandenen Datenlage als nicht machbar heraus. Ziel soll es vielmehr sein, unbekannte Einflüsse und Randbedingungen durch plausible Annahmen abzubilden, was sich bspw. in den internen Lastprofilen oder auch dem Testreferenzjahr

widerspiegelt. Im Weiteren wird gezeigt, dass die so getroffenen Annahmen einen signifikanten Einfluss auf die Simulationsergebnisse haben können – Simulationsergebnisse sind generell kritisch zu hinterfragen. Nur unter Angabe sämtlicher Annahmen, Randbedingungen und Parameter ist eine sinnvolle Interpretation möglich.

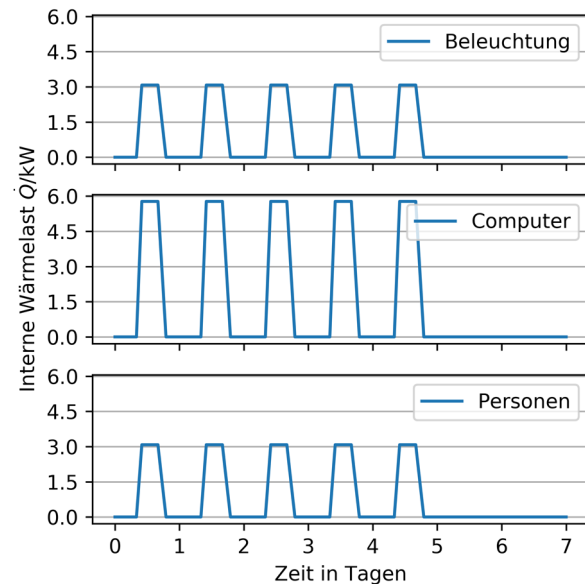


Abbildung 4: Angesetzte Wochen-Profile zur Berücksichtigung der internen Wärmelasten

Als Vergleichswert dient die aufgezeichnete Wärmemenge des Wärmemengenzählers nach dem Wärmeerzeuger im Gebäude. Mögliche auftretende Verluste wurden nicht betrachtet. Die Messdaten (durchgezogene Linie) sowie die Simulationsergebnisse der Wärmeanforderung unter Berücksichtigung verschiedener Luftwechselraten (gestrichelte Linien) sind in Abbildung 5 dargestellt. Es ist zusätzlich der Fall eines Luftwechsels ohne interne Lasten aufgeführt, um den Einfluss der internen Lasten deutlich zu machen. Es ist zu erkennen, dass der Fall eines Luftwechsels von $n = 0,5 \text{ h}^{-1}$ die Messdaten scheinbar am besten beschreibt, obwohl dieser Wert nicht mit der tatsächlichen Nutzung des Gebäudes übereinstimmt. Dies widerspricht den Erwartungen. Bei einer Luftwechselrate von $n = 0 \text{ h}^{-1}$ wird die benötigte Heizenergie unterschätzt und bei einer Luftwechselrate von $n = 2 \text{ h}^{-1}$ deutlich überschätzt. Die Luftwechselrate wurde bewusst als zu variierendem Parameter ausgewählt, um auf die Sensibilität der Simulationsergebnisse aufmerksam zu machen.

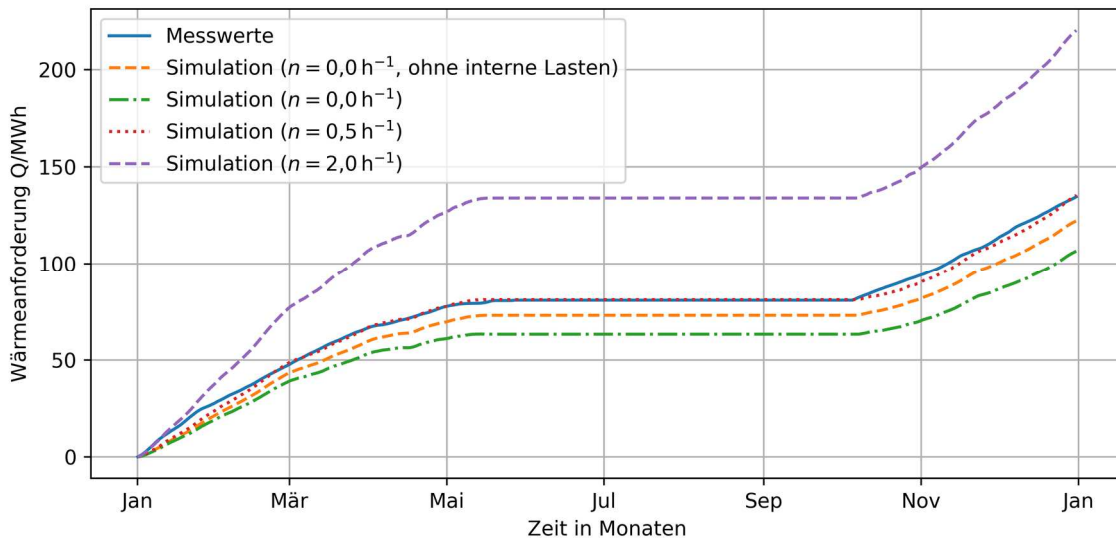


Abbildung 5: Kumulierte Wärmeanforderung des Vergleichsgebäudes. Blau dargestellt ist die Messung und orange das Ergebnis der Simulation ohne Luftwechsel und ohne interne Lasten. Der grüne, rote und lilafarbene Verlauf zeigen das Simulationsergebnis bereinigt um interne Lasten bei keinem Luftwechsel, Mindestluftwechsel und Luftwechsel eines Bürogebäudes.

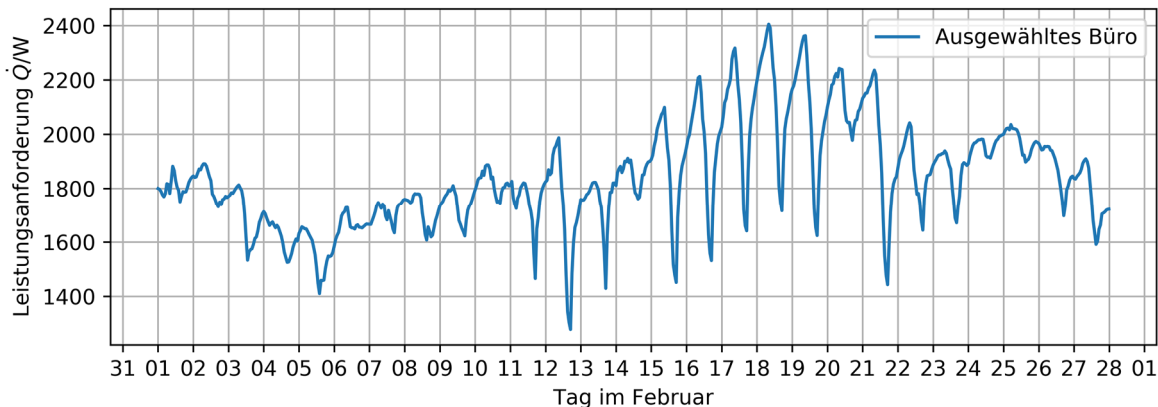


Abbildung 6: Leistungsanforderung eines ausgewählten Büroraums im Februar auf Basis der Simulationsergebnisse.

Eine konstante Luftwechselrate entspricht keinem realen Nutzerverhalten und die internen Wärmelasten wurden abgeschätzt. Die Simulationsergebnisse ergeben sich insgesamt aus einer Vielzahl ungenauer Parameter – dies ist jedoch kein Problem der durchgeführten Simulation, sondern eine Herausforderung bei der korrekten Modellierung bzw. Prognose des Nutzerverhaltens ganz allgemein. Auf der anderen Seite ist zu erkennen, dass der qualitative Verlauf der Messung gut wiedergegeben wird. Das Modell ist in Hinblick auf die Wärmeanforderung in der Lage brauchbare Ergebnisse zu liefern. Die Simulation erlaubt es zudem eine beliebige zeitliche Auflösung vorzunehmen, wodurch sich bspw. die Leistungsanforderung eines ausgewählten Büros im Februar ergibt (vgl. Abbildung 6). Bei einer

Grundfläche von knapp 23 m² stellt sich für einen Altbau ein plausibles Ergebnis ein. Für eine detailliertere Validierung der dynamischen Zusammenhänge wären zeitlich aufgelöste Messdaten von Raumlufttemperaturen und Wärmeleistungen erforderlich.

AUSBLICK

Das vorgestellte Gebäudemodell nimmt viel Arbeit bei der Parametrierung ab, bietet aber noch immer Spielraum für Fehler. Gleichzeitig ist auch die Übertragung der Parameter ab einer gewissen Gebäudegröße weiterhin mühsam. Im Fall des vorliegenden Anwendungsbeispiels war ein CAD Modell mit allen relevanten geometrischen Informationen vorhanden, welches sich für eine

Automatisierung des Prozesses anbietet. Es ist durchaus denkbar, zukünftig CAD Modelle einzulesen, Daten zu extrahieren und die Parametrierung automatisiert aus dieser Datengrundlage vorzunehmen.

ZUSAMMENFASSUNG

Dieser Beitrag zeigt die Implementierung eines komplexen physikalischen Gebäudemodells. Im Vergleich zu bestehenden Lösungen wird der Aufwand der Parametrierung und die Fehleranfälligkeit bei der Modellierung deutlich reduziert. Auf Basis des Gebäudemodells wurde die Wärmeanforderung eines realen Bürogebäudes an der TU Berlin bestimmt und mit Messdaten verglichen. Der quantitative Verlauf der Simulationsergebnisse hängt maßgeblich von den angesetzten Annahmen ab. Damit wird aufgezeigt, wie sensibel Gebäudesimulationen auf Randbedingungen, Parameter und Annahmen reagieren können.

DANKSAGUNG

Das Forschungsvorhaben „Auto-EnEff: Automatisierte Energieeffizienzsteigerungen durch selbsttätige Regelparametrierung im laufenden Betrieb“ wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert (Förderkennzeichen 03ET1447A).

LITERATURVERZEICHNIS

VDI 6020 Blatt 1, 2001: Anforderungen an Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation – Gebäudesimulation.

VDI 6007 Blatt 1, 2015: Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden – Raummodell.

Beuken, Clemens (1936): Wärmeverluste bei periodisch betriebenen Öfen. Dissertation. TU Bergakademie Freiberg.

BMWi (2018): Energiedaten: Gesamtausgabe. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/energiedaten-gesamt-pdf-grafiken.pdf>, zuletzt geprüft am 18.04.2018.

Bohn, Christian; Unbehauen, Heinz (2016): Identifikation dynamischer Systeme. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Cao, Xiaodong; Dai, Xilei; Liu, Junjie (2016): Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. In: *Energy and Buildings* 128, S. 198–213. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.06.089.

EnEff: HCBC (2016): Innovatives Wärmemanagement für den Hochschulcampus. TU Berlin. Online verfügbar unter <https://projektfinfos.energiewendebauen.de/projekt/innovatives-waermemanagement-fuer-den-hochschulcampus/>.

Müller, D.; Lauster, M.; Constantin, A.; Fuchs, M.; Remmen, P. (2016): AixLib – An Open-Source Modelica Library within the IEA-EBC Annex 60 Framework. In: *Proceedings of the CESBP Central European Symposium on Building Physics and BauSIM 2016*, 3–9.

Nytsch-Geusen, Christoph; Huber, Jörg; Ljubijankic, Manuel; Rädler, Jörg (2013): Modelica BuildingSystems – eine Modellbibliothek zur Simulation komplexer energietechnischer Gebäudesysteme. In: *Bauphysik* 35 (1), S. 21–29. DOI: 10.1002/bapi.201310045.

Rouvel, Lothar (1972): Berechnung des wärmetechnischen Verhaltens von Räumen bei dynamischen Wärmelasten. In: *Brennstoff-Wärme-Kraft* 24 (6), S. 245–262.

Wetter, Michael; Bonvini, Marco; Noudui, Thierry S.; Tian, Wei; Zuo, Wangda (2015): Modelica Buildings Library 2.0. In: *Proceedings of BS2015: 14th Conference of International Building Performance Simulation Association*, S. 387–394.

Wetter, Michael; Zuo, Wangda; Noudui, Thierry Stephane (2011): Modeling of heat transfer in rooms in the Modelica "Buildings" library. In: *Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of the International Building Performance Simulation Association*, 1096–1103.

FLEXIBLE OFFICE BUILDINGS - THE EFFECT OF SPACE LAYOUT DESIGN AND ZONING STRATEGIES ON THERMAL COMFORT AND ENERGY DEMAND

J. Gärtner^{1,2}, F. Massa Gray¹ and T. Auer²

¹ Robert Bosch GmbH, Corporate Sector Research and Advance Engineering, Department Future Systems for Building Technology (CR/AEB), Renningen, Germany

² Chair of Building Technology and Climate Responsive Design, TUM Department of Architecture, Technical University of Munich, Germany
E-Mail: jasmin.gaertner@de.bosch.com

ABSTRACT

In this paper, the authors investigate the effect of space layout design and control zoning strategies on thermal comfort and energy demand in flexible office buildings. To support design decisions and create optimal working environments, different HVAC-system control zoning strategies are evaluated for a flexible space layout design. The main finding is that different space layout designs and control zoning strategies significantly impact both thermal comfort and energy demand. Moreover, the level of granularity at which thermal comfort is evaluated is identified as highly relevant when designing new space layouts.

INTRODUCTION

Space layout in office buildings usually needs to be repeatedly redesigned to accommodate the needs of tenants and new organizational structures prevailing during the buildings' life cycle. Common practice is to install internal drywalls, which can be shifted along a predefined façade grid to implement new space layout designs with minimal renovation effort (Neufert and Kister, 2016).

Wagner et al. (2015) emphasize the relevance of user comfort in office buildings. They note that guaranteeing thermal comfort can positively impact employees' productivity. This is why interest in evaluating thermal comfort in office buildings has been growing in recent years. However, to the best of the authors' knowledge, no publications directly addressing the issue of thermal comfort in offices with flexible space layouts can be found in the literature.

Preliminary work in this field focused primarily on the correlation between space layout design and energy demand. For example, Dogan et al. (2015, 2016) have demonstrated the potential to optimize energy demand by rearranging space layout.

In building energy simulation, the modeled building is usually divided into simulation zones that aggregate building spaces with similar properties to reduce model complexity. The same principle of dividing a building into zones can be applied to define control zones for heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems. Throughout this paper, we use the term "control zoning" to describe the practice of dividing a building into areas that the HVAC system can condition and control individually.

Although several studies have indicated that predicted energy demand depends on the simulation zoning strategy (Bleil De Souza and Alsaadani, 2012; Rivalin et al., 2014; Bres et al., 2017), little attention has been paid to the correlation between the simulation zoning strategy and thermal comfort. De Wilde and Tian (2010) have reported that different simulation zoning strategies may significantly affect predicted thermal discomfort and more flexible indoor environments that reduce the risk of overheating need to be designed. Bres et al. (2017) imply that "coarse simulation zoning [...] might result in significant error in the evaluation of energy use and/or thermal comfort." Their results indicate the importance of investigating the correlation between simulation zoning and the actual HVAC zoning of the building in the operation phase. Despite this interest, we could find no studies in which the thermal comfort and energy demand for various control zoning

strategies and space layout constellations has been investigated in detail.

Thus in this paper, we investigate flexible space layout designs in office buildings with two control zoning strategies. We aim to simulate the effect of these varying boundary conditions on thermal comfort and energy demand. Moreover, in a post-processing step, we consider three different levels of granularity to evaluate these target values. Figure 1 illustrates the levels of granularity we address in our work.

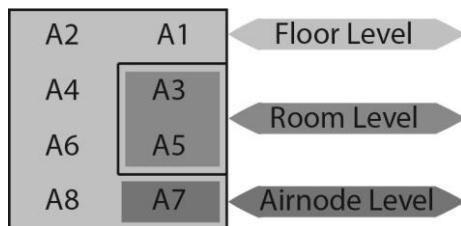


Figure 1: Terminology - levels of granularity.

METHODOLOGY

Building Geometry

A simple quadrilateral, single-floor plan setup is chosen to study the principle of flexible office-space designs. Within this 225 m² floor plan, a 56.25 m² meeting room can be placed in the building according to a predefined façade grid of 3.75 m. Figure 2 shows the space design variants, dimensions and orientation of the building. The hypothetical building is located in Stuttgart, Germany. It has windows in all façades with a 0.8 window-to-wall ratio and an external shading device with a 75% shading fraction, which is active when solar irradiation exceeds 200 W/m² (VDI 2067, 2013).

All of the building variants are modelled in the 3D CAD-Software Rhinoceros (Robert McNeel & Associates, 2017) and Grasshopper (Davidson, 2014), which is a typical framework in which to set up parametric building models in architecture. The parametric modeling tool offers the possibility to quickly change interior space layout design.

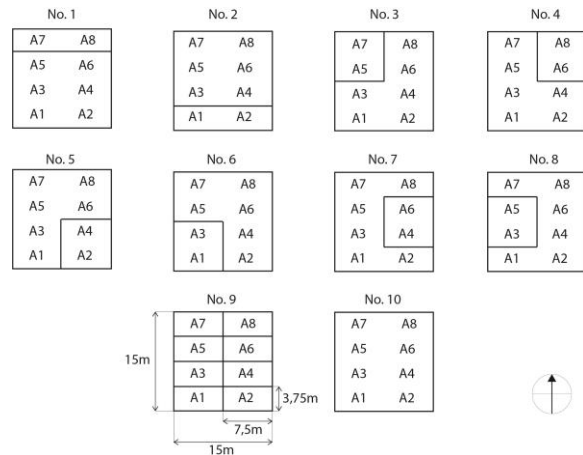


Figure 2: Variants of the space layout design.

Simulation Setup

In this approach, the TRNSYSLizard¹ Plugin (Frenzel and Hiller, 2014) is used to connect the parametric building model with thermal buildings simulation software - in this case TRNSYS (Klein, 1979), as illustrated in Figure 3. TRNLizard allows completely automated setup of the thermal building model and generation of the TRNSYS input files for all space layout variants. Once all of the input files are generated, yearly simulations of all variants can be run and results ultimately analyzed using Matlab (The MathWorks Inc., 2016).

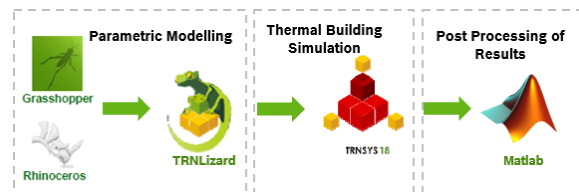


Figure 3: Workflow diagram.

Thermal Building Model

To evaluate thermal comfort conditions in the building with an appropriate level of granularity, a multizone, thermal building model, as presented in Figure 4, is defined.

¹ Also known as TRNLizard (Transsolar Energietechnik GmbH, 2015)

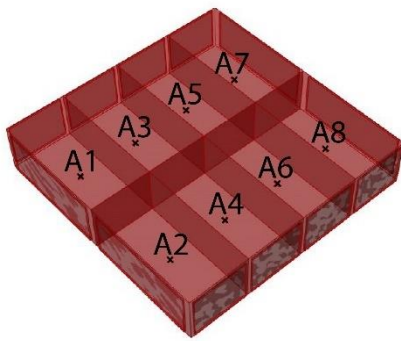


Figure 4: Thermal building model with airnodes.

The building model is composed of two thermal zones and eight airnodes. One thermal zone, defined as type “Meeting Room”, consists of two airnodes. The other, defined as type “Open Office”, consists of six airnodes. This setup changes according to the space layout variants illustrated in Figure 2. Each airnode aggregates the same amount of area and is placed according to the predefined façade grid - every 3.75 m. This model provides the ability to evaluate thermal comfort and energy demand at a high level of granularity. In particular, it is possible to evaluate room climate on an airnode level while considering any desired control zoning strategy.

Airnodes within the same thermal zone are coupled with a bidirectional airflow to model air mixing in areas unseparated by internal drywalls. According to Melikov et. al (1988) the mean air velocity in a heated space without mechanical ventilation is mostly less than 0.05 m/s. Based on this, and considering the buildings’ geometry results in an airnode coupling with an air change rate of 10 1/h. Furthermore, an ideal heating and cooling system with unlimited power supply conditions each airnode. The system maintains the operative temperature in the space within an allowed comfort band. The comfort limits are related to outdoor air temperature and are described in DIN EN 15251 (2012). The system runs year-round. Occupancy schedule and number of persons in the room are assumed based on room usage. Each space-type schedule follows the definitions in DIN EN 16798 (2015). In this paper, the “Open Office” space type is chosen for the large 6-airnode zone and the “Meeting Room” space type for the smaller, 2-airnode zone. Table 1 shows the parameters of the thermal building model assumed in this paper. Table 2 lists all internal gains.

Table 1: Building parameters

Parameter			Construction/ Comment
External wall	U value [W/(m ² *K)]	0.28	Gypsum 0.0125 m; concrete 0.1 m; insulation 0.094 m
Internal wall	U value [W/(m ² *K)]	0.318	Gypsum 0.0125 m; insulation 0.1 m; gypsum 0.0125 m
Internal floor	U value [W/(m ² *K)]	0.581	Wood 0.012 m; acoustic insulation 0.03 m; concrete 0.254 m; gypsum 0.0125 m
Internal ceiling	U value [W/(m ² *K)]	0.981	Concrete 0.25 m; acoustic insulation 0.03 m; screed 0.09 m
Glazing	Window-to-wall ratio	0.8	/
	U value [W/(m ² *K)]	1.09	According to (EnEV, 2014)
	SHGC	0.6	(EnEV, 2014)
	Solar transmittance	0.78	(EnEV, 2014)
	Frame fraction [%]	10	(VDI 2078, 2015)
	Frame U value [W/(m ² *K)]	1.5	/
Shading outside	Shading fraction [%]	75	/
	Irritation shading active [W/m ²]	200	(VDI 2067, 2013)
	Irritation shading inactive [W/m ²]	150	/
Heat bridge	U _{wb} [W/(m ² *K)]	0.05	(EnEV, 2014)
Infiltration	Air change rate [1/h]	0.1	(VDI 2067, 2013)
Interzonal airflow	Air change rate [1/h]	10	Based on (Melikov et. al, 1988)

Table 2: Internal gains

Parameter			Comment
Internal gains people	Sensible heat gain [W]	70	(ASHRAE, 2001)
	Latent heat gain [W]	45	(ASHRAE, 2001)
Occupancy rate "Open Office"	Area per person [m ²]	15	(DIN EN 15251, 2012)
Occupancy rate "Meeting Room"	Area per person [m ²]	2	(DIN EN 15251, 2012)
Internal gains equipment	Laptop power [W]	70	(ASHRAE, 2001)
	Other equipment (printers, copiers) [W/m ²]	1.5	(ASHRAE, 2001)
Internal gains light	Light power [W/m ²]	11	(European Commission, 2011)

Control Zoning Strategies

The following control zoning strategies, illustrated in Figure 5, are considered in this work:

- Fine-grained zoning
- Room-based zoning

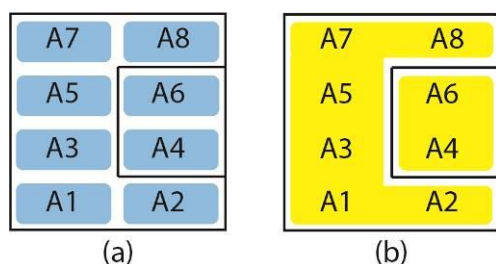


Figure 5: Control zoning strategies: fine-grained zoning (a), room-based zoning (b).

To investigate the effect of different control zoning strategies on thermal comfort and energy demand for all space layout variants, adjustments to the simulation setup are made, as described in the next paragraph.

As the previous section describes, each airnode's operative temperature is controlled individually for the initial simulation setup. This implies that the ideal heating and cooling system provides the energy necessary in each time step to meet the demand in the airnode. Accordingly, a fine-grained control zoning strategy (a), where one

airnode corresponds to one control zone is obtained. To simulate a room-based zoning strategy (b), one room is assumed to correspond to one control zone. In this case, the operative temperature of all airnodes within one room are averaged and the resulting value is used as temperature to be controlled.

After having simulated the building under the different control zoning strategies, comfort evaluation is done on the airnode and floor level. Doing so allows the effects of control zoning granularity on the individual airnodes' comfort conditions to be compared.

RESULTS AND DISCUSSION

Figure 6 shows the relationships that have been investigated and described in this section. For the thermal comfort analysis, results at the airnode level and at the floor level are compared. The energy demand calculation is performed at the room level and the floor level, which provides a sufficient level of detail in this case.

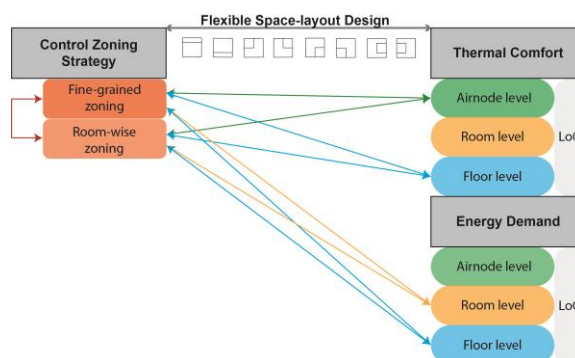


Figure 6: Relationships between the analyzed control zoning strategies and the level of granularity (LoG) in the evaluation of thermal comfort and energy demand.

The total annual energy demand for heating and cooling is computed by analyzing the simulated results in a post-processing step. The results for all space layout variants and the different control zoning strategies mentioned before are analyzed.

Energy Demand

For fine-grained zoning (a), Figure 7 presents the annual heating and cooling energy demand at the floor level, whereas Figure 8 shows the annual heating and cooling energy demand for each zone at the room level. Room types "Open Office" and "Meeting Room", which are placed at various positions on the floor, are distinguished here. Both graphs show the annual energy-demand variations for different space layout designs.

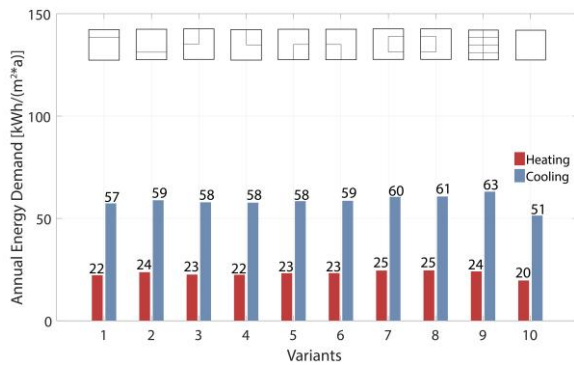


Figure 7: Fine-grained zoning (a): heating and cooling energy demand - floor level.

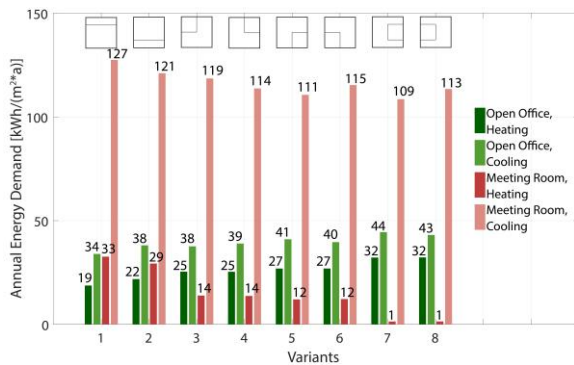


Figure 8: Fine-grained zoning (a): heating and cooling energy demand - room level.

When analyzing energy demand aggregated at the floor level (Figure 7), only small differences between the heating and cooling energy demands of space layout variant nos. 1 to 8 are found (maximum 12% difference for heating and 5% for cooling energy demand). The energy demands of variant nos. 9 (space layout with eight rooms) and 10 (space layout with one large open office) differed the most, amounting to 17% of the total annual heating-energy demand and 19% of the total annual cooling-energy demand. These differences can be mainly explained by the fact that, in contrast to variant no. 9, the air is mixed throughout the whole floor for variant no. 10. Thus, instead of the building having areas in which the local temperatures may trigger active heating or cooling of the respective zones, local heat gains or losses in variant no. 10 are more often compensated by mixing air from different parts of the building, resulting in less heating or cooling demand.

On the other hand, it is interesting to note that analyzing the same results at the room level (Figure 8) reveals significant differences between the space layout variants' annual energy demands. By changing the space layout design, the number of external walls - and thus the

amount of window area - in the meeting room varies from 25% to 75%. This leads to a respective variation in annual heating-energy demand of between 1 kWh/(m²a) and 33 kWh/(m²a). Moreover, a difference in annual cooling energy of up to 14% is found. In contrast, the differences for the open office do not exceed 41% for annual heating-energy demand and 23% for annual cooling-energy demand.

Thermal Comfort

The simulation results are evaluated for thermal comfort in addition to energy consumption. For the purposes of this paper, it is assumed that the building's occupants are comfortable when the operative temperature is within the comfort limits defined in DIN EN 15251 (2012). The thermal comfort is then evaluated for each individual airnode based on two quantities: the ratio between comfortable and uncomfortable hours and cumulative comfort violations over one year. The above-mentioned ratio is calculated as the percentage of hours in which the temperature is outside of the comfort limits compared to all hours in which the airnode is occupied. In addition to the amount of time during which thermal conditions in the airnode are uncomfortable, the cumulative comfort violations in Kelvin-hours [Kh] quantify the magnitude of the deviation between the operative temperature and the comfort limits during occupied times. For example, if the operative temperature remains 2 K above the upper comfort limit for three hours, the cumulative comfort violations will be 6 Kh.

Figure 9 presents thermal comfort at the airnode level with fine-grained control zoning (a). Figure 10 presents the respective results for room-based zoning (b). It is clearly shown that control zoning strategy significantly influences the thermal comfort in each airnode. Whereas comfort limits are only exceeded by up to 7% in a single airnode for fine-grained zoning (a), this value rises to up to 25% for room-based zoning (b). Space layout design also seems to influence thermal comfort in both scenarios.

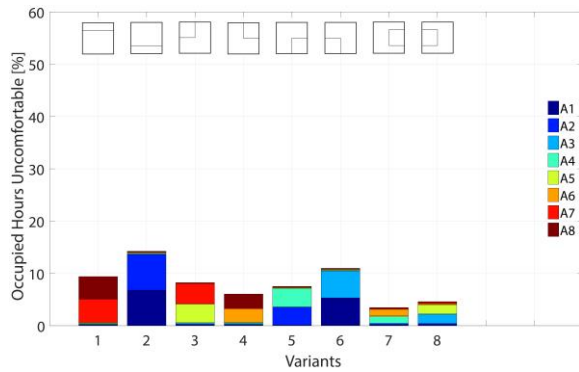


Figure 9: Fine-grained zoning (a): percentage of occupied hours with uncomfortable thermal conditions - airnode level.

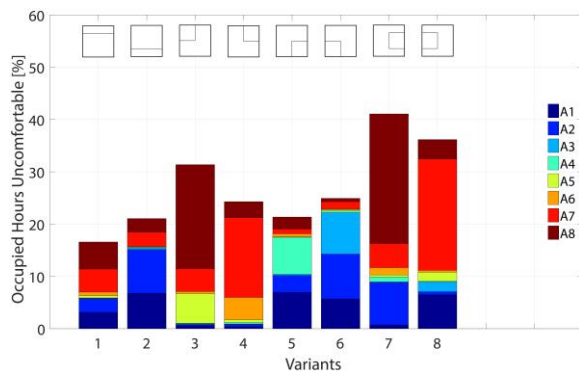


Figure 10: Room-based zoning (b): percentage of occupied hours with uncomfortable thermal conditions - airnode level.

Moreover, to the best of our knowledge, our results describe for the first time the way control zoning strategies affect thermal comfort in building zones with a level of granularity greater than or equal to that of the control zones. This study shows that having fine-grained zoning (a), instead of a room-based zoning (b), can lead to significant thermal comfort differences in individual areas of the floor plan. Control zoning strategy is thus determined to be a crucial factor for meeting thermal comfort requirements.

The most striking result to emerge from the airnode-level data (Figures 9 and 10) is that airnodes A7 and A8 are more frequently uncomfortable than other airnodes. In space layout variant no. 7, airnode A8 reaches 25% of hours with uncomfortable conditions for room-based zoning (b), but only 0.2% for fine-grained zoning (a). This can be explained by the fact that averaging the operative temperatures in all airnodes in the type "Open Office" room may lead to a mean temperature differing from the temperature at the northern façade. Controlling the ideal heating and cooling system according to this mean value will lead to discomfort in these critical areas.

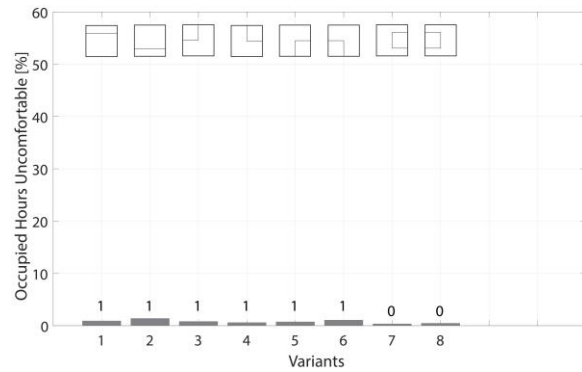


Figure 11: Fine-grained zoning (a): percentage of occupied hours with uncomfortable thermal conditions - floor level.

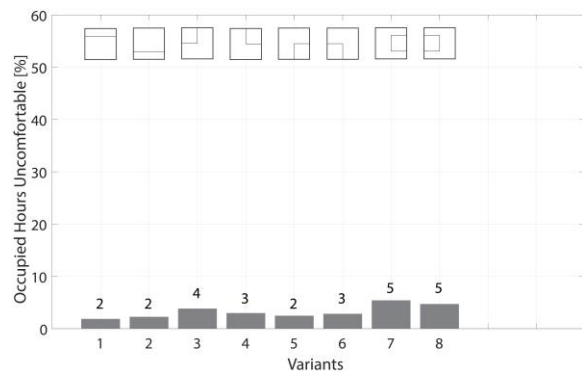


Figure 12: Room-based zoning (b): percentage of occupied hours with uncomfortable thermal conditions - floor level.

Furthermore, at the floor level (Figures 11 and 12), the percentage of hours with uncomfortable conditions varies from 2% to 5% for various space layout designs using room-based control zoning (b). If fine-grained zoning (a), is applied instead, only up to 1% of occupied hours are considered to be uncomfortable.

Taken as a whole, our results show that not only the control zoning strategy, but also the level of granularity significantly affects the assessment of thermal comfort in the building. Looking only at the floor level can lead to ignoring uncomfortable thermal conditions that may occur at the airnode level. Considering the correct temperature at the airnode level is of great importance, however, because it better describes the thermal conditions a building occupant would be exposed to. In fact, when looking at the floor level (Figure 12), only 5% of occupied hours with uncomfortable conditions are obtained in variant nos. 7 and 8 for room-based zoning (b). However, at the airnode level (Figure 10), airnode A8 in variant no. 7 exceeds the comfort limits in up to 25% and airnode A7 in variant no. 8 in up to 21% of occupied hours.

Analyzing cumulative comfort violations, results similar to those obtained from evaluating the

percentage of hours with uncomfortable conditions are found. For different space layout designs with room-based control zoning (b), large variations in the number of comfort violations are obtained with differences of up to 124 Kh/a (Figures 13). These findings emphasize the importance of space layout design for thermal comfort.

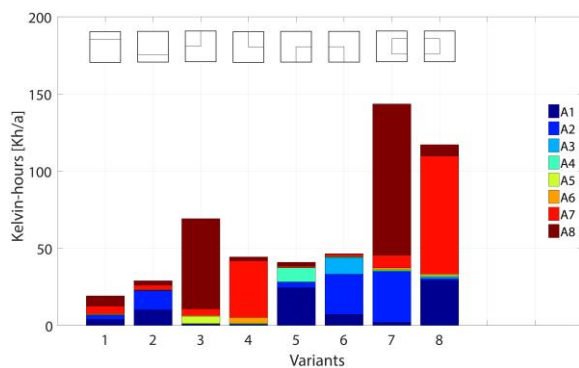


Figure 13: Room-based zoning (b): cumulative comfort violations in Kelvin-hours - airnode level.

CONCLUSION

Level of Granularity

The results of this study indicate that the level of granularity is a crucial factor in the process of assessing thermal comfort in flexible office buildings. To avoid discomfort in an individual area, we suggest selecting a sufficiently high level of granularity and accordingly simulation zoning of the building energy model. On the whole, our results confirm the findings of Bres et al. (2017) that the level of granularity or respectively the simulation zoning is a crucial factor for evaluating thermal comfort and energy demand.

Flexible Office Buildings

Furthermore, we evaluated different space layout designs representing a flexible office building. Significant thermal comfort differences were obtained for the different designs, especially for room-based control zoning. We have shown that changing an office building's space layout design impacts both thermal comfort and energy demand at a room level. This implies that the selection of the space layout design is a crucial factor for flexible office buildings.

The authors' further work will involve exploring a building model that enables a more detailed office-building setup including space layout designs with rooms of different sizes,

configurations, and placements according to a smaller façade grid.

Control Zoning Strategy

Analyzing the results has led us to conclude that control zoning strategy significantly influences thermal comfort. The next stage of our research will entail using realistic HVAC system configurations rather than an ideal heating and cooling system to evaluate the control zoning strategy that should be chosen for different HVAC systems and space layout designs in flexible office buildings.

Based on the promising findings presented in this paper, work on the remaining issues will be continued and presented in future publications.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank Christian Frenzel from Transsolar Energietechnik GmbH for his technical assistance.

We also thank Prof. Dr.-Ing. Frank Petzold from the TUM Department of Architecture for valuable suggestions and discussions.

REFERENCES

- ASHRAE. 2001. 2001 ASHRAE Handbook: Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.
- Bleil De Souza, C., Alsaadani, S. 2012. Thermal zoning in speculative office buildings: discussing the connections between space layout and inside temperature control. Proceedings of IBPSA England, First Building Simulation and Optimization Conference 2012: 417–24.
- Bres, A., Judex, F., Suter, G., De Wilde, P. 2017. Impact of zoning strategies for building performance simulation. Proceedings of EG-ICE2017: 35–44.
- De Wilde, P., Tian, W. 2010. Predicting the performance of an office under climate change: A study of metrics, sensitivity and zonal resolution. Energy and Buildings 42: 1674–84.
- DIN EN 15251. 2012. Eingangsparmeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik. Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 16798. 2015. Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden – Teil 1: Eingangsparmeter

- für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumlufthqualität, Temperatur, Licht und Akustik. Deutsches Institut für Normung e.V.
- Dogan, T., Reinhart, C., Michalatos, P. 2016. Autozoner: an algorithm for automatic thermal zoning of buildings with unknown interior space definitions. *Journal of Building Performance Simulation* 9: 176–89.
- Dogan, T., Saratsis, E., Reinhart, C. 2015. The Optimization Potential of Floor-Plan Typologies in Early Design Energy Modeling. *Proceedings of the 14th IBPSA Building Simulation Conference*.
- EnEV. 2014. Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden. BGBl.
- European Commission, DG Environment-C1. 2011. Indoor Lighting, Technical Background Report.
- Frenzel, C., Hiller, M. 2014. TRNSYSLIZARD - Open source tool for Rhinoceros - Grasshopper zur einfachen, schnellen und sicheren Simulation einer Gebäudezone unter Ankopplung von TRNSYS und DAYSIM. *Proceedings of Fifth German-Austrian IBPSA Conference*: 490–6.
- Klein, S. A. 1979. TRNSYS, a transient system simulation program. Madison: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin.
- Melikov, A. K., Hanzawa, H., Fanger, P. O. 1988. Airflow characteristics in the occupied zone of heated spaces without mechanical ventilation. *ASHRAE Trans.* 94: 52-70
- Neufert, E., Kister, J. 2016. Neufert - Bauentwurfslehre. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Rivalin, L., Marchio, D., Stabat, P., Caciolo, M., Cogné, B. 2014. Influence of Building Zoning On Annual Energy Demand. *Proceedings of International High Performance Buildings Conference*.
- Robert McNeel & Associates. 2017. Rhinoceros (V5.14). <http://www.mcneel.com/>.
- Scott Davidson. 2014. Grasshopper (V0.9.0076). <https://grasshopper3d.com/>.
- The MathWorks, Inc. 2016. MATLAB (R2016a). <https://de.mathworks.com/>.
- Transsolar Energietechnik GmbH. 2015. TRNSOLAR. accessed 09. 04 2018. http://www.trnsys.de/docs/trnlizard/trnlizard_uebersicht_de.htm.
- VDI 2067. 2013. Part 10: Energy demand for heating, cooling, humidification. Verein Deutscher Ingenieure.
- VDI 2078. 2015. Calculation of thermal loads and room temperatures. Verein Deutscher Ingenieure.
- Wagner, A., Höfker, G., Lützkendorf, T., Moosmann, C., Schakib-Ekbatan, K., Schweiker, M. 2015. Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden, Empfehlungen für Planung und Betrieb. Stuttgart: FIZ Karlsruhe, Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur, EnOB, Forschung für Energieoptimiertes Bauen.

EINFLUSS OBJEKT-VERTEILTER ZEITAUFWANDSWERTE AUF DIE ANSPRUCHSBEWERTUNG GESTÖRTER BAUABLÄUFE

R. Gnerlich¹, A. Tiesler¹ und V. Franz¹

¹ Universität Kassel, Fachbereich Bauingenieur und Umweltingenieurwesen, Institut für Bauwirtschaft, Fachgebiet Bauorganisation und Bauverfahren, Kassel, Germany
 E-Mail: bauorganisation@uni-kassel.de

ABSTRAKT

Gerichtliche Auseinandersetzungen über Mehrkosten infolge gestörter Bauabläufe erfordern regelmäßig eine schlüssige Bauzeitanalyse. Hierbei kommt es auf den Nachweis über den Eintritt sowie den Umfang einzelner Bauablaufstörungen an. Dazu ist eine plausible Gegenüberstellung zwischen dem geplanten Soll- und dem tatsächlichen Ist-Bauablauf durchzuführen. Bei den derzeitigen Bauzeitanalysen werden oftmals pauschale Zeitaufwandswerte aus der Urkalkulation herangezogen und mit zusammengefassten Bauteilmengen verrechnet. Demgegenüber können beim Building Information Modeling einzelne Bauteilmodelle genutzt werden, indem eine objektbezogene Umrechnung der pauschalen Zeitaufwandswerte stattfindet. Im weiteren Beitrag folgen Ansätze zur Umrechnungsmethodik mit einer Gegenüberstellung beider Varianten. Anschließend wird gezeigt, inwieweit der Einsatz objektbezogener Zeitaufwandswerte zum plausibleren Erkenntnisgewinn beitragen kann.

Judicial disputes over cost increase resulting from construction process disturbances regularly require a conclusive construction-time analysis. The decisive factor here is the proof of the onset as well as the extent of individual construction process disruptions. For this purpose, a plausible target-to-actual comparison of the construction process is needed. In the current construction time analyzes, generally valid value of the required time from the original calculation are often used and offset with summarized component quantities.

EINLEITUNG

Aufgrund komplexer Bauabläufe ist es häufig nicht eindeutig, unter welchen Umständen Bauablaufstörungen zustande kamen und welche Vertragspartei schlussendlich das Risiko der daraus resultierenden Mehrkosten tragen soll. Um Klarheit zu schaffen, ist in einigen Fällen eine objektive Bauzeitanalyse der teilweise strittigen Sachverhalte unumgänglich.

Für solche Analysen fordern die Gerichte regelmäßig eine „konkrete bauablaufbezogene Darstellung“ (Tiesler, 2017). Unter dem Begriff gilt es einzelfallbezogen und kausal aufzuzeigen, welche Verzögerungen auf das behauptete Verhalten einer Vertragspartei zurückzuführen ist. Anschließend können die jeweiligen Störungsfolgen bewertet werden. Dazu sind aus verfügbaren Sachverhaltsschilderungen schlüssige Soll- und Ist-Terminpläne auszuarbeiten. Schlüssig sind diese erst, wenn sie das Klägerbegehren für die Gerichte nachvollziehbar darstellen können. Hierzu muss u. a. aus dem Soll-Terminplan weitestgehend das vertraglich verpreiste Leistungsversprechen hervorgehen. Hier ist ein Hauptaugenmerk auf die in der Urkalkulation enthaltenen (pauschalen) Zeitaufwandswerte zu richten. Aus dem Ist-Terminplan muss hingegen der tatsächliche Geschehensablauf erkenntlich sein. Erst dann sind die entwickelten Terminpläne einzelfallbezogen gegenüberzustellen. Hierfür ist eine schlüssige Fortschreibung des störungsmodifizierten Soll-Terminplans notwendig. Dies setzt voraus, dass einerseits nahezu alle relevanten Sachverhaltsschilderungen mit den zeitlichen Darstellungen der Terminpläne übereinstimmen und andererseits eine plausible und sachlogische Abfolge der nachgebildeten

Bauabläufe erkennbar wird. Abstraktionen sind, soweit wie möglich, zu vermeiden.

Motivation des Untersuchungsansatzes

In der internationalen Literatur finden bereits Überlegungen statt, wie Bauzeitanalysen über gestörte Bauabläufe zur Anspruchsbewertung mit BIM-Modellen unterstützt werden können (bspw. Valavanoglou et al., 2016; Gibbs et al., 2017). Auch für baubetriebliche Untersuchungen des deutschen Baurechts gibt es bereits die Auffassung, dass BIM „[...] zur Ursachenklärung von Bauablaufstörungen sowie zur Schaffung von Rechtsklarheit im Umgang mit baubetrieblichen Nachträgen [...]“ behilflich sein könnte (Krause et al., 2017). Konkrete Lösungsvorschläge blieben jedoch weitestgehend aus (Gnerlich, 2017).

Ziel des Beitrages ist die Untersuchung, wie die Schlüssigkeit der Bauzeitanalysen beeinflusst wird, sobald die Zeitaufwandswerte der Urkalkulation auf die Bauteilmodelle eines BIM-Modells für die störungsmodifizierte Terminplanfortschreibung verteilt werden.

Hierzu finden im folgenden Text Rechenbeispiele statt. Modellierungskonzepte bleiben außen vor.

GRUNDLAGENTEIL

Zweck und Anforderungen der störungsmodifizierten Terminplanfortschreibung

Um den kausalen Zusammenhang zwischen einer Bauablaufstörung und einer daraus folgenden Bauzeitverlängerung zu führen, wurden in der einschlägigen Fachliteratur diverse Nachweisverfahren entwickelt, bei denen die Fortschreibung störungsmodifizierter Soll-Terminpläne schrittweise erfolgt (Möhring, 2012). Letztere dienen als Vergleichsgröße gegenüber den Ist-Terminplänen zur sukzessiven Ermittlung rechtsanspruchsauslösender Störungsfolgen.

Zur störungsmodifizierten Fortschreibung wird i. d. R. der vertraglich festgelegte Soll-Terminplan weiterentwickelt, indem u. a. einzelfallbezogene Behinderungssachverhalte unter Berücksichtigung baubetrieblicher Aspekte, wie z. B. die auftragnehmerseitige Schadensminderungspflicht (Eschenbruch et al., 2010), eingearbeitet werden. Abstraktionen lassen sich dadurch vermeiden, wenn eine regelmäßige Anpassung

an den tatsächlichen Ist-Bauablauf erfolgt (Tiesler, 2017).

Für schlüssige Soll-Ist-Vergleiche muss der ursprüngliche Soll-Terminplan unter Annahme von den in der „[...] Preiskalkulation umfassten Mitteln bei ungestörtem Bauablauf [...]“ zeitlich realisierbar sein (OLG Köln, 2014). Ansonsten lassen sich Bauzeitverzögerungen infolge einer fehlerhaften Angebotskalkulation des Auftragnehmers nur schwer identifizieren und bei der Beurteilung von verzögerungsbedingten Ansprüchen kaum abgrenzen (OLG Köln, 2014). Dementsprechend ist die Störungsmodifikation in Form eines plausiblen und produktionsorientierten Soll-Terminplans auszuarbeiten (Schiffers, 1998). Dieser muss mit den ungestörten Zeitaufwandswerten der Urkalkulation übereinstimmen.

Pauschal-verteilte Zeitaufwandswerte

Ein Zeitaufwandswert gibt eine Verhältniszahl wieder, die den Zusammenhang zwischen einer angestrebten Ausführungsdauer und einer bestimmten Leistungsmenge definiert. Hierüber kann die Arbeitsproduktivität eines Ausführungsprozesses zum Ausdruck gebracht werden (Hofstadler, 2014). Da sich aber Ausführungsprozesse auf der Baustelle wiederholen können, wird oftmals nur ein Zeitaufwandswert für eine vergleichbare Bauaufgabe verwendet. Bei Ausbaurbeiten ist bspw. davon auszugehen, dass sich – ähnlich wie bei einer Taktfertigung – dieselben Arbeitsschritte in verschiedenen Arbeitsbereichen, wie etwa Räumen, Geschossen, Bauabschnitten usw., wiederholen.

Zeitaufwandswerte vereinen keine situativen, sondern eher allgemeine Kennwerte der angestrebten Arbeitsproduktivität. Bei einer pauschalen Verteilung werden sie mit den geplanten Arbeitszeiten, den Ressourcen sowie den bauteilübergreifenden Mengenanteilen verrechnet, um so die Vorgangsdauern der Bauleistung ermitteln zu können. Sofern der Ressourceneinsatz unverändert bleibt, wird mit dieser Berechnungsmethodik eine konstante Produktionsgeschwindigkeit betrachtet, bezogen auf eine bestimmte Leistungseinheit (z. B. [h/lfdm]). Demnach basiert die klassische Kalkulation auf Zeitaufwandswerten, welche pauschal über die Bauaufgabe verteilt sind.

Bewertung pauschaler Verteilungen

Grundsätzlich ist nicht davon auszugehen, dass die Ausführung einer Bauleistung, in Abhängigkeit zur Ausführungsmenge und einem unveränderten Ressourceneinsatz, mit einer gleichbleibenden Produktionsgeschwindigkeit voranschreitet. Daher dürften Zeitaufwandswerte richtigerweise innerhalb einer geplanten Vorgangsdauer nicht konstant sein. Insbesondere dann nicht, wenn sich ein Vorgang aus mehreren veränderlichen Teilvorgängen zusammensetzt (Möhring, 2012). So umfassen z. B. Malerarbeiten nicht nur einen einzelnen Anstrichvorgang für immer gleichbleibende Wandoberflächen. Möglicherweise können auch Aufräumarbeiten oder Abklebe- und Abdeckvorgänge usw. als Nebenleistungen erbracht werden, die weiterhin, wie die Haupttätigkeit selbst, von der Produktgeometrie und den Umgebungsverhältnissen des Produktionsortes abhängig sind. Gleiches gilt etwa auch für die Berücksichtigung des Einarbeitungseffektes oder logistische Aufgaben während eines Ausführungsprozesses (Kapellmann et al., 2017).

Bei der Planung eines Bauablaufes wird allerdings davon ausgegangen, dass viele unterschiedliche Einflussfaktoren statistisch im Zeitaufwandswert hinterlegt sind und ein „bereinigendes Schwanken“ stattfindet (Möhring, 2012; Kapellmann et al., 2017). Kurzzeitige Beschleunigungen gleichen kurzzeitige Verzögerungen theoretisch aus. Jedoch wirken die Einflüsse naturgemäß nicht synchron auf die Ausführungsgeschwindigkeiten ein, weshalb die Zeitaufwandswerte relativ unscharf über die sich wiederholenden Fertigungsaufgaben verteilt sind. Derartig unscharfe Aufwandsverteilungen können bei der Bewertung von Störungssachverhalten zu Fehlinterpretationen führen.

Objekt-verteilte Zeitaufwandswerte

Die Verteilung des objektbezogenen Zeitaufwandes beruht auf folgendem Prinzip: Auf Grundlage der Urkalkulation werden die Zeitannahmen einer bestimmten Bauleistung entnommen und daraus eine verpreiste Gesamtbauzeit als Dauer berechnet. Sie wird auf geeignete Mengenanteile verschiedener Bauteilmodelle eines BIM-Modells abgebildet. Die Abbildung ist auf bestimmte Objektmengen M_{obj} anzuwenden, die durch die Bauteilmodelle

gegeben sein müssen. Bei der Umrechnung ist der jeweilige Betragswert sowie ggf. auch die Mengeneinheit der Objektmengen zu beachten.

Mit dieser Vorgehensweise lässt sich die hierarchische und topologische Verteilung digitaler Bauteilmodelle nutzen (VDI 2552-3, 2017; Gnerlich, 2017), um den „verpreisten Zeitaufwand“ im BIM-Modell objektweise zu verteilen. Die Berechnung dieser Aufwandsverteilung ist rückwärts gerichtet, mit dem Ziel, die verpreiste Gesamtbauzeit aufrechtzuerhalten; denn sie stellt das zeitliche Leistungsversprechen der Bauleistung als konstante, unveränderbare Größe dar (ohne Entwurfsänderungen o. Ä.). Die daraus ableitbaren *objekt-verteilten Zeitaufwandswerte* können wiederum als indikative Bewertungsgrößen topologisch verteilter Produktivitäten angesehen werden.

Der Übersicht halber folgen weitere vereinfachte Annahmen im Beitrag. So bleiben in den weiteren Betrachtungen Abrechnungsvereinbarungen, wie z. B. Übermessungsregeln, unberücksichtigt. Des Weiteren werden die objekt-verteilten Zeitaufwandswerte durch die Bauteilmodelle wiedergegeben. Dies dient insbesondere der Veranschaulichung. Sinnvollerweise sollte aber eine solche Verteilung nicht über die Bauteilmodelle, sondern in einer geeigneten Kombination mit den jeweiligen leistungsbeschreibenden Teilprozessen erfolgen (VDI Richtlinie 2552-3, 2017).

BEISPIELHAFTE UNTERSUCHUNGEN

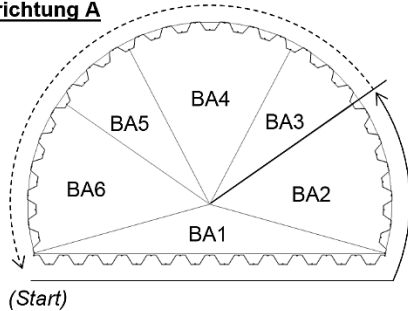
Vorstellung des Beispiels

Betrachtet wird die Herstellung eines kleineren Baugrubenverbau der Bauleistung „Einbringen von Stahlspundbohlen“. Die vertragliche Bauzeit für die Herstellung beträgt 9 Arbeitstage (AT). Überschreitet der Auftragnehmer die vertragliche Bauzeit aufgrund von Eigenverzögerungen, tritt eine Vertragsstrafe in vereinbarter Höhe ein. Mit dieser Vereinbarung schafft der Auftraggeber Anreize, dass der Auftragnehmer fristgerecht fertig wird und Folgegewerke rechtzeitig beginnen können.

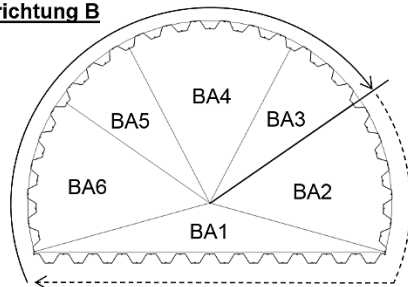
Die Abbildung 1 enthält den projektspezifischen Baugrubenzuschnitt mit 6 Bauabschnitten. Ebenso sind darin zwei alternative Fertigungsrichtungen A und B (oben und unten) eingezeichnet. Im ersten Bauabschnitt BA1

verläuft die Spundwand geradlinig. Hier sollen Doppelbohlen mit einer Länge von 10 [m] und einer Breite von 1 [m] in den Baugrund eingebracht werden. Vom zweiten bis zum sechsten Bauabschnitt (BA2 bis BA6) ist das Einbringen von Einzelbohlen mit einer Länge von 10 [m], einer Breite von 0,5 [m] und einem Winkel von etwa 4,6° erforderlich, um den Rundbogen der Spundwand herstellen zu können. Diese Einzel- und Doppelbohlen sind durch entsprechende Bauteilmodelle in einem BIM-Modell abgebildet (siehe Abbildung 2).

Fertigungsrichtung A



Fertigungsrichtung B



Legende

- > Fertigungsrichtung *bis* D_H
- - - - -> Fertigungsrichtung *nach* D_H

Abbildung 1: Baugrubenzuschnitt

Die gesamte Verbaufäche M_{ges} umfasst 350 [m²]. Dazu müssen 46 Einzelbohlen (EB) und 12 Doppelbohlen (DB) durch eine Vibrationsramme in den Baugrund eingebracht werden. Für jede Einzel- oder Doppelbohle ist ein eigenständiger Rammvorgang erforderlich, der bei angenommenen gleichbleibenden Produktionsbedingungen stattfindet. Zur Herstellung der Verbaufäche konnte ein auskömmlicher Zeitaufwandswert von $w_{pv} = 0,21$ [h/m²] (bzw. Leistungswert: 4,76 [m²/h]) aus der Urkalkulation entnommen und eine Gesamtbauzeit von $D_{ges} = 73,5$ [h] als zeitlich verpreistes Leistungsversprechen ermittelt werden. Bei einer täglichen Arbeitszeit von 8,5 [h/AT] liegt die rechnerische Gesamtbauzeit innerhalb der Vertragsfrist der Bauleistung.

Um den Einfluss der Zeitaufwandswertverteilungen zu verdeutlichen, werden in den folgenden Berechnungen die beiden Fertigungsrichtungen A und B jeweils bis zur Hälfte der Gesamtbauzeit $D_H = 36,75$ [h] betrachtet und später miteinander verglichen.

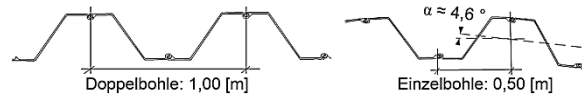
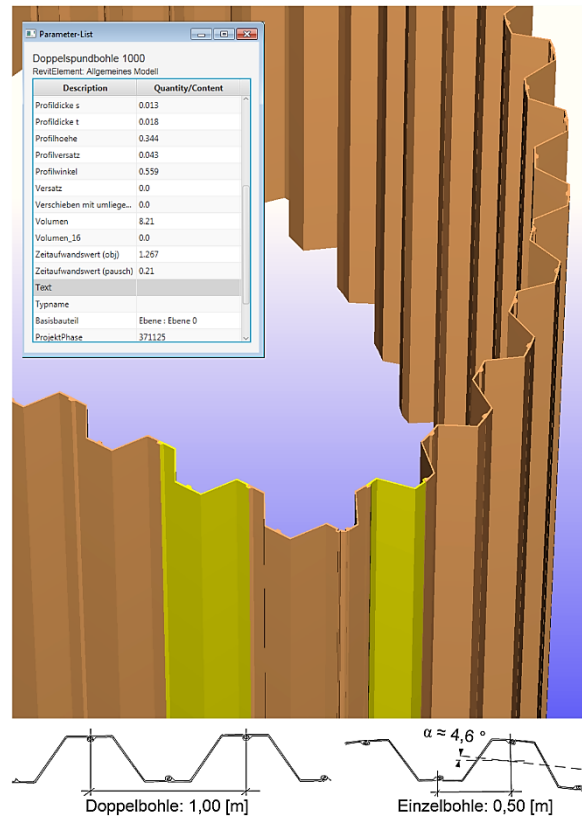


Abbildung 2: Spundbohlenprofile der Bauteilmodelle

Über diesen Zeitraum lässt sich mit dem pauschal-verteilten Zeitaufwandswert von 0,21 [h/m²] eine Verbaufäche von $M_H = 175$ [m²] herstellen. Die Berechnung dazu lautet:

$$M_H = D_H / w_{pv} = 36,75 \text{ [h]} / 0,21 \text{ [h/m}^2\text{]} = \underline{175 \text{ [m}^2\text{]}}$$

Tabelle 1: Mengenverteilung je Fertigungsrichtung über D_H

	Bauabschnitt	Verbaufäche [m ²]	Eingerammte Spundbohlen [Stk]
Fertigungsrichtung A	BA1	120	12 (DB)
	BA2	55	11 (EB)
<i>Zwischenmenge</i>		175	23
Fertigungsrichtung B	BA6	55	11 (EB)
	BA5	30	6 (EB)
	BA4	60	12 (EB)
	BA3	30	6 (EB)
<i>Zwischenmenge</i>		175	35
Gesamtmenge		350	58

Objektbezogene Aufwandsverteilung

Mit der Fertigungsrichtung A kann über die Dauer D_H der Verbau für die Bauabschnitte BA1 und BA2 ausgeführt werden. Währenddessen lassen sich mit der Fertigungsrichtung B die Bauabschnitte BA6, BA5, BA4 und BA3 erledigen. Obwohl bei beiden Fertigungsrichtungen jeweils die Fertigung einer Verbaufäche von 175 [m²] möglich ist, sind bei der Fertigungsrichtung A 23 Rammvorgänge und bei der Fertigungsrichtung B 35 Rammvorgänge auszuführen (siehe Tabelle 1). Die Differenz beider Varianten beträgt somit 12 Bauteile, was etwa 20 [%] der Gesamtmenge entspricht.

Zum besseren Verständnis folgen vereinfachte Annahmen. So sollen sich die Bauteilmodelle aus einem BIM-Modell durch den Mengentypen „Stück“ abgreifen lassen (VDI 2552-3, 2017). Für diesen Mengentyp wird ein objekt-verteilter Zeitaufwandswert mit der Einheit „Arbeitsstunde pro Stück“ [h/Stk] gebildet. Aufgrund dieser vereinfachten Annahme entfällt die proportionale Umrechnung relativer Bauteilmengenwerte. Somit lautet die Berechnung des objekt-verteilten Zeitaufwandswertes w_{ov} pro Rammvorgang:

$$w_{ov} = 73,5 \text{ [h]} / 58 \text{ [Stk]} = \underline{1,267 \text{ [h/Stk]}}$$

In den weiteren Betrachtungen bleiben Arbeitskräfte sowie tägliche Arbeitszeiten unberücksichtigt. Aufgrund der vereinfachten Annahmen lassen sich die Ramm-dauern der einzelnen Spundbohlen D_R gleichermaßen berechnen:

$$D_R = w_{ov} * M_{obj} = 1,267 \text{ [h/Stk]} * 1 \text{ [Stk]} = \underline{1,267 \text{ [h]}}$$

In den folgenden Tabellen 2 und 3 werden die Ramm-dauern pro Bauabschnitt mit den erreichbaren Fertigstellungsgraden über den pauschal-verteilen und über den objekt-verteilten Zeitaufwandswert für die beiden Fertigungsrichtungen gegenübergestellt. Der Vergleich richtet sich nach den Berechnungsergebnissen der pauschalen Verteilung. Pro Fertigungsrichtung wird dazu der „halbe“ Bauablauf mit der Fertigungsdauer D_H von 36,75 [h] und einem Fertigstellungsgrad von 50 [%] gezeigt.

Anhand der Tabellen 2 und 3 ist erkennbar, dass bei den Vorgangsberechnungen mit pauschal-verteilten und objekt-verteilten Zeitaufwandswerten unterschiedliche Fertigstellungsgrade bis zur Hälfte der Gesamtbauzeit D_H zustande

kommen. Obwohl alle Ablaufvarianten aufgrund der abschnittswisen Betrachtungen eine vergleichbare Granularität aufweisen, kann in allen Fällen die verpreiste Gesamtbauzeit D_{ges} berechnet werden. Ihre Zwischenergebnisse weichen jedoch infolge der Aufwandsverteilung voneinander ab.

Tabelle 2: Rammvorgänge der Fertigungsrichtung A

Bauabschnitt	Verbaufäche [m ²] (pauschal-verteilt)		Spundbohlen [Stk] (objekt-verteilt)	
	Einzel-dauer [h]	Fertig-stellungs-grad [%]	Einzel-dauer [h]	Fertig-stellungs-grad [%]
BA1	25,200	34,286	15,204	20,690
BA2	11,550	15,714	13,937	18,966
Σ	36,750	50,000	29,141	39,656

Tabelle 3: Rammvorgänge der Fertigungsrichtung B

Bauabschnitt	Verbaufäche [m ²] (pauschal-verteilt)		Spundbohlen [Stk] (objekt-verteilt)	
	Einzel-dauer [h]	Fertig-stellungs-grad [%]	Einzel-dauer [h]	Fertig-stellungs-grad [%]
BA6	11,550	15,714	13,937	18,966
BA5	6,300	8,571	7,602	10,345
BA4	12,600	17,143	15,204	20,690
BA3	6,300	8,571	7,602	10,345
Σ	36,750	49,999	44,345	60,346

In Abbildung 3 werden die Unterschiede durch vier Balkenpläne veranschaulicht. Darin sind alle Ablaufvarianten mit ihren abschnittswisen Ramm-dauern dargestellt.

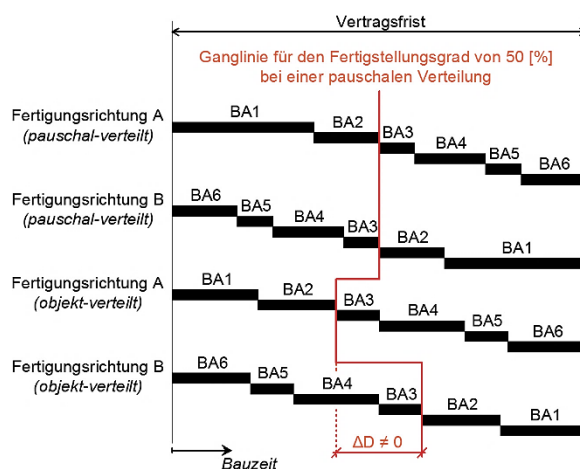


Abbildung 3: Alle Ablaufvarianten als Bauablaufpläne

In Abbildung 3 ist über alle Ablaufvarianten eine Ganglinie für den Fertigstellungsgrad von 50 [%] in Relation zum pauschal-verteilten Zeitaufwand

ingezeichnet. Hieraus geht hervor, dass beide Fertigungsrichtungen bei der pauschalen Verteilung bis zur Hälfte der Gesamtbauzeit einen identischen Leistungsstand erreichen, während bei der objektbezogenen Verteilung eine (verpreiste) Zeitdifferenz von $\Delta D = 15,204$ [h] vorliegt. Diese Zeitspanne beschreibt einen „Interpretationsraum“ aller Ablaufvarianten. Im Rahmen einer objektiven Bauzeitanalyse ist abzuwägen, mit welcher Variante der geplante Bauablauf unter den getroffenen Annahmen am plausibelsten abgebildet wird.

Erläuterung der Abweichungen

Der Grund für die in Abbildung 3 gezeigten Abweichungen ergibt sich in erster Linie aus den Doppelbohlen des Bauabschnitts BA1. Pro Rammvorgang kann dort eine doppelt so große Verbaufäche hergestellt werden, als es vergleichsweise im Bogenbereich der Baugrube möglich wäre.

Im Hinblick auf die Anzahl der durchzuführenden Rammvorgänge stellen sich die beiden objektverteilten Ablaufvarianten am plausibelsten dar. So erfordern z. B. die Bauabschnitte BA1 und BA4 jeweils 12 Rammvorgänge (siehe Tabelle 1). Unter der Annahme, dass für alle Ablaufvarianten identische Produktionsbedingungen vorliegen, müssten die Bauabschnitte BA1 und BA4 eine annähernd vergleichbare Ausführungszeit für ihre Fertigstellungen benötigen. Die objektverteilten Ablaufvarianten erzielen hierzu „passende“ Ergebnisse. Hingegen weichen die Vorgangsdauern der pauschal-verteilten Ablaufvarianten sichtbar voneinander ab (siehe Abbildung 3). Theoretisch wird hier ein Teil des zeitlichen Aufwands der Einzelbohlen auf die Doppelbohlen übertragen.

Allerdings wurde bei der Berechnung vernachlässigt, dass die Doppelspundbohlen eine größere Reibungsfläche als die Einzelbohlen aufweisen, wodurch das Einrammen verlangsamt wird. Demgegenüber ist wiederum bei der Herstellung des Rundbogens mit einem erhöhten zeitlichen Aufwand zu rechnen, da ein aufwändigeres Umstellen der Maschine sowie das Ausrichten der Einzelbohlen erforderlich werden. Solche produktionsabhängigen Umstände, die sich der Baustellen- und Bauwerksgeometrie zuordnen lassen, könnten dazu führen, dass die Berechnung des Soll-Bauablaufes, neben anderen möglichen

Einwirkungen, weiterhin ungenau bleibt. Dennoch können die Rammarbeiten des Soll-Bauablaufes mit der objektbezogenen Verteilung wesentlich realitätsnaher nachgebildet werden.

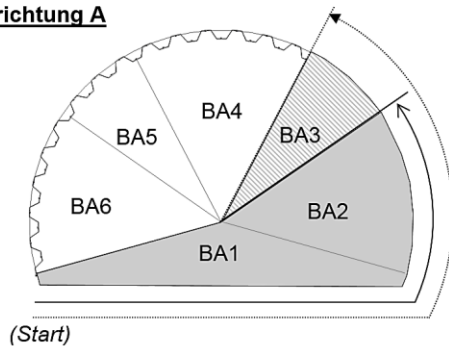
Für die störungsmodifizierte Fortschreibung bzw. Anpassung an den Ist-Bauablauf sind weitere Aufschlüsselungen einer Bauleistung mithilfe verschiedener Aufwandsverteilungen möglich. Beispielsweise könnte bei einer störungsmodifizierten Fortschreibung eine zeitliche Aufwandsverteilung stattfinden, wenn das bekannte Klemmen von Spundbohlen, witterungsbedingte Änderungen des Untergrundes eines Bauabschnittes oder dokumentierte Maschinenausfälle und vieles mehr beachtet werden sollen. Hierdurch lässt sich eine höhere Plausibilität bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der verpreisten Gesamtbauteilmodelle weitere Gewichtungsmöglichkeiten des fortzuschreibenden Zeitaufwandes bereitstellen. Entsprechend könnten numerische Analysemethoden die Schlüssigkeit einer bauablaufbezogenen Darstellung unterstützen (Gnerlich, 2017).

EINFLUSS AUF DIE FORTSCHREIBUNG

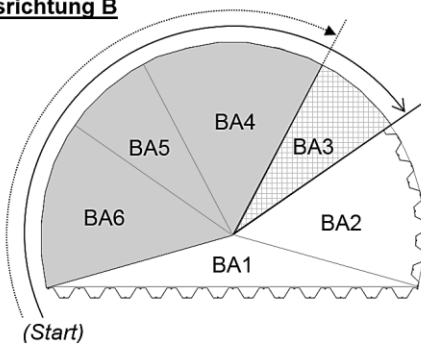
In Abbildung 4 werden die rechnerischen Fertigstellungsgrade zur halben Gesamtbauzeit D_H , einerseits über objektverteilte Zeitaufwandswerte und andererseits über pauschalverteilte Zeitaufwandswerte ermittelt und grafisch gegenübergestellt. Bei der Fertigungsrichtung A liegt der Soll_{ov}-Bauablauf des objektverteilten Zeitaufwandswertes mit 29 [Stk] eingebrachten Spundbohlen vor dem Soll_{pV}-Bauablauf des pauschalverteilten Zeitaufwandswertes mit 23 [Stk] Spundbohlen. Wären im Ist-Bauablauf bis zur Hälfte der Gesamtbauzeit D_H tatsächlich nur 23 [Stk] Spundbohlen in den Baugrund eingerammt worden, ließe sich der Leistungsrückstand des Auftragnehmers nicht mehr erkennen, sofern der Soll-Ist-Vergleich über den pauschalverteilten Zeitaufwandswert vorgenommen werden würde. Bei der Fertigungsrichtung B tritt das Problem ein, dass durch die Berechnung des Soll_{pV}-Bauablaufes mit pauschalverteiltem Zeitaufwandswert fälschlicherweise vermutet werden könnte, dass der Auftragnehmer mit seiner Leistungserbringung die vorgesehene Fertigungsgeschwindigkeit nicht erreicht, da sich nach 36,75 [h] Bauzeit im

Ist-Bauablauf die Spundwand nur in den Bauabschnitten BA6, BA5 und BA4 fertigstellen lässt. Die vermeintliche Verzögerung des Auftragnehmers würde hier immerhin 10 [%] der Gesamtbauzeit entsprechen.

Fertigungsrichtung A



Fertigungsrichtung B



Legende

- Soll_{pv} bis D_H
- Soll_{ov} bis D_H
- Zweifelsfreier Ist-Bauablauf
- ▨ Nicht sichtbarer Leistungsrückstand
- ▧ Mutmaßlicher Leistungsrückstand

Abbildung 4: Mögliche Interpretationsschwierigkeiten

Die beschriebenen Unterschiede beider Berechnungsansätze können zu widersprüchlichen Erkenntnissen führen. Entsprechend sind abstrakte Anspruchsbewertungen möglich.

Weiterführende Untersuchungen infolge eines Soll-Ist-Vergleiches

Angenommen, der Auftragnehmer erhebt einen Anspruch auf Bauzeitverlängerung wegen der Behinderung im Bauabschnitt BA3. Für die Darlegung des Ist-Bauablaufes entnimmt er aus der Dokumentation folgende Angaben:

- die gesamte Ist-Ausführungszeit mit 81,00 [h] (inkl. Behinderungsdauer);
- den Eintrittszeitpunkt der Behinderung, ab ca. 29 [h];
- das Ende der Behinderung, bei etwa der halben Gesamtbauzeit D_H = 36,75 [h].

Für den Soll-Ist-Vergleich werden nun die beiden vorgestellten Zeitaufwandswertverteilungen herangezogen, um die beschriebenen Interpretationsschwierigkeiten zu verdeutlichen. In Abbildung 5 wird der Ist-Bauablauf der Fertigungsrichtung A mit den beiden Soll-Bauabläufen aus pauschal-verteilten und objekt-verteilten Zeitaufwandswerten gegenübergestellt.

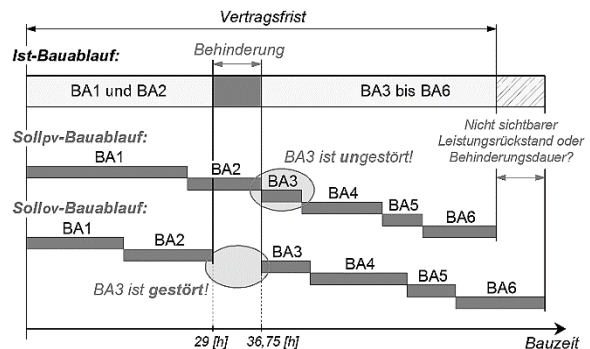


Abbildung 5: Möglicher Einfluss beim Soll-Ist-Vergleich der Fertigungsrichtung A

Die Gegenüberstellungen erlauben verschiedene Rückschlüsse. So könnte beim Soll_{pv}-Bauablauf angenommen werden, dass sich die Behinderung im Bauabschnitt BA3 nicht auf die Leistungserbringung des Auftragnehmers hätte auswirken dürfen, da zu diesem Zeitpunkt die Rammarbeiten noch für den Bauabschnitt BA2 geplant waren. Somit hätte der Auftragnehmer seinen Anspruch auf Bauzeitverlängerung nicht plausibel darlegen können. Vielmehr würde der Ist-Bauablauf länger als der Soll_{pv}-Bauablauf andauern, woraus sich sogar ein Leistungsrückstand des Auftragnehmers von ca. 1 Arbeitstag interpretieren ließe, wenn keine Behinderung nachgewiesen werden kann (vertragliche Soll-Bauzeit = 9 [AT]; tatsächliche Ist-Bauzeit = 81,00 [h] / 8,5 [h/AT] ≈ 10 [AT]). Die Abwehr der Vertragsstrafe in vereinbarter Höhe kann somit nicht gelingen.

Wird hingegen der Soll_{ov}-Bauablauf mit dem tatsächlichen Ist-Bauablauf verglichen, wird ersichtlich, dass der Bauabschnitt BA3 im „Zeitfenster“ der angezeigten Behinderung liegen kann. Demnach konnte die Behinderung plausibel nachgewiesen werden – der vermeintliche Leistungsrückstand würde dann etwa die angezeigte Behinderungsdauer bekräftigen.

FAZIT UND AUSBLICK

Im vorgestellten Beitrag wurden Zeitannahmen aus der Urkalkulation auf einzelne Bauteilmodelle verteilt und für gleich andauernde Rammvorgänge für die Herstellung einer Spundwand angesetzt. Das BIM-Modell hat dazu beigetragen, dass diese Vorgänge in einem virtuellen Raum topologisch verteilt sind. Aus baubetrieblicher Sicht konnte hierüber verdeutlicht werden, dass sich Soll-Bauabläufe schlüssiger fortschreiben lassen, obwohl die Bauleistung inhaltlich nicht geändert wurde.

Mit dem darauf aufbauenden Soll-Ist-Vergleich wurde gezeigt, dass der baubetriebliche Nachweis eines Anspruches auf Bauzeitverlängerung durch die Berechnung mit unterschiedlichen Zeitaufwandswertverteilungen zu gegensätzlichen Rechtsfolgen führen kann. Unter diesen Annahmen würde eine baubetriebliche Anspruchsbewertung Rückschlüsse zulassen, die entweder einen Vertragspartner benachteiligen oder ggf. auch begünstigen. Für die Rechtsklarheit ist generell eine schlüssige Darlegung auszuarbeiten und deshalb die plausible Variante zu wählen. Aus diesem Grund wäre die objektbezogene Verteilung von Zeitaufwandswerten eher geeignet.

Für zusätzliche Plausibilisierungen der verpreisten Gesamtbauzeit könnten weitere Gewichtungen in die Bauteilmodelle bzw. in die modellierten Prozesse eingearbeitet werden. Derartige Gewichtungen erfordern deutlich umfangreichere Zeitaufwandswertverteilungen, die je nach Untersuchungsfall noch aussagekräftigere Berechnungsergebnisse erzielen könnten. Gerade bei komplexen Sachverhalten wäre hierüber eine plausible Rekonstruktion der berechneten Vorgangsdauern möglich. Daher wird der Einsatz eines computergestützten Berechnungsverfahrens auf Modellebene als sinnvoll erachtet.

LITERATUR

- Eschenbruch, K., von Rinteln, C. 2010. Bauablaufstörung und Terminfortschreibung nach der VOB/B – Stresstest für die baubetrieblichen Gutachten. In: NZBau, Heft 7, S. 401-411, Verlag C. H. Beck, München.
- Gibbs, D.-J., Lord, W., Emmitt, S., Ruikar, K. 2017. Interactive Exhibit to Assist with Understanding Project Delays, In: Journal of

Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction, Vol. 9, I. 1.

- Gnerlich, R. 2017. BIM und Simulation – Erste Ansätze und Eingrenzungen für baubetriebliche Gutachten über gestörte Bauabläufe im deutschen Baurecht. In: Tagungsband, 28. BBB-Assistententreffen, S. 75-90, Kaiserslautern.
- Kapellmann, K. D., Schiffers, K.-H., Markus, J. 2017. Vergütung, Nachträge und Behinderungsfolgen beim Bauvertrag, Band 1: Einheitspreisvertrag, 7. Auflage, Werner Verlag, Köln.
- Krause, M., Popescu, P. 2017. Masterplan 4.0 – digital planen und bauen in greifbarer zukunft, In: CS - computer-spezial, Software für Architekten, Ingenieure, Bauunternehmen, 1/2017, S. 8, Bauverlag, Gütersloh.
- Möhring, F. 2012. Ablaufbezogenes Dokumentationsverfahren zum Nachweis der adäquaten Kausalität bei Bauablaufstörungen mit Schwerpunkt Haftungsgrund im Leistungsbereich Landschaftsbau, Dissertation, Kassel.
- OLG Köln vom 28.01.2014 – 24 U 199/12. In: NZBau 2014, Heft 11, S. 626-629, S. 401-411, Verlag C. H. Beck, München.
- Schiffers, K.-H. 1998. Ausführungsfristen – ihre Festlegung und ihre Fortschreibung bei auftraggeberseitig zu vertretenden Behinderungen. In: Jahrbuch Baurecht 1998, Hrsg. Kapellmann/Vygen, S. 275-314, Werner Verlag, Düsseldorf.
- Tiesler, A. 2017. Die konkrete bauablaufbezogene Darstellung Teil 1 – Eine besondere Herausforderung bei der Darlegung von bauzeitbedingten Ansprüchen des Auftragnehmers. In: Tagungsband, 28. BBB-Assistententreffen, S. 263-275, Kaiserslautern.
- Hofstadler, C. 2014. Produktivität im Baubetrieb. Bauablaufstörungen und Produktivitätsverluste. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Valavanoglou, A., Heck, D. 2016. Building Information Modeling and Forensic Analysis of Delay and Disruption, In: Interaction between Theory and Practice in Civil Engineering and Construction, Conference, Istanbul.
- VDI 2552-3 2017. Building Information Modeling – Mengen und Controlling. Verein Deutscher Ingenieure, Richtlinie, Beuth Verlag, Berlin.

METHODS OF TIME SERIES ANALYSIS FOR SIMULATION-BASED URBAN SCALE EVALUATIONS

M. Lauster¹ and D. Müller¹

¹ RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center, Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate, Karlsruhe, Germany

ABSTRACT

Methods of time series analysis can support evaluating building performance simulations such as urban-scale simulations. In particular, for model verification, methods of time series analysis are crucial to evaluate deviations to measurement data and identify the deviation's origins.

Based on performance indicators in combination with forecast-realization diagrams, this paper evaluates the thermal simulation of a research campus. While all indicators proved the good accordance of hourly simulations and measurements, the forecast-realization diagrams together with a Chi²-test and autocorrelation plots revealed further optimization potential in dynamic heating grid simulations and detailed consideration of occupancy and user-induced ventilation.

INTRODUCTION

Urban scale simulations of a large number of buildings using dedicated building performance simulation (BPS) software allow analyzing connected energy supply structures such as heating grids. With this regard, such simulations support optimizing energy supply chains and increasing energy efficiency.

A major task in such investigations is the verification of the simulation model, given that sufficient measurement data is available. This task calls for dedicated methods to compare simulated and measured values, e.g. heat demands. The analysis of such time series (TSA) is a well-researched field of science and different technical books have been published (e.g. Schlittgen, 2012). While emerging predominantly from economics, TSA is also frequently used in BPS, particularly in model verification and

calibration (Royapoor et al., 2015; Mustafaraj et al., 2014; Coakley et al., 2014). Consequently, the American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers published the ASHRAE Guideline 14 (ASHRAE, 2002), which defines standard methods and metrics to be used for model calibration. This guideline primarily proposes the usage of the Root-Mean-Square Error (RMSE) and one of its relative versions, the Coefficient of Variation of the Root-Mean-Square Error (CV(RMSE)). Nevertheless, a review of the proceedings of the Building Simulation Conference 2017 (IBPSA, 2017) revealed that of all papers relevant in the context of TSA, 20% went beyond the recommendations of the guideline, 26% fulfilled the guideline and 54% are limited to visual comparison or integral values. Thus, this paper would like to emphasize the power of TSA and how it can be used in the context of urban scale investigations.

In the following, the paper first discusses different methods of TSA and their specific purposes. Afterwards, it introduces a use case on urban scale that will then be used to apply suitable methods of TSA to evaluate the differences between simulation and measurement and identify further potential for model improvements.

METHODS OF TIME SERIES ANALYSIS

The overall goal of time series analysis is the mathematical description of the series' underlying processes to identify trends, recurrent patterns and systematic changes in single time series and detect relations between several series (Schlittgen, 2012). Given the vast field of tasks and aims that time series analysis can be applied for, the methods of TSA can be divided into different groups using various classification criteria. This paper focuses on methods applicable to multivariate time series, as the purpose is to compare simulations and

measurements to judge the model quality. In general, TSA methods can be divided into time-domain and frequency-domain methods with further subclasses for correlation and spectral analysis. Methods of these subclasses are helpful tools for multivariate time series analysis.

The following chapters will first present absolute and relative performance indicators and forecast-realization comparisons based on time-domain methods and afterwards discuss frequency-domain methods to identify time steps and frequencies with dominating deviations.

Absolute Performance Indicators

Absolute performance indicators serve as basic indicators and allow an easy assessment of the absolute difference between two time series. They are based on the residuals

$$e_t = x_t - y_t \quad (1)$$

with e_t depicting the residuals, x_t for the simulation values and y_t as measurement values in dependence of time. Absolute indicators have in general the same unit as the original time series, what allows an easy interpretation of the indicators.

Absolute indicators mainly serve for comparisons under similar boundary conditions. Comparing the heat demand prediction of the same building model under summer and winter conditions is for example not meaningful as the lower level at summer conditions will lead to lower residuals and consequently to better absolute performance indicator values.

A common absolute indicator is due to its simplicity the Mean Bias Error (MBE), calculated by

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e_t \quad (2)$$

with n as the number of overall time steps or values. As major drawback, the MBE includes cancellation of positive and negative residuals. This drawback is taken care of in the MEAN Absolute Error (MAE)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |e_t| \quad (3)$$

using the absolute values of the residuals.

In addition to the linear indicators MBE and MAE, the root-mean-square error takes into account

the quadratic values of the residuals and is thus more sensitive to outliers.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n e_t^2}{n}} \quad (4)$$

Although the RMSE is due to its quadratic behavior harder to interpret than the MAE, it is widely used in the community (e.g. Raftery et al., 2011; Sun et al., 2016; Li et al., 2015) and recommended for model calibration in the ASHRAE Guideline 14 (ASHRAE, 2002).

Relative Performance Indicators

Relative performance indicators complement their absolute counterparts by setting the absolute value in context to some reference value. This allows judgements of the size of deviations and thus first conclusions about the model quality. Still, one should keep in mind that relative indicators depend on a further value (the reference) and might behave differently under different boundary conditions.

Building on the absolute indicator RMSE, the Coefficient of Variation of the Root-Mean-Square Error (CV(RMSE)) sets the RMSE in relation to the mean value of the residuals.

$$CV(RMSE) = \frac{RMSE}{\bar{e}_t} \quad (5)$$

With the CV(RMSE) also being widely used and recommended in ASHRAE Guideline 14 (ASHRAE, 2002), the Normalized Root-Mean-Square Error (NRMSE) is often neglected.

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\max(e_t) - \min(e_t)} \quad (6)$$

However, the NRMSE reflects the entire residual's range and should be considered when choosing appropriate indicators.

Forecast-Realization-Comparison

In support of the visual comparison of the two time series by plotting both in one figure, forecast-realization diagrams allow an evaluation independently from time. For such a diagram, the simulation results are plotted over the measurement results. In consequence, a perfect fit would follow the bisecting line. With the help of linear regression and the resulting best-fit line, it is possible to judge if there is a constant offset to the bisecting line and if there is a linear trend of deviation between simulation and measurement.

As a further indicator of model quality, the coefficient of determination

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (y_t - x_t)^2}{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2} \quad (7)$$

judges the fit of an estimator (in this case the simulation x) in comparison to using the mean value of the measurements y . A value close to 1 indicates a perfect fit while values less than 0 vote for using the mean instead of the simulation. As the coefficient of determination originates from linear regression, where the mean is the worst possible estimator, literature often states, that the coefficient of determination is always between 0 and 1. As stated, this statement is not valid in the given case of a simulation as estimator. Using linear regression for model evaluation is also documented in literature, e.g. in Kämpf and Robinson (2007) and Gouda et al. (2000).

A second option to compare forecasts and their realizations are Chi²-Tests, which evaluate the direction that forecast and realization progress to from one time step to the next. If the realization is increasing, the realization should do the same and vice versa. As fluctuations around static values would distort this test, a dead band with the width of 1.5 % of the current measurement indicates a constant behavior. A 3x3 table counting the occurrences for all combinations should show more than 30 % for the congruent combinations to indicate a statistically relevant relationship between realization and forecast. For a value less than 30 %, the estimator shows a white-noise behavior compared to the measurement.

Serial Correlation Analysis

In addition to the presented time-domain methods, frequency-domain techniques allow identifying characteristic frequencies, which are correlated to dominating deviations in the residuals. In this context, Auto-Correlation Functions (ACF) detect periodic patterns within the residuals. For this purpose, the time series of the residuals is delayed by one lag (typically the temporal resolution of the time series) and then compared to its original version. This is subsequently done for a defined number of lags and displayed in an ACF diagram. Lags indicating dominating deviations show higher intensities in such a diagram.

A variation of ACF diagrams are cumulated periodograms. In such a periodogram, the intensities per frequency (corresponds to lags)

are cumulated, so that in case of a perfect fit without any peculiarities, the curve follows the bisecting line (all frequencies show the same intensity). Noticeably, Bacher and Madsen (2011) as well as Reynders et al. (2014) used cumulative periodograms for model selection and calibration.

The combination of the described TSA methods allows a clear and concise evaluation of the quality of simulations. While the performance indicators provide first information about the general fit of a simulation compared to measurements, forecast-realization-comparisons can support analyzing the differences in time series' dynamics and allow in combination with serial correlation analysis to infer, where the deviations originate.

SIMULATION-BASED URBAN SCALE INVESTIGATIONS

As a use case for TSA application in BPS on urban scale, this paper relies on investigations of the campus of Forschungszentrum Jülich. The campus consists of 200 buildings with different usage, age and net floor area. A local heating grid supplies most buildings and is primary-supplied by waste heat from a lignite power plant. Figure 1 gives an overview of the campus and indicates buildings not connected to the heating grid.

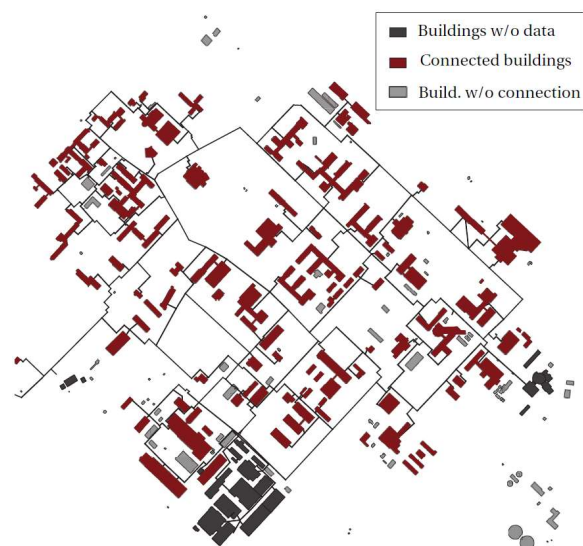


Figure 1: Overview of Forschungszentrum Jülich with heating grid, buildings connected to the grid, not connected buildings and buildings without sufficient data.

Due to data protection reasons of former nuclear research facilities, a small portion of the buildings is excluded from all investigations. For the remaining buildings, the management of the campus provided basic data such as building

age, usage and net floor area as well as measurement data at the central supply point of the heating grid.

This data was the basis for dynamic BPS of the entire building stock using reduced-order building models from the Modelica library AixLib (Müller et al., 2016) in combination with a pre-process for data enrichment using the Python tool TEASER (Remmen et al., 2017). This pre-process includes archetypes of the German building stock to enrich acquired data and the automated generation of Modelica models. Figure 2 sketches the entire toolchain, which is in detail presented in Remmen et al. (2017). The detailed setup of the use case and all boundary conditions are published in Lauster et al. (2014).



Figure 2: Schematic program flow of TEASER.

The result of this toolchain is a time series in an hourly resolution of the heat demand accumulated for the entire building stock. Thus, the following task is to compare this time series to the measurement data of the campus management. The measurement data is beforehand cleaned up and checked for plausibility. The simulation includes estimations for heat losses in the heating grid and measurement data for the buildings without data.

APPLICATION OF TIME SERIES ANALYSIS

Using the measurement data and simulation results of Forschungszentrum Jülich, the following chapter applies the discussed methods of TSA to emphasize the possibilities of an in-depth time series analysis.

Figure 3 shows the time series of the simulation and measurement in daily time steps. All following analyses are based on hourly time steps; still, Figure 3 provides no information with hourly time steps due to the fluctuations of the heat demand. From the visual impression, the simulation follows the measurement quite accurately and level as well as variance of both time series look similar. Significant difference occur between July and September in times of

low heat demands. The simulation seems to have a slightly higher variation, in particular at low heat demands. The annual heat demands, with 103 GWh measured and 106 GWh simulated, support the visual impressions. This corresponds to a difference of 2.9 % relating to the annual demand. Still, these are only annual values and provide no information about the accordance of the actual time series.

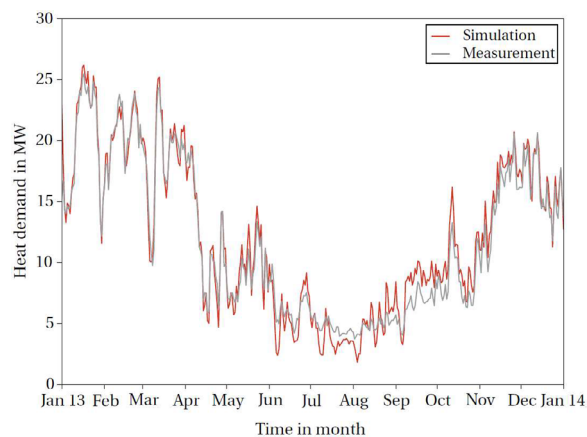


Figure 3: Simulated and measured heat demand profile for Forschungszentrum Jülich in the year 2013 in daily resolution.

For this purpose, Figure 4 shows the forecast-realization diagram with the simulated heat demand on the vertical and the measurements on the horizontal axis. The scatter-plot contains 8760 values based on the hourly values of the heat demands. As mentioned, in the optimal case, the scatter plot would result in a narrow band along the bisecting line. The dashed lines in Figure 4 indicate the RMSE as deviation to the bisecting line and define the confidence interval, where most data points align. The RMSE has a value of 2.1 MW, what is relatively close to the MAE with 1.7 MW. This indicates a small number of outliers, since outliers have a high impact on the RMSE compared to the MAE. To set the RMSE in relation to the residuals, the CV(RMSE) has a value of 17.8 %, accompanied by the NRMSE with a value of 6.9 %. Both values confirm a small variation of the residuals that results in a dense scatter plot. However, it is still necessary to evaluate if the scatter plot follows the bisecting line. For this, the coefficient of determination with the simulation as estimator is an appropriate method. For the shown use case, R^2 has a value of 0.894 and proves a high goodness of fit using the simulation for estimating the heat demand. Further information provides a

linear regression of the scatter plot, shown in Figure 4. The vertical interception is at 0.2 MW, the slope has a value of 1.01. Both values are close to an optimal accordance to the bisecting line so that no general trend of the remaining deviations can be determined. Still, two observations can be made in Figure 4. First, for simulation values of zero, the measurement always shows values between 2.5 and 5 MW. This is related to processes independent to ambient temperature that serve a base load in the grid. They are not reflected in the simulation, where ambient air temperature is the main driver input. The second observation, an overshoot of the simulations for measurement values between 5 and 8 MW, is also related to the base loads. Since these base loads pre-heat the buildings in times, where the simulation calculate no heat demands, the buildings need not to be re-heated in reality whereas this is necessary in the simulation. Although the forecast-realization diagram indicates a high goodness of fit, there might be patterns in the data that might indicate the reasons for the remaining deviations.

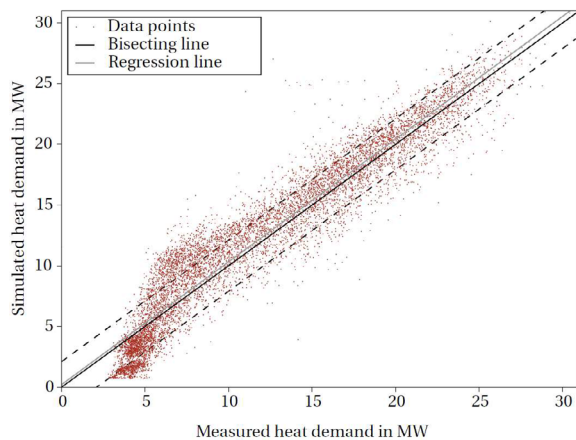


Figure 4: Forecast-realization diagram with measured and simulated heat demand for Forschungszentrum Jülich.

To evaluate the accordance of simulation and measurement regarding the direction of progress for the individual time steps, Table 1 provides the values of a Chi²-test. As mentioned, in the optimal case, simulation and measurement would always show the same behavior and all values would be congruent combinations. As given in Table 1, the values for congruent combinations are the highest within the entire table. However, their sum represents only 47 % of all possible combinations. Thus, simulation and measurement head into the same direction for roughly the half of all cases. The comparison of

two white-noise processes would result in an accordance for 30 % for all cases. Compared to that, the simulation follows the trend and directions of the measurement. As the Chi²-test is highly influenced by the dynamics of the compared processes, Table 1 indicates further potential in considering further dynamic effects in the simulation. One major improvement to address this would be a dynamic simulation of the heating grid. Currently, all buildings are simulated separately, the results are summed up and complemented by estimations of the heat losses. In consequence, the simulation does not account for the times, which the hot water in the grid needs to reach the individual buildings. This leads to a time-shifted behavior of the measurement compared to the simulation. However, a missing information about the dynamics of the residuals, that the Chi²-test cannot provide, is the occurrence of patterns within the deviations.

Table 1: Chi²-test values.

Simulation\ Measurement	Decreasing	Constant	Increasing
Decreasing	1425	804	787
Constant	592	976	851
Increasing	679	897	1749

To detect such patterns, the ACF shifts the residual time series by one lag per step and compares this time series to the original. Figure 5 shows the ACF-plot for the given use case for a range of 200 lags, with each lag representing an hourly time shift. The intensity of one for a lag of zero and neighboring values deliver no information. With a lag of zero, the time series match perfectly and the neighboring intensities still show this influence. The range indicated in red reflects the intensity range of a white-noise process. Interesting observations are the high intensity at 24 lags (one day) and the slight peaks at 144 and 168 lags (six days and seven days). Lower peaking intensities as these three global maxima are harmonics of the daily oscillation. As a result, the deviations between simulation and measurement seem to correlate to daily and weekly patterns. For the daily pattern, exterior as well as internal gains are possible related driver

inputs. Since the ambient are temperature relates additionally to slower patterns via heat transfer through the building mass, and these slow patterns show no significance, the focus shifts to internal gains and user related ventilation. In addition to that, the weekly pattern also indicates the user as potential source of deviations. Currently, the occupancy profiles represent a typical workday and no weekend is implemented. The simulation takes into account the heat gains due to persons as well as user-induced ventilation due to window opening. Thus, the deviations might decrease if users absence on weekend and user-induced ventilation is accounted for in a detailed manner.

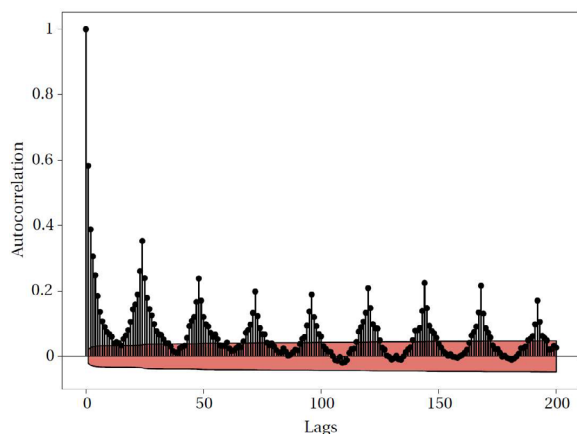


Figure 5: ACF-diagram of the residuals with 200 lags for Forschungszentrum Jülich.

In addition to the ACF-plot, Figure 6 shows the cumulative periodogram of the residuals. Here, the dashed lines indicate a white-noise process, which would follow the bisecting line with equally distributed intensities. The observations are similar to Figure 5 with a significant rise of the cumulated intensity for a daily frequency of 0.0344 a^{-1} . As additional information, the periodogram proves that no further frequencies, which might be outside of the lags in Figure 5, show significant changes of the intensity.

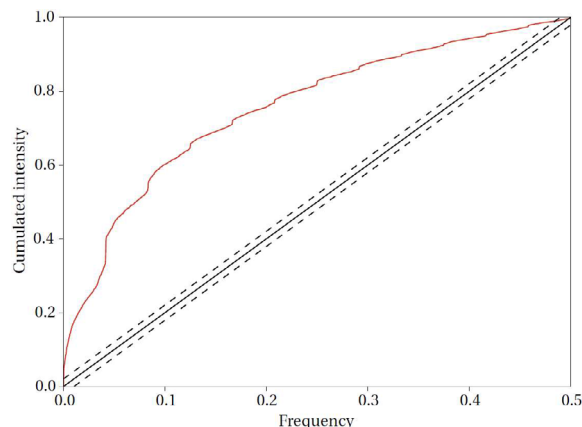


Figure 6: Cumulative periodogram of the residuals for Forschungszentrum Jülich.

To conclude, the TSA methods applied in this chapter prove the general good accordance of simulation and measurement, for the general trend and variance of both time series as well as for metrics taking into account the dynamics. However, from the forecast-realization diagram, the Chi²-test and the ACF-plot, the remaining deviations seem to be related to temperature-independent base loads, the dynamics of the heating grid and the consideration of user occupancy and user-induced ventilation.

CONCLUSION

Methods of time series analysis can support evaluating building performance simulations of various kinds, such as urban-scale simulations. In particular, for model verification and calibration, TSA methods are a crucial key technique to thoroughly analyze and evaluate deviations to measurement data and identify the deviation's main drivers. Although a large body of research has been carried out on that topic and TSA were successfully applied in BPS, there is still further potential for supporting applications of TSA in BPS.

From the vast techniques of TSA methods, this paper focused on the application of absolute and relative performance indicators such as mean absolute error, root-mean-square error, coefficient of variation of the root-mean-square error and the normalized root-mean-square error. For further insights into the time series of simulation and measurement, forecast-realization diagrams with linear regression and the determination of the coefficient of determination in addition to Chi²-tests, ACF-plots and cumulative periodograms offer different

views on the residuals and allow inferring to the underlying origins of deviations.

The application of the presented TSA methods on an urban scale use case of a research center showed a general good accordance of simulations and related measurements of the heat demand of 200 buildings. The simulations as well as the measurements have an hourly resolution and the resulting residuals match with an CV(RMSE) of 17.8 % and an annual difference of 2.9 %. The coefficient of determination using the simulation as estimator resulted in a value of 0.894. Although all these values indicated the good accordance, temperature-independent base loads lead to two significant agglomerations of deviating values in the forecast-realization diagram. Further potential for model improvement by adding dynamic simulations of the heating grid was identified with the help of a Chi²-test. The final step using ACF-plots and cumulative periodograms revealed significant deviations at lags, resp. frequencies related to occupancy and user-induced ventilation.

In conclusion, the application of TSA methods to the shown use case could on the one hand prove the good accordance of both time series and revealed on the other hand further potential for model improvements to decrease the deviations.

ACKNOWLEDGEMENT

We gratefully acknowledge the financial support by BMWi (German Federal Ministry of Economics and Technology) under promotional reference 03ET1562A.

REFERENCES

ASHRAE (2002). Guideline 14-2002. Measurement of energy and demand savings, 2002, vol. 22.

Bacher, Peder; Madsen, Henrik (2011): Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings. In *Energy and Buildings* 43 (7), pp. 1511–1522. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.02.005.

Coakley, Daniel; Raftery, Paul; Keane, Marcus (2014): A review of methods to match building energy simulation models to measured data. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 37, pp. 123–141. DOI: 10.1016/j.rser.2014.05.007.

Gouda, M. M.; Danaher, S.; Underwood, C. P. (2000): Low-order model for the simulation of a building and its heating system. In *Building Services Engineering Research and Technology* 21 (3), pp. 199–208.

IBPSA (Ed.) (2017): Proceedings of BS2017: 15th Conference of International Building Performance Simulation Association. BS2017. San Francisco, Aug. 7-9.

Kämpf, Jérôme Henri; Robinson, Darren (2007): A simplified thermal model to support analysis of urban resource flows. In *Energy and Buildings* 39 (4), pp. 445–453. DOI: 10.1016/j.enbuild.2006.09.002.

Lauster, M.; Teichmann, J.; Fuchs, M.; Streblow, R.; Mueller, D. (2014): Low order thermal network models for dynamic simulations of buildings on city district scale. In *Building and Environment* 73, pp. 223–231. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.12.016.

Li, Qi; Quan, Steven Jige; Augenbroe, Godfried; Yang, Perry Pei-Ju; Brown, Jason (2015): Building Energy Modelling at Urban Scale: Integration of Reduced Order Energy Model with Geographical Information. In : Proceedings of BS2015: 14th Conference of International Building Performance Simulation Association. BS2015. Hyderabad, Dec. 7-9, pp. 190–199.

Müller, Dirk; Lauster, Moritz; Constantin, Ana; Fuchs, Marcus; Remmen, Peter (2016): AixLib - An Open-Source Library within the IEA-EBC Annex60 Framework. In : BauSIM 2016: Sixth German-Austrian IBPSA Conference. BauSIM 2016. Dresden, 14.-16. September. IBPSA Germany, pp. 3–9.

Mustafaraj, Giorgio; Marini, Dashamir; Costa, Andrea; Keane, Marcus (2014): Model calibration for building energy efficiency simulation. In *Applied Energy* 130, pp. 72–85. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.05.019.

Raftery, Paul; Keane, Marcus; Costa, Andrea (2011): Calibrating whole building energy models: Detailed case study using hourly measured data. In *Energy and Buildings* 43 (12), pp. 3666–3679. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.09.039.

Remmen, Peter; Lauster, Moritz; Mans, Michael; Fuchs, Marcus; Osterhage, Tanja; Müller, Dirk (2017): TEASER. An open tool for urban energy modelling of building stocks. In *Journal of Building Performance Simulation*, pp. 1–15. DOI: 10.1080/19401493.2017.1283539.

- Reynders, G.; Diriken, J.; Saelens, D. (2014): Quality of grey-box models and identified parameters as function of the accuracy of input and observation signals. In *Energy and Buildings* 82, pp. 263–274. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.07.025.
- Royapoor, Mohammad; Roskilly, Tony (2015): Building model calibration using energy and environmental data. In *Energy and Buildings* 94, pp. 109–120. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.02.050.
- Schlittgen, Rainer (2012): *Angewandte Zeitreihenanalyse mit R*. 2. Aufl. München: Oldenbourg
- Sun, Kaiyu; Hong, Tianzhen; Taylor-Lange, Sarah C.; Piette, Mary Ann (2016): A pattern-based automated approach to building energy model calibration. In *Applied Energy* 165, pp. 214–224. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.12.026

ÜBERTRAGBARE METHODEN ZUR BESTIMMUNG UND RÄUMLICHEN VERORTUNG DES WÄRMEBEDARFS VON WOHNGBÄUDEN IN STÄDTEN

K. Mainzer¹, R. McKenna¹ und W. Fichtner¹

¹ Lehrstuhl für Energiewirtschaft, IIP, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Germany
 Kontakt: kai.mainzer@kit.edu

KURZFASSUNG

Modellierer von städtischen Energiesystemen stehen häufig vor der Herausforderung fehlender Daten. Dieser Beitrag stellt daher zwei Ansätze vor, die zur Wärmebedarfsberechnung des Wohngebäudebestands einer Stadt genutzt werden können: Eine Top-Down Methode zur Abschätzung des gesamten städtischen Endenergiebedarfs und eine Bottom-Up Methode zur detaillierten Simulation des Wärmebedarfs der Wohngebäude. Eine Anwendung beider Methoden auf mehrere Städte demonstriert deren Übertragbarkeit und ermöglicht sowohl den Vergleich beider Ansätze, als auch eine Einschätzung der Genauigkeit. Eine detailliertere Analyse der Ergebnisse der Bottom-Up Methode demonstriert die zeitliche und räumliche Auflösung und die Eignung der Methode für die Energiesystemmodellierung.

ABSTRACT

Modellers of urban energy systems are often faced with the challenge of missing data. This article therefore presents two approaches that can be used to calculate the heat demand of a city's residential building stock: A top-down method for estimating the overall final urban energy demand and a bottom-up method for detailed simulation of the heat demand of residential buildings. The application of both methods to several cities demonstrates their transferability and allows a comparison of both approaches as well as an assessment of their accuracy. A more detailed analysis of the results of the bottom-up method demonstrates the temporal and spatial resolution and the suitability of the method for energy system modelling.

EINLEITUNG

Für die Analyse und Optimierung von städtischen Energiesystemen stehen Modellierer häufig vor der Herausforderung, dass die dafür benötigten Energieverbrauchsdaten nicht bekannt sind. Dies gilt insbesondere für den Wärmebedarf, da Wärme als Energieträger dezentral erzeugt und verbraucht wird und auch den Energieversorgern häufig keine genauen Informationen zur Struktur des Wärmebedarfs vorliegen.

Ziel dieses Beitrags ist daher die Vorstellung von übertragbaren Methoden zur Abschätzung des Wärmebedarfs von Wohngebäuden, z. B. für die Verwendung in optimierenden Energiesystemmodellen. Der Umfang der Analysen (Städte oder Quartiere) ist dabei so groß, dass eine detaillierte Abbildung des thermodynamischen Verhaltens der Einzelgebäude, insbesondere aufgrund der fehlenden Verfügbarkeit von detaillierten Informationen zur Geometrie und den Baumaterialien jedes einzelnen Gebäudes, nicht möglich ist. Daher sollen in diesem Beitrag zwei Ansätze zur Wärmebedarfsermittlung mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad vorgestellt und miteinander verglichen werden.

METHODIK

Top-Down-Endenergiebedarfsschätzung

Die hier vorgestellte Methode soll eine vereinfachte Abschätzung des Endenergiebedarfs einer Stadt oder Gemeinde in allen Sektoren ermöglichen, ohne einzelne Prozesse explizit abzubilden. Die hierbei gewählte Vorgehensweise baut auf Mainzer et al. (2014, Abschnitt 3.4) auf und basiert auf der

Annahme, dass der Energiebedarf einer Region mit ausgewählten sozio-ökonomischen Indikatoren korreliert. Da sowohl der Energiebedarf, als auch die entsprechenden Indikatoren auf nationaler Ebene bekannt sind (BMW 2017; Destatis 2017), kann der regionale Energiebedarf anhand der relativen Größe dieser Indikatorwerte von der nationalen auf die regionale Ebene heruntergebrochen werden („Top-Down Skalierung“).

Hierfür werden insgesamt 10 sozio-ökonomische Indikatoren als Maß für die relative Größe für jeden der vier Sektoren Haushalte (HH), Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD), Industrie (IND) und Verkehr (VK) herangezogen. Die Gewichtungsmatrix $w_{s,i}$ (Tabelle 1) gibt an, wie stark jeder Indikator i für die Berechnung der Größe eines Sektors s gewichtet wird. Diese Gewichte wurden bestimmt, indem der mittlere quadratische Fehler bei Anwendung der hier beschriebenen Methode im Vergleich zu gemessenen Verbrauchswerten minimiert wurde. Hierfür wurden 17 deutsche Gemeinden betrachtet, für die nach Sektoren aufgetrennte Verbrauchswerte veröffentlicht wurden (Energieagentur RLP 2017, Stadt Karlsruhe 2012, Neumann et al. 2012).

Tabelle 1: Gewichtungsmatrix $w_{s,i}$, die jedem Indikator i ein Gewicht zur Berechnung der Größe des Sektors s zuordnet.

Indikatoren	Sektoren			
	HH	GHD	IND	VK
Fläche	0,074	0,000	0,786	0,279
Einwohner	0,925	0,958	0,168	0,209
Anzahl zugelassener PKW	0,000	0,000	0,000	0,269
Anzahl zugelassener KfZ	0,000	0,000	0,000	0,236
Wohngebäude	0,000	0,000	0,000	0,008
Industriebetriebe	0,000	0,000	0,015	0,000
Industriebeschäftigte	0,000	0,000	0,010	0,000
Bruttoentgelte in der Industrie	0,000	0,000	0,012	0,000
Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte	0,000	0,042	0,007	0,000
Beschäftigte im Bereich GHD	0,000	0,000	0,002	0,000

Der Endenergiebedarf $EED_{m,s,ec}$ nach Energieträger ec in Sektor s der Gemeinde m berechnet sich somit durch Anwendung der Gewichtungsmatrix $w_{s,i}$ auf das Verhältnis der regionalen ($IV_{m,i}$) zu den nationalen (IV_{N_i}) Werten aller Indikatoren I . Der so berechnete Wert (der als „Sektorgröße“ für diese Gemeinde

interpretiert werden kann) wird dann als Skalierungsfaktor für den entsprechenden nationalen Endenergiebedarf $EED_{N,s,ec}$ verwendet:

$$EED_{m,s,ec} = EED_{N,s,ec} * \sum_{i \in I} w_{s,i} * \frac{IV_{m,i}}{IV_{N_i}}$$

Diese Methode kann somit verwendet werden, um einen schnellen Überblick über die Struktur des Energiebedarfs einer Region zu gewinnen und um die Methoden zur Wärmebedarfsberechnung des Wohngebäudesektors einer Gemeinde (s. u.) zu validieren. Für diesen Vergleich wird aus dem Ergebnis $EED_{m,s,ec}$ einer Gemeinde m der gesamte Endenergiebedarf des Haushaltssektors ($s = HH$) und die Summe der Energieträger, die der Wärmeversorgung zugerechnet werden ($ec = \{Gas, Kohle, Öl, Fernwärme, Erneuerbare\}$), verwendet.

Bottom-Up Modellierung des Wärmebedarfs der Wohngebäude

Zur Modellierung des Wohngebäudebestands einer Gemeinde wird ein Ansatz verwendet, der Geodaten mit statistischen Gebäudebestandsdaten und einer Gebäudetypologie kombiniert. Hierfür wird zunächst aus der Zensusdatenbank der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder (Destatis 2014) die Anzahl der Wohngebäude sowie deren Häufigkeitsverteilung über 10 Alters- und 10 Gebäudegrößenklassen für jede 1 km²-Rasterzelle innerhalb des Untersuchungsgebietes bezogen und daraus eine Häufigkeitsverteilung nach TABULA-Gebäudetypen (IWU 2016) erstellt. Anschließend werden alle Gebäude aus OpenStreetMap (OSM 2018) innerhalb einer Rasterzelle zu einer der dort vorhandenen TABULA-Gebäudetypen klassifiziert. Für diese Klassifizierung werden zwei Merkmale berücksichtigt: Tags, die auf Wohn- (z. B. „residential“, „house“, „apartments“, o.ä.) bzw. Nichtwohngebäude (z. B. „garage“, „industrial“, „commercial“) schließen lassen, sowie die Grundfläche des Gebäudes. Das Gebäude wird dann demjenigen TABULA-Gebäudetyp zugeordnet, dessen mittlere Grundfläche (die aus den Parametern der TABULA Typologie bekannt ist) am geringsten von der tatsächlichen Grundfläche des Gebäudes abweicht. Abbildung 1 visualisiert die

Zuordnung von Gebäudegrundrissen zu den statistischen Daten der Rasterzellen.

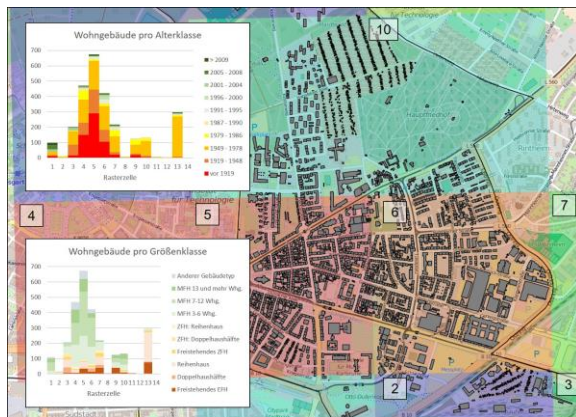


Abbildung 1: Zuordnung von Gebäuden aus OpenStreetMap (grau) zu statistischen Gebäudebestandsdaten (farbige Quadrate). Quelle: Eigene Darstellung mit Daten von OSM und Zensus2011.

Gebäude, die aufgrund ihrer Tags oder aufgrund der für Wohngebäude ungewöhnlichen Größen als Nichtwohngebäude klassifiziert wurden, werden keinem der TABULA-Gebäudetypen zugeordnet und im Folgenden nicht weiter berücksichtigt. Falls in OSM zu wenige Gebäudetypen vorhanden sind (unvollständige Datenlage), werden die fehlenden Gebäude mit Standardwerten aus der Gebäudetypologie und ohne geografische Koordinaten erzeugt.

Als Ergebnis dieser Vorgehensweise ist jedes Gebäude innerhalb der betrachteten Region einem Gebäudetyp zugeordnet und somit der gesamte statistische Wohngebäudebestand geografisch verortet.

Anschließend wird für jeden Gebäudetyp der Wärmebedarf im Jahresverlauf bestimmt. Dabei kann zunächst eine optionale Anpassung der spezifischen Gebäudeparameter der verwendeten Gebäudetypologie vorgenommen werden, falls genauere Informationen über den lokalen Gebäudebestand vorliegen. Diese Informationen können durch Begehungen vor Ort gewonnen werden. Wird bspw. beobachtet, dass die Gebäude einer bestimmten Baualtersklasse in der betrachteten Gemeinde meist einen beheizten Dachstock haben, während in der nationalen Gebäudetypologie jedoch von einem unbeheizten Dachstock ausgegangen wird, kann dieser Parameter in der Typologie angepasst werden. In diesem Fall würde diese Anpassung bspw. zu einem höheren Wärmebedarf dieses Gebäudetyps führen.

Anschließend wird diese (ggfs. angepasste) Gebäudetypologie verwendet, um den Heizwärmebedarf jedes Gebäudetyps zu berechnen. Hierfür werden zunächst auf Basis der lokalen Klimadaten (MERRA-2, Gelaro et al. 2017) die Heiztage und durchschnittlichen Außentemperaturen für jeden Tag innerhalb des betrachteten Jahres berechnet. Unter Verwendung der lokalen Globalstrahlung (CAMS, European Commission 2017) und einer Simulation des Sonnenstandes für jede Viertelstunde wird zudem der solare Wärmeeintrag für die unterschiedlich ausgerichteten Fensterflächen jedes Gebäudetyps berechnet.

Zur Modellierung der Nachfrage nach Raumwärme wird ein Einzonen-Gebäudesimulationsmodell (nach DIN EN ISO 13790) verwendet. Dabei wird der Wärmebedarf eines Gebäudes auf Basis der Wärmeverluste durch Transmission und Lüftung und unter Berücksichtigung der Wärmeeinträge durch solare Einstrahlungen und interne Wärmegewinne berechnet. Der Gesamtwärmetransfer durch Transmission wird unter Verwendung des Gesamt-Transmissionswärmetransferkoeffizienten des Gebäudes bestimmt. Dieser berücksichtigt sowohl den effektiven Wärmedurchgangskoeffizienten, als auch die Bauteilfläche auf der Gebäudehülle aller Elemente in den Bauteilgruppen Wand, Dach, Boden, Tür und Fenster. Der Wärmetransfer durch Lüftung basiert vor allem auf der Luftwechselrate und dem Gebäudevolumen. Die Berechnung der solaren Wärmeeinträge basiert auf den Ausrichtungen und Größen der Fensterflächen, sowie der zuvor berechneten solaren Einstrahlung je Ausrichtung und berücksichtigt zusätzlich u. a. Faktoren für die Verschattung, solare Durchlässigkeit und Einstrahlungswinkel. Für interne Wärmegewinne wird ein vereinfachter Standardwert in Höhe von 3 W/m^2 angenommen.

Die Bauteilflächen und U-Werte werden dabei der ggfs. spezifisch angepassten Gebäudetypologie entnommen. Weitere Parameter, wie z. B. Annahmen zur Solltemperatur (20°C), der Luftwechselrate ($0,4 \text{ 1/h}$), der Raumhöhe ($2,5 \text{ m}$) und der Wärmespeicherfähigkeit der thermischen Gebäudemasse ($45 \text{ Wh/m}^2\text{K}$) folgen den

Annahmen der „TABULA Calculation Method“ (TABULA 2013). Die Annahmen zur Berechnung des Energiebedarfs für Warmwasser (10 kWh/m²a in Ein- und 15 kWh/m²a in Mehrfamilienhäusern) folgen ebenfalls dieser Methode.

Auf dieser Basis kann für jeden Tag anhand der mittleren Außentemperatur und der solaren Einstrahlungen der spezifische Wärmebedarf [kWh/m²] jedes Gebäudetyps bestimmt werden.

Im nächsten Schritt werden die Wärmebedarfsprofile je Gebäudetyp wieder mit der Klassifizierung des gesamten Gebäudebestands vereint. Dabei kann nun für jedes konkrete (d. h. aus den OSM-Daten generierte) Gebäude anhand des zuvor bestimmten Gebäudetyps ein spezifisches Wärmebedarfsprofil aus dem vorherigen Schritt zugeordnet werden. Zusätzlich wird hierbei die Grundfläche des Gebäudes berücksichtigt. Wenn diese von der Standard-Grundfläche für diesen Gebäudetyp abweicht, wird aus der Differenz ein Skalierungsfaktor berechnet und der resultierende Wärmebedarf des Einzelgebäudes entsprechend skaliert.

ERGEBNISSE

Anwendung auf vier Gemeinden und Vergleich der Ansätze

Zunächst sollen beide beschriebenen Ansätze für verschiedene deutsche Städte angewandt werden. Abbildung 2 zeigt die dabei berechneten Endenergiebedarfswerte für Wärme im Haushaltssektor für beide Methoden, sowie im Vergleich dazu Angaben aus Energieberichten¹ der jeweiligen Gemeinden.

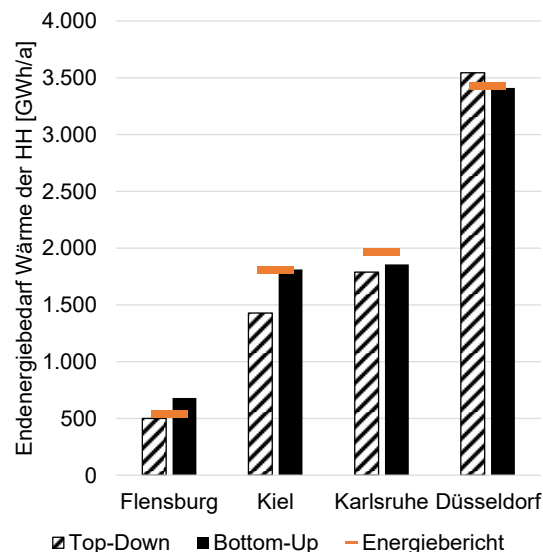


Abbildung 2: Endenergiebedarf für Wärme im Haushaltssektor, jeweils ermittelt durch die Top-Down und Bottom-Up Methoden, sowie Vergleichsangaben aus Energieberichten.

Es zeigt sich, dass beide beschriebenen Methoden jeweils Werte in einer ähnlichen Größenordnung liefern und insbesondere, dass die Ergebnisse vergleichbar mit den Angaben aus den Energieberichten sind. Die Top-Down Methode scheint den Energiebedarf eher zu unterschätzen (im Mittel um 8%), während die Bottom-Up Methode zu einer Überschätzung (im Mittel um 5%) im Vergleich zu den Energieberichten tendiert. Hierbei muss natürlich berücksichtigt werden, dass die betrachtete Stichprobe aufgrund der schlechten Datenlage (Berichte zum städtischen Wärmebedarf sind nur selten verfügbar) zu klein ist, um genauere Aussagen zu treffen. Für eine abschließende Bewertung sollten daher nach Möglichkeit Vergleichswerte für weitere Städte herangezogen werden.

¹ Quellen der Energieberichte:
Flensburg:

http://www.flensburg.de/media/custom/2306_1847_1.PDF,

Kiel:

https://www.kiel.de/de/umwelt_verkehr/klimaschutz/masterplan100prozentklimaschutz/dokumente_workshops/Dokumentation_Workshop_Wohnungs- und Immobilienwirtschaft_100.pdf,

Karlsruhe:

https://www.karlsruhe.de/b3/natur_und_umwelt/klimaschutz/klimakonzept/pdf_dateien/HF_sections/content/1487574892164/Machbarkeitsstudie_Klimaneutrales_Karlsruhe_2011.pdf,

Düsseldorf:

https://www.duesseldorf.de/fileadmin/Amt19/umweltamt/klimaschutz/pdf/klimaschutz/szenario_duesseldorf_2050.pdf

Untersuchung des spezifischen Wärmebedarfs der Wohngebäude in der Karlsruher Oststadt

Abbildung 3 zeigt das Ergebnis einer Anwendung der oben beschriebenen Bottom-Up Methode für den Karlsruher Stadtteil Oststadt. Dabei wurde jeweils

- einmal die nationale Gebäudetypologie und das deutsche Referenzklima (vgl. IWU 2015),
- einmal die nationale Gebäudetypologie und das lokale Klima für Karlsruhe,
- und einmal eine im Rahmen eines Forschungsprojekts spezifisch für die Karlsruher Oststadt angepasste Gebäudetypologie mit dem lokalen Karlsruher Klima

verwendet. Aufgrund der Platzbeschränkungen wird hier nur das Ergebnis für die Mehrfamilienhäuser (MFH) gezeigt, für eine detailliertere Darstellung der Ergebnisse und der Vorgehensweise sei an dieser Stelle auf Murshed et al. (2017) verwiesen.

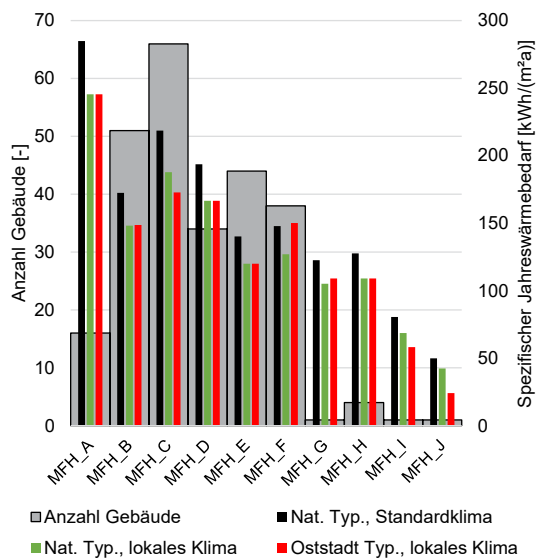


Abbildung 3: Ergebnisse der Bottom-Up Berechnung des Wärmebedarfs der Gebäude in der Karlsruher Oststadt.

Die Betrachtung des spezifischen Jahreswärmebedarfs der unterschiedlichen MFH-Altersklassen zeigt einerseits, dass die Berücksichtigung des lokalen Karlsruher Klimas (grüne Säulen) einen im Vergleich zum nationalen Referenzklima (schwarze Säulen) reduzierten Wärmebedarf bewirkt. Die Berücksichtigung der angepassten

Gebäudetypologie (rote Säulen) wirkt sich hingegen auf jeden Gebäudetyp unterschiedlich aus: Während z. B. der Gebäudetyp MFH_F einen höheren Wärmebedarf gegenüber der nationalen Gebäudetypologie aufweist (u. a. aufgrund der großen Fensterflächen der Gebäude dieses Typs in der Oststadt), hat z. B. der Gebäudetyp MFH_J einen geringeren Wärmebedarf. Je nachdem, wie häufig die entsprechenden Gebäudetypen vorkommen (graue Säulen), können sich diese spezifischen Anpassungen letztendlich mehr oder weniger stark in der Gesamtnachfrage widerspiegeln.

Zeitliche Entwicklung des Wärmebedarfs

Durch die Verwendung zeitlich hoch aufgelöster Temperatur- und Globalstrahlungsdaten ermöglicht die hier beschriebene Methodik im Vergleich zu anderen Bilanzierungsansätzen zusätzlich eine Betrachtung der unterjährigen Entwicklung des Wärmebedarfes der Wohngebäude (vgl. Abbildung 4).

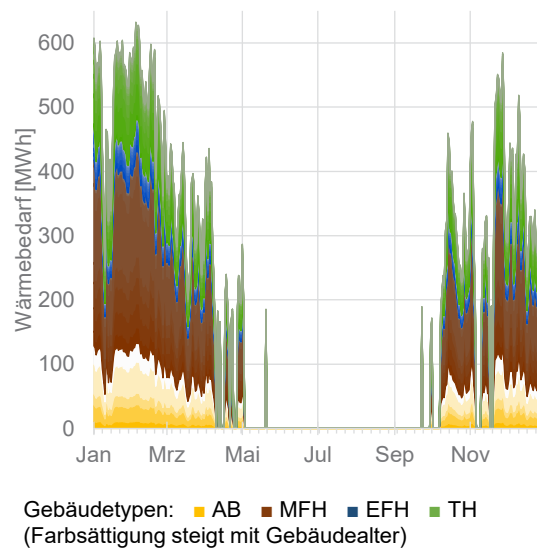


Abbildung 4: Wärmebedarfsprofil im Jahresverlauf für alle Gebäudetypen in der Karlsruher Oststadt.

Erwartungsgemäß zeigt sich dabei, dass der Wärmebedarf stark mit den durchschnittlichen Tagestemperaturen korreliert und somit vor Allem auf die Monate Oktober bis Mai fällt, während in den Sommermonaten keine Nachfrage nach Raumwärme besteht. Durch die zeitliche Auflösung der Wärmebedarfssimulation könnte die hier beschriebene Methode bspw. auch genutzt werden, um auf Basis von Wetterprognosen eine Wärmebedarfsprognose der nächsten Tage zu erzeugen.

Räumliche Verteilung des Wärmebedarfs

Durch die Verknüpfung von Geodaten mit statistischen Gebäudebestandsdaten erreicht die zuvor beschriebene Bottom-Up Methode neben der zeitlichen auch eine hohe räumliche Auflösung. Abbildung 5 zeigt eine mit dieser Methode erstellte Wärmebedarfskarte der Wohngebäude in Karlsruhe.

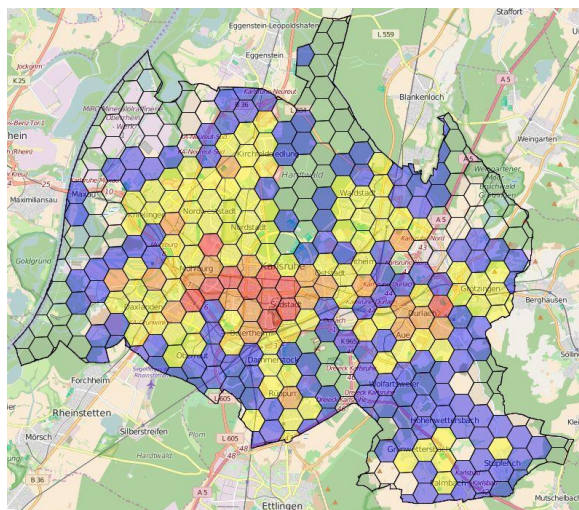


Abbildung 5: Räumliche Verteilung des Wärmebedarfs der Wohngebäude in Karlsruhe.

Die resultierende Wärmedichte ist dabei farblich markiert (blau: $< 10 \text{ GWh/km}^2$, gelb: $< 30 \text{ GWh/km}^2$, orange: $< 50 \text{ GWh/km}^2$, rot: $\geq 50 \text{ GWh/km}^2$). Es zeigt sich, dass die Wärmebedarfsdichte der Wohngebäude insbesondere in der Kernstadt von Karlsruhe, sowie in Durlach erhöht ist. In dünn besiedelten Gebieten besteht hingegen nur eine geringe oder keine Wärmenachfrage.

Durch eine Kombination der Bottom-Up und Top-Down Methoden kann auch der Wärmebedarf der Nichtwohngebäude räumlich lokalisiert werden. Abbildung 6 zeigt die Wärmebedarfskarte aller Gebäude in Karlsruhe bei der kombinierten Anwendung dieser beiden Methoden.

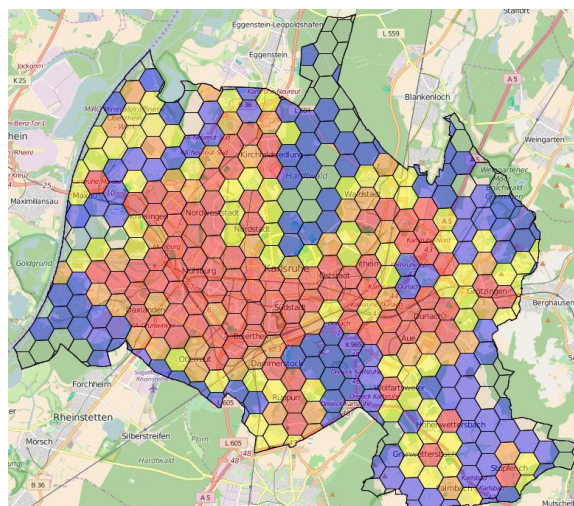


Abbildung 6: Räumliche Verteilung des Wärmebedarfs sämtlicher Gebäude in Karlsruhe.

Dabei zeigt sich erwartungsgemäß, dass das mittlere Niveau des Wärmebedarfs durch die Berücksichtigung der Nichtwohngebäude insgesamt deutlich zunimmt. Weiterhin kann nun auch Gebieten, in denen sich keine oder nur wenige Wohngebäude befinden, eine Wärmebedarfsdichte zugeordnet werden. So werden bspw. auch die Industriegebiete entlang des Rheins sichtbar.

Die so erzeugten Karten könnten somit bspw. zur Neu- oder Ausbauplanung von Fernwärmenetzen genutzt werden: bei einer Wärmebedarfsdichte von über 50 GWh/km^2 (rote Felder in Abbildung 6) gilt bspw., dass ein Fernwärmenetz mit einer hohen Wahrscheinlichkeit wirtschaftlich realisierbar ist (KEEA 2014). Die Karten könnten daher als Inputdaten für Netzplanungswerkzeuge oder optimierende Energiesystemmodelle genutzt werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden Beitrag wurden zwei unterschiedliche Methoden vorgestellt, die eine Abschätzung des Wärmebedarfs einer Stadt oder Gemeinde ermöglichen: Eine Top-Down Methode, die für eine schnelle Einschätzung der Verteilung der gesamten Endenergienachfrage genutzt werden kann, sowie eine Bottom-Up Methode, die verschiedene Geo-, Klima- und statistische Daten kombiniert, um eine wesentlich detailliertere, zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Abschätzung des Wärmebedarfs der Wohngebäude zu ermöglichen. Die Anwendung auf vier verschiedene Städte hat gezeigt, dass

beide Methoden vergleichbare Ergebnisse liefern, die in ihrer Größenordnung auch mit Angaben aus Energieberichten der jeweiligen Städte übereinstimmen. Aufgrund des hohen Detaillierungsgrades der Ergebnisse der Bottom-Up Methode ist diese dazu geeignet, Inputdaten für die Analyse und Optimierung von städtischen Energiesystemen bereitzustellen.

LITERATUR

Mainzer, Kai; Fath, Karoline; McKenna, Russell; Stengel, Julian; Fichtner, Wolf; Schultmann, Frank (2014): A high-resolution determination of the technical potential for residential-roof-mounted photovoltaic systems in Germany. In: *Solar Energy* 105, S. 715–731. DOI: 10.1016/j.solener.2014.04.015.

BMWi (2017): *Energiedaten: Gesamtausgabe*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), zuletzt geprüft am 17.05.2017.

Destatis (2017): *Regionaldatenbank. Statistische Ämter des Bundes und der Länder*. Online verfügbar unter <https://www.regionalstatistik.de/genesis/online/data>, zuletzt aktualisiert am 16.07.2012, zuletzt geprüft am 16.07.2012.

Energieagentur RLP (2017): *Energieatlas Rheinland-Pfalz: Stromverbrauch*. Energieagentur Rheinland-Pfalz. Online verfügbar unter <https://www.energieatlas.rlp.de/earp/daten/strom/stromverbrauch/>.

Stadt Karlsruhe (2012): *Klimaschutz in Karlsruhe. Zweiter Fortschrittsbericht 2011*. Hg. v. Stadt Karlsruhe I Umwelt- und Arbeitsschutz, zuletzt geprüft am 24.03.2018.

Neumann, Christian; Blumberg, Arne; Schwieder, Harald; Sondermann, Nils (2012): *Energiebilanz für die Region Freiburg. Verbrauch und Potenziale. Endbericht*. Energieagentur Regio Freiburg, zuletzt geprüft am 24.03.2018.

Destatis (2014): *Zensusdatenbank Zensus 2011. Statistische Ämter des Bundes und der Länder*. Online verfügbar unter <https://ergebnisse.zensus2011.de/>.

IWU (Hg.) (2015): *Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden*. 2. Aufl. Unter Mitarbeit von Tobias Loga, Britta Stein, Nikolaus Diefenbach und Rolf Born. Darmstadt, zuletzt geprüft am 21.01.2016.

IWU (Hg.) (2016): *Monitor progress towards climate targets in European housing stocks. Main results of the EPISCOPE Projekt: final project report*. Unter Mitarbeit von Britta Stein, Tobias Loga, Nikolaus Diefenbach und Britta. EPISCOPE. Darmstadt/Germany; Institut Wohnen und Umwelt GmbH, zuletzt geprüft am 01.12.2017.

OSM (2018): *OpenStreetMap*. Unter Mitarbeit von OpenStreetMap-Contributors. Online verfügbar unter <http://www.openstreetmap.org/>, zuletzt geprüft am 01.06.2017.

Gelaro, Ronald; McCarty, Will; Suárez, Max J.; Todling, Ricardo; Molod, Andrea; Takacs, Lawrence et al. (2017): *The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)*. In: *Journal of Climate* 30 (14), S. 5419–5454. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.

European Commission (2017): *Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) radiation service*. Online verfügbar unter <http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/cams-radiation-service>.

DIN EN ISO 13790, 21.07.2008: *Energieeffizienz von Gebäuden – Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung*, zuletzt geprüft am 05.02.2015.

TABULA (2013): *TABULA Calculation Method. Energy Use for Heating and Domestic Hot Water. Reference Calculation and Adaptation to the Typical Level of Measured Consumption*. Hg. v. IWU. Online verfügbar unter www.building-typology.eu, zuletzt geprüft am 18.02.2018.

Murshed, Syed Monjur; Abdul-Zahra, Amar; Koch, Andreas; Mainzer, Kai; Sliz-Szkliniarz, Beata; Wendel, Jochen (2017): *Investigating the Energy Performance of Buildings with a 3D City Model and Thermal Simulation: Results from the Urban Transition Lab*. In: *Official Conference Proceedings. The European Conference on Sustainability, Energy & the Environment 2017*. Brighton, UK, July 07, 2017 to July 09, 2017. The International Academic Forum. Online verfügbar unter <https://papers.iafor.org/submission37905/>, zuletzt geprüft am 20.09.2017.

KEEA; Fraunhofer IWES (2014): *Praxisleitfaden: „Aufbau von Wärmenetzen“*. Hg. v. Energiereferat Stadt Frankfurt am Main und Regionalverband FrankfurtRheinMain. KEEA Klima- und Energieeffizienz Agentur; Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES, zuletzt geprüft am 29.11.2017.

GIS-BASIERTE ENERGETISCHE MODELLIERUNG UND SIMULATION VON STADTQUARTIEREN AUS DEM BESTAND AUF BASIS VON MODELICA

C. Nytsch-Geusen¹, D. Kreulitsch¹ und W. Kaul¹

¹Universität der Künste Berlin, Institut für Architektur und Städtebau, Berlin, Germany
Email: nytsch@udk-berlin.de, d.kreulitsch@udk-berlin.de, w.kaul@udk-berlin.de

KURZFASSUNG

Im Rahmen des Open eQuarter-Forschungsprojektes wurde ein GIS-basiertes Analysewerkzeug auf Grundlage von QGIS entwickelt, welches es ermöglicht, den thermischen Energiebedarf eines Stadtquartiers durch Auswertung allgemein verfügbarer georeferenzierte Gebäudeinformationen wie z.B. die Gebäudeumrisse, die Geschossanzahl und das Gebäudealter gebäudescharf zu analysieren. Bisher war dieser Ansatz noch auf Wohngebäude beschränkt.

Der Analyseumfang des Open eQuarter-Werkzeuges wurde nun durch energetische Gebäudeparameter für Nichtwohngebäude ergänzt. Die so erweiterten Parametersätze wurden genutzt, um mit Hilfe eines Codegenerators automatisch dynamische Stadtquartiersmodelle auf Basis von Modelica zu erzeugen und so Wärmelastprofile für Einzelgebäude als auch für ein gesamtes Stadtquartier zu berechnen.

Am Beispiel eines aus Wohn- und Nichtwohngebäuden bestehendes Stadtquartiers von ca. 500 Gebäuden aus dem Stadtzentrum von Berlin wurde die Prozesskette getestet. Hierbei wurde auch für ein ausgewähltes Wohngebäude, für welches mehrjährige Verbrauchsdaten vorliegen, eine gesonderte Simulationsanalyse zur Plausibilitätsprüfung der Berechnungsergebnisse vorgenommen.

ABSTRACT

Within the Open eQuarter research project, a GIS analysis tool was developed based on QGIS which enables to analyse the building precise

thermal energy demand of a city district using open available geo-referenced building data, such as the building outlines, the number of storeys and the building age. Up to now, the approach was limited to residential buildings.

The analysis scale of the Open eQuarter tool was extended with energetic building parameters for non-residential buildings. The enhanced parameter set was used in order to automatically generate Modelica city district models for the calculation of thermal load profiles for individual buildings and the entire district.

With an example of a city district from the centre of Berlin, which includes approximately 500 residential and non-residential buildings, the process chain was evaluated. In addition, a simulation analysis for an individual building of the district, for which energy demand data are available, was performed for a plausibility check of the simulation results.

EINLEITUNG

Problemstellung

Ein Hauptproblem bei der Erstellung von energetischen Stadtquartiersmodellen besteht in der Beschaffung der hierfür notwendigen umfangreichen Parametersätze für den Gebäudebestand. Während sich die Verfügbarkeit georeferenzierter geometrischer Gebäudedaten durch die zunehmende flächendeckende Erstellung von 3D-Gebäudemodellen (LoD1 und zukünftig LoD2) kontinuierlich verbessert (DGfK, 2017), sind Angaben zu den energetischen Gebäudekennwerten (U-Werte der Gebäudefassade, der Fenster, des Dachs etc.) und zur Art der

Gebäudenutzung sowie zum Energieverbrauch grundsätzlich schwieriger zu gewinnen: in den meisten Stadtquartieren liegen heterogene Eigentümerstrukturen vor, weshalb diese Informationen somit verteilt sind. Ausnahmen stellen größere zusammenhängende Liegenschaften, wie z.B. der Gebäudebestand eines Hochschulcampus dar, bei denen die Gebäudeinformationen bei nur einem oder nur wenigen Eigentümern gebündelt vorliegen.

Stand der Forschung

Es wurden bisher verschiedene Ansätze zur gebäudescharfen energetischen Stadtquartiersanalyse auf Basis der dynamischen Gebäudesimulation entwickelt, wie z.B. das aus der Schweiz stammende CitySim (Perez et al., 2011), das im deutschen Forschungskontext entstandene SimStadt (Eicker et al., 2015) oder die beiden US-amerikanischen Tools UMI (Reinhardt et al., 2013) und Virtual PULSE (Heidarinejad et al., 2015). Zur Parametrierung der Gebäudemodelle nutzen diese Analysewerkzeuge meistens Archetypen für Wohn- und/oder Nichtwohngebäude, die sich i.d.R. auf den jeweils landestypischen Gebäudebestand beziehen. Die Gebäudeparameter (Geometrien, energetische Kennwerte etc.) werden bei dieser Art von Tools entweder manuell eingeben, aus 3D-Modellbeschreibungen wie CityGML gewonnen (SimStadt) oder aus Gebäudearchetypen auf Grundlage weniger Eingangsparameter wie die Gebäudenutzfläche und die Gebäudegeschossigkeit, wie z.B. mit dem Werkzeug TEASER abgeleitet (Remmen et al., 2017). Zur gebäudescharfen thermischen Gebäudesimulation werden in den genannten Ansätzen einerseits verbreitete Werkzeuge wie ESP-r und EnergyPlus, andererseits auch neu entwickelte reduzierte thermische Netzwerkmodelle mit wenigen Kapazitäten genutzt.

ZIELSETZUNG

Die Zielsetzung der hier beschriebenen Forschungsarbeiten bestand in der Realisierung einer automatisierten Prozesskette, welche eine GIS-basierte Datenerhebung und -verarbeitung mit der automatisierten Generierung und Parametrisierung vereinfachter dynamischer Gebäudemodelle auf Grundlage von Modelica verknüpfen soll, um auf diese Weise effizient gebäudescharfe und stadtquartiersbezogene thermische Bedarfsprofile erzeugen zu können.

METHODISCHER ANSATZ

Ausgangspunkt der Prozesskette ist der im Forschungsprojekt Open eQuarter entwickelte layer-basierte Ansatz (vgl. Abb. 1). Für das GIS-System QGIS haben die Autoren ein frei verfügbares Erweiterungsmodul entwickelt (https://github.com/UdK-VPT/Open_eQuarter), welches für jedes individuelle Gebäude eines definierten Stadtquartiers einen georeferenzierten Datensatz aus unterschiedlichen Informationslayern ermittelt. Auf dieser Basis werden für den Energiebedarf des Gebäudes relevante Merkmale abgeleitet: beispielweise wird von den beiden Informationslayern des Gebäudealters und des Gebäudetyps (z.B. Wohngebäude) auf die statistisch wahrscheinlich vorliegenden U-Werte der Baukonstruktion geschlossen (näheres hierzu in Nytsch-Geusen, Kaul, Wehage, Färber, 2016).

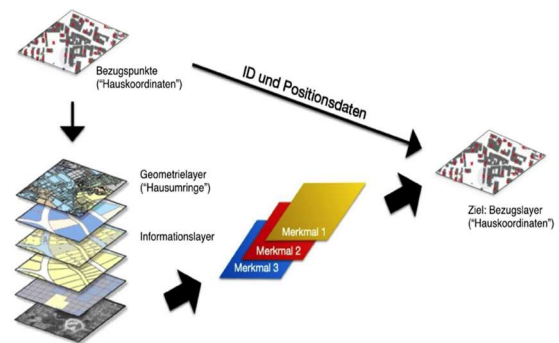


Abbildung 1: Layer-basierte Analyseverfahren von Open eQuarter

Der mit Open eQuarter gewonnene Datensatz für ein Stadtquartier wird als geojson-File exportiert. Das Werkzeug CoTeTo (Code Template Tool) liest dieses File, wertet die Quartiersinformationen aus und generiert und parametrisiert daraufhin Varianten von Stadtquartiermodellen auf Basis der Modelica-Bibliothek BuildingSystems. Anschließend kann mit einem Modelica-Werkzeug wie z.B. Dymola die Simulationsanalyse erfolgen (vgl. Abb. 2).

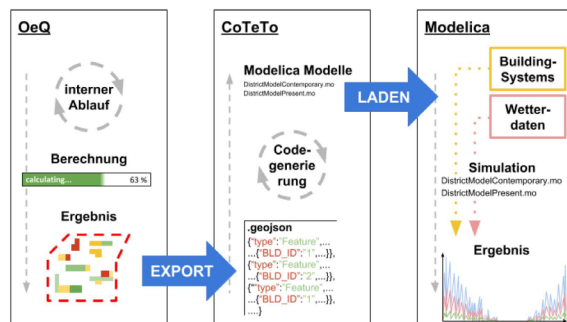


Abbildung 2: Methodischer Ansatz der Prozesskette zur Stadtquartierssimulation

Parametergewinnung über Open eQuarter

Derzeit decken im Open eQuarter-Tool die vorhandenen Informationslayer den größten Teil des Stadtraums von Berlin ab. Grundlage bilden zum einen die Datensätze des ALKIS-Objektartenkatalogs (ALKIS, 2018), aus denen z.B. die Hausumringe und die Geschoßanzahl, der Gebäudetyp und die Art der Gebäudenutzung bezogen werden. Zum anderen werden Karten zur Bevölkerungsdichte und zum Baualter des Gebäudebestands des Berliner Senatsservers verwendet (FIS-Broker, 2018). Aus der Kombination dieser Informationen werden baualtersabhängige statistische energetische Gebäudekenngrößen wie z.B. die U-Werte für Fassaden, Dächer, Fenster, Bodenplatte aus Lookup-Tabellen abgeleitet, wobei im ersten Entwicklungsschritt die vom IWU erhobenen Werte für die deutsche Wohngebäudetypologie verwendet wurden (Loga et al. 2015).

Erweiterung für Nichtwohngebäude

Innerhalb der Masterarbeit von Kreulitsch, 2018 wurden jetzt erstmals auch statistische energetische Gebäudekenngrößen für Nichtwohngebäude im Open eQuarter-Tool implementiert, wobei auf Werte des GEMOD-Gebäudemodells für Nichtwohngebäude zurückgegriffen wurde (Jochum et al., 2012). Hierdurch wird erstmals die energetische Analyse von Stadtquartieren, welche nun einen Mischbestand von Wohn- und Nichtwohngebäuden aufweisen können, in der Prozesskette möglich.

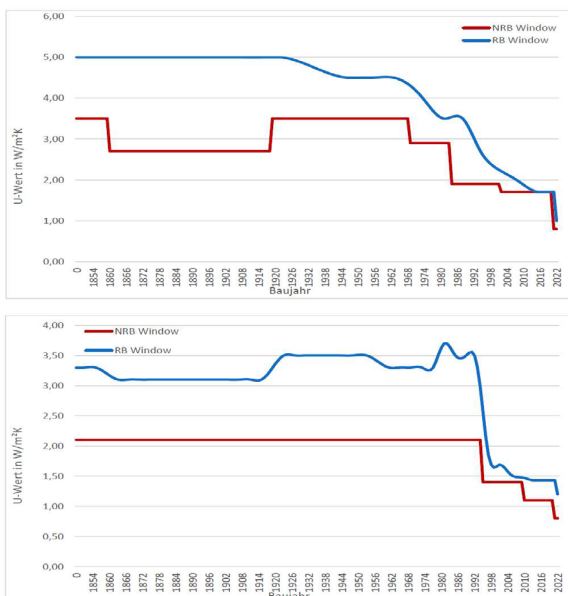


Abbildung 3: Open eQuarter-Funktionen statistisch wahrscheinlicher U-Werte der Fenster für Wohngebäude (RB) u. Nichtwohngebäude (NRB) zum Zeitpunkt der Gebäudeerrichtung (oben) und zum heutigen Zeitpunkt (unten)

Abb. 3 zeigt exemplarisch die von Open eQuarter genutzten baualtersabhängigen Funktionen für die statistischen U-Werte der Fenster für Wohngebäude und für Nichtwohngebäude zum Zeitpunkt der Gebäudeerrichtung und zum heutigen Zeitpunkt unter Einbeziehung der wahrscheinlichen Gebäudesanierung.

Dynamische Stadtquartierssimulation auf Basis von Modelica

Zur Berechnung der Wärmelastprofile der einzelnen Gebäude eines Stadtquartiers kommt ein vereinfachtes thermisches einzoniges Gebäudemodell auf Basis der Modelica-Bibliothek BuildingSystems (Nytsch-Geusen et al., 2016) zum Einsatz. In diesem Gebäudemodell, welches genauer in Nytsch-Geusen et al., 2015 beschrieben wird, werden alle außenluftberührenden opaken Bauteile, alle an den Gebäudeuntergrund angrenzenden Bauteile und alle innenliegenden Bauteilmassen (Wände, Zwischengeschosdecken) jeweils über eine thermische Ersatzkapazität abgebildet. In diesem Gebäudemodell können eine variable Anzahl von Fenstern unterschiedlicher Orientierung genutzt werden, im vorliegenden Anwendungskontext sind es vier Fenstermodelle für die vier Haupthimmelsrichtungen.

Modelica-Codegenerierung für Stadtquartiere

Ausgehend von den in Open eQuarter gewonnenen und als geojson-File exportierten Datensätzen für ein Stadtquartier werden mit Hilfe des frei verfügbare Tools CoTeTo (<https://github.com/UdK-VPT/CoTeTo>) zur Codegenerierung die notwendigen geometrischen, wärmetechnischen und nutzungsspezifischen Parameter für die Modelica-Gebäudemodelle bestimmt und der entsprechende Modelica-Code automatisch erzeugt. Die Prozesskette der Modelica-Codegenerierung über CoTeTo für Zwecke der energetischen Gebäudesimulation wird in Nytsch-Geusen et al., 2017 detailliert beschrieben.

Zur Parametrisierung der Gebäudegeometrie (Fassaden- und Dachfläche, Bodenplatte) werden in Open eQuarter für jedes Gebäude zunächst das ALKIS-Polygon seines Hausumrings (Gebäudeaußenmaße) auf ein Rechteck gleicher Fläche umgerechnet. Die Außenmaße dieses Rechtecks werden um die mittlere Dicke der Fassadenkonstruktion reduziert (Wärmeverlustflächen als Mittelwert zwischen Innen- und Außenmaßbezug). Unter

Verwendung der Anzahl der beheizten Geschosse und Annahme einer mittleren Geschosshöhe wird dieses reduzierte Rechteck danach vertikal zur Bestimmung der Fassadenfläche extrudiert.

Zur Berücksichtigung sich berührender Wände von benachbarten Gebäuden wurde ein Flächenreduktionsfaktor eingeführt. Dieser wird auf Basis der Hausumringe (für jedes Gebäude ein geschlossenes Polygon mit m Kanten) und unter Berücksichtigung der potentiell unterschiedlichen Geschossigkeit zweier aneinandergrenzender Gebäude i und j für jedes i -te Gebäude wie folgt berechnet:

$$f_{red,i} = \sum_{j=1}^{j=n} \sum_{k=1}^{k=m} \frac{\text{commonedge}_{i,j,k} \cdot \min\left(\frac{nSto_j}{nSto_i}, 1.0\right)}{\text{perimeter}_{\text{polygon},i}} \quad (1)$$

Hierbei ist $\text{commonedge}_{i,j,k}$ die Länge der k -ten gemeinsamen Linie zwei sich berührender Kanten des Polygons i des aktuellen Gebäudes und des Polygons j des angrenzenden Gebäudes, welche die n benachbarten Gebäude repräsentieren und $\text{edge}_{i,k}$ die Länge der k -ten Kante des Polygons des i -ten Gebäudes, für den der Flächenreduktionsfaktor bestimmt wird. Es wird weiterhin angenommen, dass im benachbarten angrenzenden j -ten Gebäude die gleiche Innenraumtemperatur vorliegt wie im betrachteten i -ten Gebäude, weshalb die gemeinsamen Flächen benachbarter Gebäude als adiabat betrachtet werden (vgl. Abb. 4).

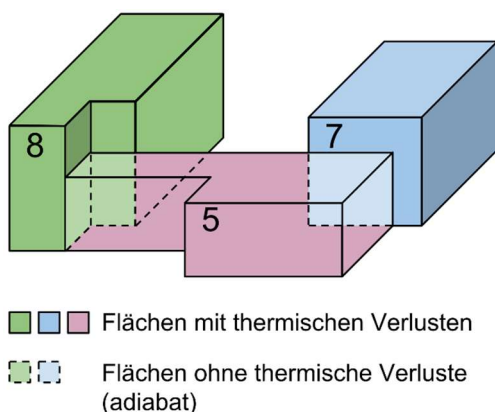


Abbildung 4: Berücksichtigung angrenzender Gebäude für den Wärmeverlust über einen Flächenreduktionsfaktor

Die extrudierte Wandfläche wird mit dem Flächenreduktionsfaktor multipliziert und mit dem vom Gebäudealter abhängigen Fensterflächenanteil reduziert, wodurch sich die opaken und transparenten Fassadenflächen ergeben.

Die beheizte Wohnfläche wird über die Bruttogeschosshöhe über einen Minderungs-

faktor von 0,75, wie er in Loga et al., 2015 als statistisches Mittel für Wohngebäude erhoben wurde, reduziert. Für die Fläche der Bodenplatte, der Einzelgeschosse und des Daches, welches vereinfachend als Flachdach angenommen wird, wird jeweils die gleiche reduzierte Rechteckfläche angenommen, wodurch ein systematischer Geometriefehler bei Gebäuden mit abweichender Geschosshöhe entsteht.

Die wärmetechnischen Kenngrößen (U-Werte) werden wie weiter oben beschrieben aus den baualtersabhängigen Funktionen für Wohngebäude und Nichtwohngebäude bestimmt. Es können für jedes Gebäude wahlweise Datensätze für seine Energieeffizienz zum Zeitpunkt der Gebäudeerrichtung, zum derzeitigen Zeitpunkt und für die Annahme einer energetischen Sanierung nach der aktuellen EnEV 2016 erzeugt werden.

Zur Abbildung eines differenzierten Nutzerverhaltens werden aus den ALKIS-Informationen zur Gebäudenutzung für die Gebäudemodelle individuelle Annahmen zur Soll-Heiz-Temperatur, für die inneren Wärmequellen und den Außenluftwechsel getroffen, die als Funktionen im CoTeTo-Codegenerator implementiert sind.

ANWENDUNGSBEISPIEL

Altbauviertel in Berlin-Pankow

Im Anwendungsfall wird ein vorwiegend durch fünf- bis sechsgeschossige Wohngebäude dominiertes Altbauviertel im Berliner Bezirk Pankow zum Testen der Prozesskette analysiert. Es handelt sich um das Winsviertel mit insgesamt 524 Gebäuden, welches eines der drei zentralen Wohnviertel in Berlin-Prenzlauer Berg darstellt.

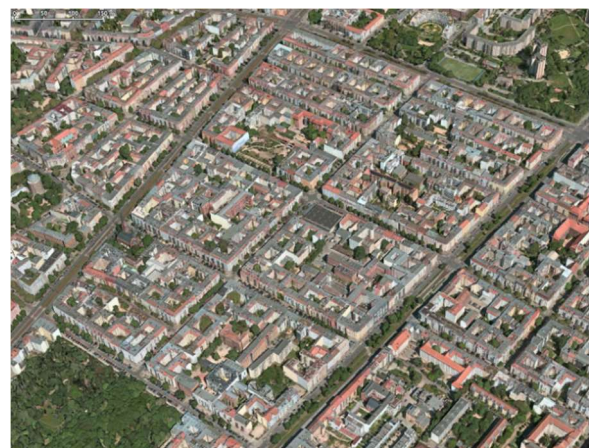


Abbildung 5: Altbau-Stadtquartier „Winsviertel“ im Berliner Bezirk Pankow (Quelle: Apple Maps)

Der Gebäudebestand verteilt sich zu 73 Prozent auf Wohngebäude und zu 27 Prozent auf Nichtwohngebäude (nähere Differenzierungen der Gebäudenutzung siehe in Abb. 6 und Abb. 7).

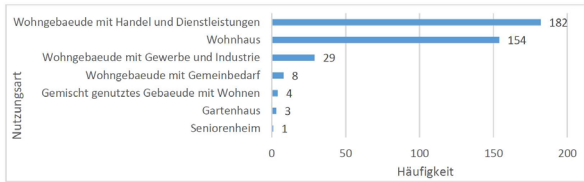


Abbildung 6: Gebäudenutzung der Wohngebäude

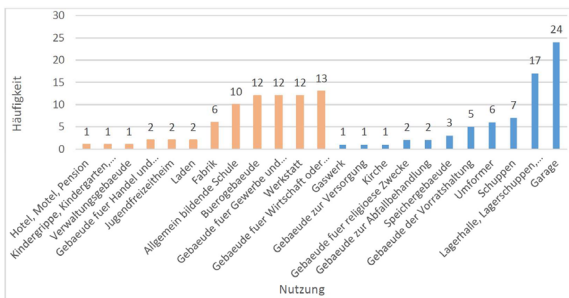


Abbildung 7: Gebäudenutzung der Nichtwohngebäude (orange beheizt, blau unbeheizt)

Der Großteil des Gebäudebestands wurden in den Baualtersklassen 1870-1899 und 1900-1918 errichtet, nur wenige Gebäude wurden in der Nachkriegszeit gebaut bzw. in den letzten 15 Jahren als Neubauten ergänzt (vgl. Abb. 8).

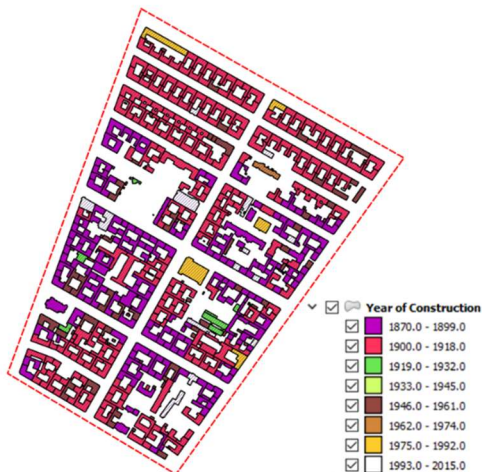


Abbildung 8: Baualtersverteilung des untersuchten Stadtquartiers „Winsviertel“

Von den insgesamt 524 Gebäuden des Stadtquartiers werden bei der Analyse auf Grund der in ALKIS enthaltenen Angaben zum jeweiligen Gebäudetyp insgesamt 69 als thermisch nicht konditioniert (Garagen, Transformatorenhäuschen, Lagerhallen etc.) automatisch in CoTeTo aussortiert und somit nur noch 455 als beheizt angenommen und in der Simulationsanalyse weiter betrachtet. In Abb. 9 ist der Flächenreduktionsfaktor für die

Außenfassade der beheizten Gebäude nach aufsteigender Größe sortiert dargestellt. Das sich ergebende Profil zeigt die typische verdichtete Bebauung des Berliner Altbauviertels: Nur 27 Gebäude (ca. 6 Prozent) sind freistehend, 53 Gebäude (ca. 12 Prozent) grenzen bis zu 20 Prozent, 363 Gebäude (ca.80 Prozent) zu 20 bis 60 Prozent und die restlichen 12 Gebäude (ca. 3 Prozent) mit mehr als 60 Prozent mit den Flächen ihrer Außenwände an benachbarte Gebäude an.

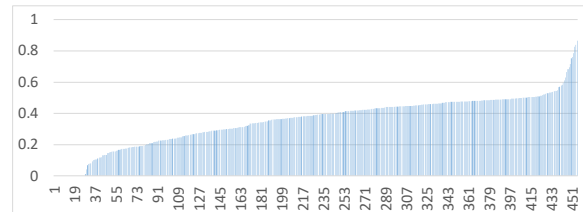


Abbildung 9: Flächenreduktionsfaktor des untersuchten Stadtquartiers „Winsviertel“

Vergleichend hierzu wurde für ein weiteres Wohnviertel in Berlin-Karlshorst mit einer eher lockeren, überwiegend zwei- bis dreigeschossigen Bebauung (vgl. Abb. 10) der Flächenreduktionsfaktor von 428 Gebäuden berechnet.

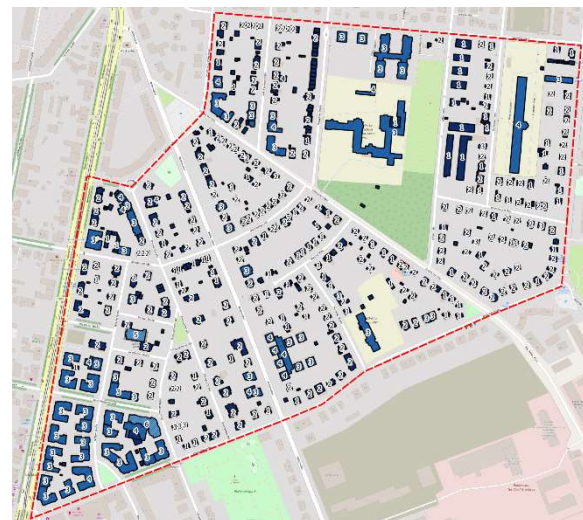


Abbildung 10: Stadtquartier in Berlin-Karlshorst

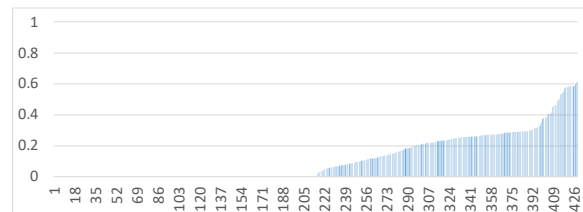


Abbildung 11: Flächenreduktionsfaktor des Stadtquartiers in Berlin-Karlshorst

Das Profil der Flächenreduktionsfaktoren in Abb. 11 verdeutlicht klar die stark reduzierte Dichte der Siedlungsstruktur im Vergleich zum sehr dicht bebauten Winsviertel. 215 Gebäude (ca. 50 Prozent) sind völlig freistehend und die sich

berührenden Gebäude zeigen einen erheblich niedrigeren mittleren Flächenreduktionsfaktor von 0,238 im Vergleich zum Winsviertel mit 0,377 in Berlin-Pankow.

Analyse eines Einzelgebäudes

An Hand eines für das Winsviertel typischen Berliner Altbaugeschäftes, einem 1905 erbauten fünfgeschossigen Wohngebäude, wurde die Berechnungsmethode auf ihre Plausibilität überprüft. Das Gebäude wurde 2002 saniert, zu einem Zeitpunkt als die EnEV 2002 gerade noch nicht zur Anwendung kam. Im Rahmen der Gebäudesanierung wurde mit dem Dachgeschoßausbau ein sechstes beheiztes Geschoß ergänzt. Für das sanierte Gebäude liegen den Autoren die genaue Angabe der beheizten Wohnfläche, für den Zeitraum 2004 bis 2017 jährliche Heizenergieverbräuche sowie weitere Informationen zur energetischen Qualität der Gebäudehülle vor.

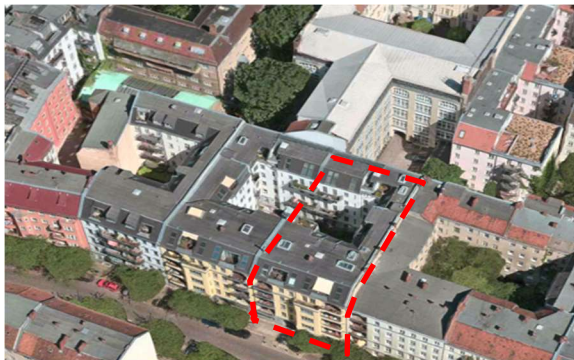


Abbildung 12: Untersuchtes Altbaugeschäftes im Stadtquartier „Winsviertel“

Das Gebäude grenzt zu mehreren Seiten an Nachbargebäude an (vgl. Abb. 12) und besitzt eine beheizte Wohnfläche von 1.854,5 m². Nach Gleichung (1) ergibt sich für das Gebäude ein Flächenreduktionsfaktor von 0,444, welcher für eine dichte Bebauung steht und etwas höher als der Mittelwert des Wohnviertels (vgl. Abb. 9) liegt. Auf Grundlage des Gebäudealters bestimmt Open eQuarter einen Fensterflächenanteil der Fassaden von 29,4 Prozent.

Für die Simulationsanalyse des Wohngebäudes wurde für das Modelica-Modell des Wohngebäudes über Open eQuarter und CoTeTo der Eingangsparametersatz zunächst ohne weitere Kenntnis des realen Gebäudes bestimmt, wobei eine mittlere Geschoßhöhe von 3,3 m, eine mittlere Fassadendicke von 0,4 m und eine Zwischengeschoßdicke von 0,4 m angenommen wurde (Tabelle 1, linke Spalte). Das 2002 ausgebauten Dachgeschoss ist in den

aktuellen ALKIS-Werten nicht enthalten und führt so zu einer Unterschätzung der beheizten Wohnfläche.

Zusätzlich wurde für das gleiche Modelica-Gebäudemodell noch ein zweiter Eingangsparametersatz nach dem „Kurzverfahren Energieprofil“ des IWU (Loga et al., 2005) bestimmt (Tabelle 1, rechte Spalte). Hierfür sind allerdings weitere Angaben des realen Gebäudes notwendig, welche für das analysierte Gebäude zur Verfügung standen:

- Anzahl der beheizten Vollgeschosse: 5 plus 0,75 für voll beheiztes Dachgeschoss
- direkt angrenzende Nachbargebäude: auf zwei Seiten
- Wohnungsanzahl: 18
- beheizte Wohnfläche: 1854,5 m²
- Baujahr: 1905
- lichte Raumhöhe: hoch
- Grundriss: gewinkelt
- Keller: Kellergeschoss unbeheizt
- Konstruktionsart: massiv
- nachträgliche Dämmung: Dachfläche 15 cm zu 100 Prozent; Außenwände u. Kellerdecke: keine Dämmung
- Fenster: 2-Scheibenverglasung, eingebaut im Jahr 2002

Tabelle 1: Parametrisierung des Einzelgebäudes

	Open eQuarter	Energieprofil IWU
Geschoßanzahl	5 (ALKIS)	5,75
beheizte Wohnfläche A_{WO} [m ²]	1668,7	1854,5
Dachfläche A_{DA} [m ²]	418,8	483,7
Außenwandfläche A_{AW} [m ²]	681,1	1169,9
Fensterfläche A_{FE} [m ²]	355,3	370,8
Bodenfläche A_{BO} [m ²]	418,8	428,8
U-Wert Außenwand [W/m ² K]	1,83	1,70
U-Wert Dach in [W/m ² K]	1,23	0,24
U-Wert Bodenplatte [W/m ² K]	1,20	1,20
U-Wert Fenster [W/m ² K]	3,10	1,90

Als Randbedingung für die Simulation wurde von CoTeTo für die vorliegende Nutzungsart eines Wohngebäudes eine mittlere Soll-Heiztemperatur von 19 °C, eine mittlere Luftwechselrate von 0,5 1/h und mittlere interne Wärmequellen von 4,16 W pro m² beheizte Nutzfläche festgelegt. Die Temperatur unter der Bodenplatte wird ganzjährig mit 10 °C angenommen und als Wetterdaten ein Meteonorm-Datensatz für den Standort Berlin-Tempelhof gewählt. Abbildung 13 zeigt den simulierten jährlichen Heizwärme-

bedarf für insgesamt 6 Varianten im Vergleich zum realen Heizwärmeverbrauch.

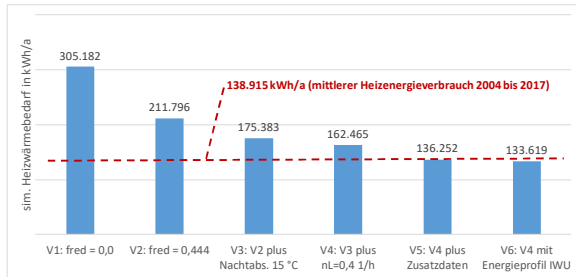


Abbildung 13: Varianten des simulierten Heizwärmebedarfs im Vergleich zum mittleren Heizenergieverbrauch 2004-2017

Variante V1 nutzt den Parametersatz aus Open eQuarter/CoTeTo ohne Berücksichtigung und Variante V2 mit Berücksichtigung des Flächenreduktionsfaktors. In zwei weiteren Varianten wurde das Nutzerverhalten schrittweise näher an reale Verhältnisse angepasst, indem zunächst eine Nachtabsenkung der Sollheiztemperatur von 19 °C auf 15 °C zwischen 8-22 Uhr (Variante V3) und danach zusätzlich eine Reduzierung des mittleren Luftwechsels $0,4 \text{ h}^{-1}$ (Variante V4) eingeführt wurde. In Variante V6 wird das in V4 definierte Nutzerverhalten mit den Gebäudeparameterwerten des Kurzverfahrens Energieprofil IWU (Tabelle 1, rechte Spalte) kombiniert. In der Variante V5 wurden für einige Gebäudeparameter, die in Open eQuarter automatisch ermittelt werden, mit Hilfe bekannter Gebäudeinformationen folgende genauere Annahmen getroffen:

- voll ausgebautes und beheiztes Dachgeschoss (Annahme: 5,75 Geschosse)
- U-Wert sanierte Fenster = $1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$
- U-Wert ungedämmte Fassade = $1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$
- U-Wert gedämmtes Dach = $0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$

Gesamtanalyse Stadtquartier

Bei der Gesamtanalyse wurde das Stadtquartier in vier Teilgebiete aufgeteilt, um die Simulation durch parallele Berechnung zu beschleunigen. Für alle Gebäude wurde der Flächenreduktionsfaktor berechnet und angewandt. Da für die anderen Gebäude des Stadtquartiers keine Detailangaben vorliegen, wurden alle Parameter über Open eQuarter und CoTeTo automatisch erzeugt, was der Variante V2 in Abb. 13 entspricht. Abbildung 14 zeigt das aggregierte Wärmelastprofil für die gesamte Population des Wmsviertels von insgesamt 455 beheizten Wohn- und Nichtwohngebäuden. Die maximale Heizlast liegt bei 35,4 MW und der jährliche Heizwärmebedarf beträgt insgesamt 82 GWh.

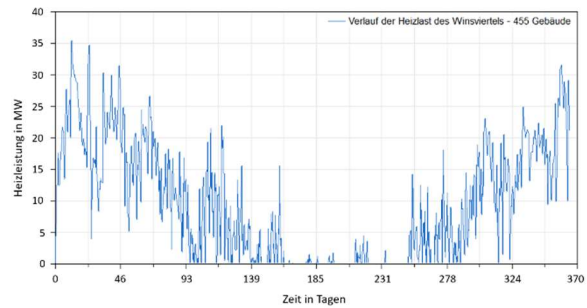


Abbildung 14: Simuliertes Wärmelastprofil des Wmsviertels

ERGEBNISANALYSE UND DISKUSSION

Analyse des Einzelgebäudes: Wie der Vergleich des berechneten jährlichen Heizwärmebedarfs der Varianten V1 und V2 mit dem mittleren witterungsbereinigten jährlichen Heizenergieverbrauch der Jahre 2004 bis 2017 zeigt, kann die größte Verbesserung der Rechengenauigkeit eindeutig durch die Einführung des Flächenreduktionsfaktors erreicht werden (V1: 119 Prozent, V2: 52 Prozent oberhalb des gemessenen Verbrauchs). Die zusätzliche Nachtabsenkung auf 15 °C (V3) reduziert den jährlichen Heizwärmebedarf auf einen Wert von 26 Prozent und die weitere Reduzierung des Luftwechsels (V4) um $0,1 \text{ h}^{-1}$ auf einen Wert von 16 Prozent oberhalb des gemessenen Wertes. Bei Nutzung zusätzlicher Gebäudeinformationen (V5) wird die Verbrauchswert in der Simulation nahe identisch (minus 2 Prozent) wiedergeben. Der Parameterdatensatz des Energieprofils IWU in Kombination mit den gleichen Annahmen zum Nutzerverhalten (V6) der Variante V4 führt zu einem sehr ähnlichen berechneten Bedarf wie Variante V5.

Gesamtanalyse Stadtquartier: Die Güte des Wärmelastprofils für das Gesamtquartier lässt sich ohne flächendeckende Verbrauchswerte derzeit nicht validieren. Es ist aber zumindest für den Anteil der Wohngebäude im Stadtquartier, die eine ähnliche Gebäudesubstanz und ein ähnliches Nutzerverhalten aufweisen, davon auszugehen, dass die simulierten Heizenergiebedarfe in einer ähnlich guten Genauigkeit berechnet werden.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mit der Kombination aus Open eQuarter, CoTeTo und dem vereinfachten Modelica-Gebäudemodell zu einer gemeinsamen Prozesskette lassen sich Stadtquartiersmodelle innerhalb des Berliner Stadtraums definieren, vollständig automatisch parametrieren und Wärmelastprofile

berechnen, welche gemessenen Verbräuchen einzelner Gebäude nahekommen.

Zukünftige Arbeiten an der Prozesskette werden sich auf eine weitere Verbesserung des Geometriemodells (z.B. Nutzung von Informationen aus CityGML-Modellen), der weiteren Differenzierung des Nutzerverhaltens bei den Nichtwohngebäuden sowie auf weitere Vergleiche mit Energieverbrauchswerten aus ausgewählten Stadtquartieren konzentrieren.

LITERATUR

ALKIS, Homepage Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV): <http://www.adv-online.de>

DGfK 2017. Workshop 3D-Stadtmodelle 2017: siehe unter <http://www.3d-stadtmodelle.org>, Bonn, Deutschland.

Eicker, U.; Schumacher, J.; Zirak, M.; Bartke, N.; Nouvel, R.; Coors, V. 2015. An Automated Method for Urban Energy Simulation based on 3D City Models. Conference proceedings Building Simulation 2015, Hyderabad, Indien.

FIS-Broker. Datenserver der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen: <https://fbinter.stadt-berlin.de/fb/index.jsp>

Heidarinejad, M.; Mattise, N. W.; Dahlhausen, M.; Nikkho, S. K.; Liu, J.; Gracik, S.; Liu, K.; Sharma, K.; Zhang, H.; Wentz, J. R.; Roudsari, M. S.; Pitchurov, G.; Srebric, J. 2015. Urban ScaleModeling of Campus Building using Virtual PULSE. Conference proceedings Building Simulation 2015, Hyderabad, Indien.

Jochum, P., Mellwig, P.; Bübül, F.; Jarling, M.; Kelavic, M. 2012. Technische Restriktionen bei der energetischen Modernisierung von Bestandsgebäuden. Endbericht: Beuth Hochschule für Technik Berlin, ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Deutschland.

Kreulitsch, D. 2018. GIS-basierte energetische Modellierung und Simulation von aus Wohn- und Nichtwohngebäuden bestehenden Stadtquartieren auf Basis von Modelica. Masterarbeit, Beuth-Hochschule Berlin, Berlin, Deutschland.

Loga, T.; Nikolaus Diefenbach, N.; Knissel, J.; Born, R. 2005. Entwicklung eines vereinfachten, statistisch abgesicherten Verfahrens zur Erhebung von Gebäudedaten für die Erstellung des Energieprofils von Gebäuden.

Forschungsbericht Institut für Wohnen und Umwelt. Darmstadt, Deutschland.

Loga, T.; Stein, B.; Diefenbach, N.; Born, R. 2015. Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Zweiter erweiterte Auflage. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, Deutschland.

Nytsch-Geusen, C; Kaul, W.; Wehage, P.; Färber, M. 2016. Nachhaltige und energieeffiziente Bestandsentwicklung von Stadtquartieren – Entwicklung eines Analyse- und Planungstools zur energetischen Bewertung und Sanierung von Stadtquartieren (Open eQuarter), Forschungsbericht. Universität der Künste Berlin, Fraunhofer IRB Verlag, Deutschland.

Nytsch-Geusen, C.; Inderfurth, A.; Kaul, W.; Rädler, J.; Thorade, M.; Tugores, C. R. 2017. Template based code generation of Modelica building energy simulation models, Proceedings Modelica Conference 2017, Prag, Tschechien.

Nytsch-Geusen, C.; Kaul, W. 2015. Generation of dynamic energetic district models from statistical relationships. Proceedings Building Simulation Conference 2015, Hyderabad, Indien.

Nytsch-Geusen, C.; Banhardt, C.; Inderfurth, A.; Mucha, K.; Möckel, J.; Rädler, J.; Thorade, M.; Tugores, C. 2016. BuildingSystems – Eine modular hierarchische Modell-Bibliothek zur energetischen Gebäude- und Anlagensimulation. BAUSIM 2016. Conference Proceedings. Dresden, Deutschland.

Perez, D.; Kämpf, J.; Wilke, U.; Papadopoulo, M.; Robinson, D. 2011. CitySim simulation: The case study of Alt-Wiedikon, a neighbourhood of Zürich city. Proceedings CISBAT 2011, Lausanne, Schweiz.

Reinhart, C.; Dogan, T.; Jakubiec, J. A.; Rakha, T.; Sang, A. 2013. UMI – An Urban Simulation Environment for Building Energy Use, Daylighting and Walkability. Conference proceedings Building Simulation 2013, Chambery, Frankreich.

Remmen, P., Lauster, M.; Mans, M.; Fuchs, M.; Osterhage, T. 2017. TEASER: an open tool for urban energy modelling of building stocks. Journal of building performance simulation, Band: 10, Ausgabe: 4, Seiten: 1-15.

EVALUATION VON EFFIZIENZ- UND ERNEURBARENERGIEN MASSNAHMEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DES ZUKÜNFTIGEN ENERGIEMIXES

F. Ochs¹, G. Dermentzis¹ und T. Calabrese¹

¹ Einrichtung, Universität Innsbruck, Arbeitsbereich für Energieeffizientes Bauen, Innsbruck, Österreich

KURZFASSUNG

Ein nachhaltiger und verantwortungsvoller Umgang mit Ressourcen ist erforderlich, um den Klimawandel einzudämmen. Mikroökonomische Ziele berücksichtigen in der Regel den Barwert der Investitionskosten und/oder die eingekaufte Energie, vernachlässigen jedoch i.d.R. Auswirkungen auf die Umwelt. Auf makroökonomischer Ebene muss das Ziel jedoch die Verringerung der (nicht-erneuerbaren) Primärenergie (PE) und der CO₂-Emissionen sein. Es besteht ein Bedarf nach einem geeigneten Bewertungsverfahren zum Vergleich und zur Klassifizierung verschiedener passiver und aktiver Gebäudetechnologien, z.B. entsprechend ihren Auswirkungen auf den PE-Verbrauch. Nationale Umrechnungsfaktoren für PE/CO₂ basieren nicht nur auf Fakten, sondern sind teilweise politisch motiviert. Sie unterscheiden sich erheblich auch innerhalb der Europäischen Mitgliedsstaaten und unterliegen Änderungen. Saisonale Schwankungen werden derzeit überhaupt nicht berücksichtigt.

Der Strom-Mix wird schon jetzt und in Zukunft verstärkt durch die verfügbaren erneuerbaren Energiequellen (EE) Wasserkraft, Windenergie und PV mit starken Tages- und Jahreszeitlichen Schwankungen beeinflusst. Ohne saisonale Speicherung werden auch in Zukunft fossile Brennstoffe überwiegend die Winterlast abdecken. Der Strom-Mix wird auch von der Last d.h. dem Gebäudebestand beeinflusst: Gebäude haben im Winter einen hohen Energieverbrauch und im Sommer einen niedrigeren. Derzeit ist der Anteil an Strom für Heizung noch relativ gering, wird aber mit der Verbreitung von Wärmepumpen und Elektroheizungen steigen. In Summe werden daher Einsparungen im Winter einen deutlich höheren Wert haben.

In diesem Beitrag wird am Beispiel eines realisierten Null-Energie-Mehrfamilienhauses eine PE-Bewertungsmethode diskutiert, die es

ermöglicht, die zukünftige Entwicklung der Last (d.h. des Gebäudebestands) und des Strom-Mix (Anteil der EE) mit saisonalen Schwankungen zu erfassen und die Auswirkungen aufzuzeigen und damit ein Ranking verschiedener passiver und aktiver Technologien ermöglichen.

SCHLÜSSELWÖRTER

Erneuerbare Energie und Effizienz in Gebäuden, nZEB/NZEB, Makro-ökonomische und Mikro-ökonomische Betrachtung, primärenergetische Bewertung, monatliche Primärenergiefaktoren

EINLEITUNG

Ein nachhaltiger und verantwortungsvoller Umgang mit Ressourcen ist erforderlich, um den Klimawandel einzudämmen. Mikroökonomische Ziele berücksichtigen in der Regel den Barwert der Investitionskosten und/oder die eingekaufte Energie, jedoch nicht die Umweltauswirkungen. Auf makroökonomischer Ebene muss jedoch die Nutzung von Primärenergie (PE) und die CO₂-Emissionen reduziert werden, während Kernenergie vermieden werden muss. Die energetische Nutzung von Biomasse (für Gebäude) ist begrenzt, auch da für Prozesse und Mobilität eine hohe Energiedichte benötigt wird.

Der Strom-Mix wird sowohl von der (saisonalen und täglichen) Verfügbarkeit erneuerbarer Energiequellen wie Wasserkraft, Wind und PV als auch von der Last (d.h. dem Gebäudebestand) beeinflusst.

Verfügbare Energiequellen: Die Verfügbarkeit von Wasserkraft ist relativ homogen (im Winter etwas niedriger), die Windenergie ist volatil und im Winter leicht höher und die PV weist sehr starke Unterschiede in der täglichen und saisonalen Verfügbarkeit auf.

Last: Gebäude, haben einen deutlich höheren Energiebedarf im Winter als im Sommer (mit Ausnahme der Kühlung, die aber rel. gut mit PV

gedeckt werden kann und daher hier nicht berücksichtigt wird). Der Anteil an Strom für Heizung ist in vielen Ländern noch relativ gering z.B. im Bereich von unter 5% in D nach BEDW (2016) und auch in Österreich nach Statistik Austria (2016). Der Stromverbrauch für die Heizung wird aber mit der Verbreitung von Wärmepumpen und Elektroheizungen in nZEBs/NZEBs (s.u.) zunehmen. Dies wird zu einer stärkeren saisonalen Veränderung der Strombelastung führen.

Ohne saisonale Energiespeicherung wird die Winterlast auch in Zukunft überwiegend durch fossile Ressourcen gedeckt werden müssen. Daher werden Massnahmen, die Energieeinsparungen im Winter ermöglichen zukünftig einen höheren Wert haben.

nZEB VS. NZEB

nZEBs und NZEBs sind in dem Sinne vergleichbar, dass beide auf die Minimierung von CO₂-Emissionen und nicht-RE-Primärenergie abzielen, jedoch unterscheiden sich die Definitionen im Detail deutlich und die Effizienz und damit die erreichte Energieeinsparung kann daher ziemlich unterschiedlich sein.

nZEB: Niedrigstenergiegebäude gemäß EPBD, 2010. Jeder Mitgliedsstaat hat eine nationale Definition mit signifikanten Unterschieden in Bezug auf den betrachteten Energieverbrauch (Heizung, Kühlung, Warmwasser, Nebenverbraucher, Haushaltsgeräte), Höchstgrenzen, Umrechnungsfaktoren usw. (siehe BPIE, 2016).

NZEB: Net Zero Energy Building, i.d.R. ist ein NZEB ein "Netzgebundenes Gebäude, das die gleiche Menge an Energie vor Ort aus erneuerbaren Energiequellen produziert, wie es auf Jahresbasis verbraucht." (IEA SHC T40/HPT A40). In dieser Definition gibt es eine Unschärfe hinsichtlich der Interpretation der Systemgrenze, der Energieströme, der Gewichtungsfaktoren usw.

Normalerweise enthält Net Zero Heizung (und Kühlung), Warmwasserbereitung und Hilfsenergien (Lüftung, Pumpen, Regelung/Steuerung, etc.), schließt jedoch Haushaltsgeräte aus. Letztere haben jedoch einen großen Anteil am Gesamtstromverbrauch (1500 kWh/a bis 4500 kWh/a, je nach Personenzahl pro Haushalt für einen typischen mitteleuropäischen

Haushalt, siehe z.B. BEDW (2013), Statistik Austria (2016).

Nach der oben genannten Definition kann ein NZEB im Winter relativ viel (elektrische) Energie verbrauchen, wenn entsprechend eine große PV-Fläche diese Menge im Sommer als überschüssige Elektrizität erzeugt. Dies bedeutet, dass das Stromnetz gemäß dem NZEB-Konzept als verlustfreier saisonaler Speicher zur Verfügung steht, was offensichtlich in Realität nicht der Fall ist. Um dieser Schwäche in diesem Konzept Rechnung zu tragen, wurden zusätzliche Leistungsindikatoren wie der Load-Match-Faktor oder der Anteil des PV-Eigenverbrauchs vorgeschlagen (siehe IEA SHC T40 / HPT A40).

Anmerkung: "net-zero" als Ziel kann ein irreführendes Konzept sein, da die Optimierung zu Netto-Null zu einstöckigen Gebäuden führen kann, da das Erreichen des Netto-Nullgleichgewichts im Vergleich zu einem mehrstöckigen Gebäude (mit verhältnismäßig kleinerem Dach und Fassadenbereich bezogen auf die Energiebezugsfläche) schwieriger ist. Allerdings sind MFH kompakter und damit aus energetischer und makroökonomischer Sicht günstiger, vergleiche auch Feist et al. 2014.

FALLSTUDIE: NZEB INNSBRUCK VÖGELEBICHL

Das Passivhaus (PH)-Projekt Vögelebichl in Innsbruck, zwei Mehrfamilienhäuser (MFH) mit zusammen 26 Wohnungen der sozialen Wohnungsbaugesellschaft NHT (siehe Abb. 1) wurde so konzipiert, dass der optimale Anteil von PV und Solarthermie (ST) eine NZE-Bilanz für Heizung, Warmwasserbereitung und Hilfsenergien ermöglicht. Das Dach des Südgebäudes ist vollständig mit PV (99,8 m²) bedeckt, das Dach des Nordgebäudes wird teilweise für PV (52,5 m²) und teilweise für ST (73,6 m²) verwendet. Abb. 2 zeigt ein vereinfachtes Hydraulikschema mit der (zweistufigen) GW-Wärmepumpe, dem Solarthermiekollektor (SC) sowie der Niedertemperatur-Wärmeverteilung und der separaten dezentralen Frischwasser-Aufbereitung (WW-Plattenwärmeübertrager). Die zweistufige Wärmepumpe ist mit einer Heißgas (HG) -Enthitzerschaltung ausgestattet. Je nach Betriebsart (Heizung oder Warmwasserbereitung) tritt der Wärmepumpen-

Vorlauf oben oder in 1/3 der Höhe von oben in den Pufferspeicher (BS) ein. Der kombinierte Rücklauf der Heiz- und Warmwasserleitung tritt in den 6 m³ großen Pufferspeicher in Abhängigkeit vom Temperatur-niveau entweder unten oder in etwa 1/3 der Speicherrhöhe ein, um die Schichtung zu verbessern. Die elektrische Nachheizung (BH) wird derzeit nicht verwendet.

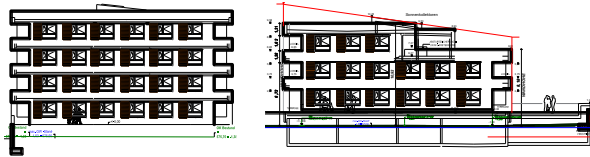


Abbildung 1: Westansicht der beiden MFHs in Innsbruck Vögelebichl, NHT Tirol; PHs mit 4-Leiter-Niedertemperatur-Verteilungssystem und Frischwassermodulen in jeder Wohnung

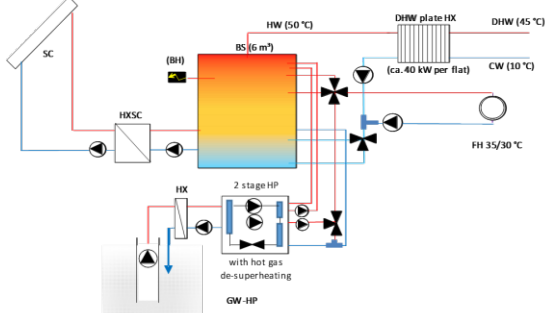


Abbildung 2: Vereinfachtes hydraulisches Schema der beiden NZEBs, Projekt NHT Vögelebichl Solarkollektoren (SC), Pufferspeicher (BS), 2-stufige Grundwasser-Wärmepumpe (HP) mit Heißgas (HG) Enthitzer-Schaltung im Heizmodus mit Fußbodenheizung (FH) und dezentralem Wärmetauscher (HX) für Warmwasser (DHW)-bereitung

SIMULATIONS- UND MONITORING-ERGEBNISSE

In Ochs et al. 2017 werden detaillierte Monitoring-Ergebnisse für beide Gebäude (Heizung und Warmwasserbedarf) und des Heiz-Systems (Verteilungsverluste, Leistungszahlen, Ertrag der Solarthermie- und der PV-Anlage) berichtet. Verbesserungen nach dem ersten Betriebsjahr und Planungsempfehlungen auf Basis von Monitoring-Daten und Simulationsergebnissen werden diskutiert. Die Prognosen werden einerseits vereinfacht mit dem Monatsbilanzverfahren (EN ISO 13790, PHPP) durchgeführt. Detailanalysen (zu Wärmepumpe, Speicher, ST, PV) erfolgen innerhalb der Simulationsumgebung Matlab/Simulink. Es ist zu beachten, dass das erste Betriebsjahr nicht repräsentativ ist (Baufeuchte, Teilbelegung, Einstellung der Regelung/Sollwerte etc.) und sollte entsprechend nicht für die Analyse verwendet werden sollte. Nach der

ersten Betriebsphase und nach der Durchführung einiger erster Optimierungsmaßnahmen (angepasste Sollwerte usw.) kann mit einem Betrieb der Gebäude und der HLK-Anlage mit netto Null-Energiebilanz gerechnet werden. Abb. 3 zeigt die simulierte monatliche Energiebilanz mit der Einführung der Verbesserungen. Abb. 4 zeigt die resultierende elektrische Energiebilanz, die für die weitere Analyse der Daten verwendet wird. Die Nettoenergiebilanz für Heizung, Warmwasser und Hilfsenergie wird mit PV auf dem Dach erreicht. Zusätzliche PV-Flächen an den Südfassaden sind erforderlich, wenn auch der Haushaltsstrom berücksichtigt werden soll.

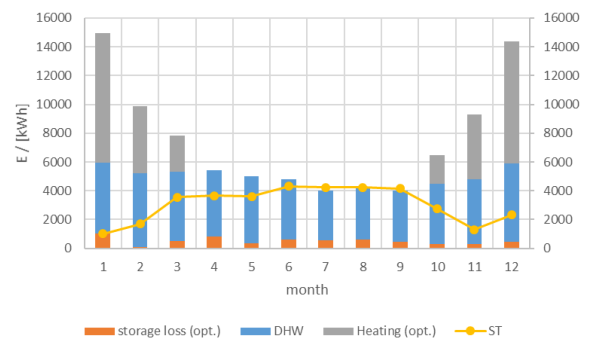


Abbildung 3: auf Basis von Messdaten simulierte monatliche Wärmeenergiebilanz nach Optimierung

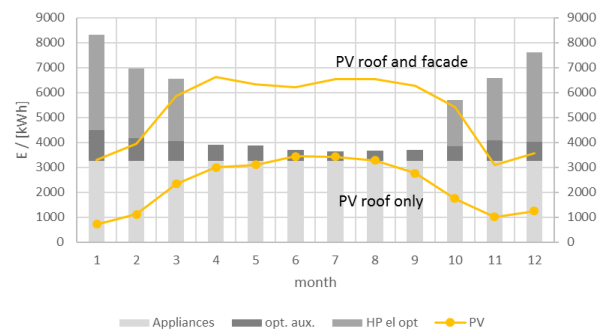


Abbildung 4: Simulierte monatliche elektrische Energiebilanz (nach Optimierung) mit PV auf dem Dach (wie realisiert) und PV auf dem Dach der Südfassaden (nicht realisiert)

MONATLICHE PRIMÄRENERGIE-UMRECHNUNGS-FAKTOREN

Es ist eine geeignete Bewertungsmethode für den Vergleich und die Einstufung verschiedener passiver und aktiver Technologien auf mikro- und makroökonomischer Ebene erforderlich. Nationale Umrechnungsfaktoren für PE/CO₂ beruhen nicht nur auf Fakten, sondern sind teilweise politisch motiviert. Diese unterscheiden sich erheblich zwischen den verschiedenen EU-Mitgliedstaaten und unterliegen Änderungen, z.B. Deutschland (ENeV) 1,8 seit 2016 (2,4

zuvor), Österreich 1,91 seit 2015, 2,62 zuvor (OIB-6 2015, OIB-6 2011). Saisonale Schwankungen werden überhaupt nicht berücksichtigt.

Für den Strom-Mix sollte der Anteil erneuerbarer Energien innerhalb des Zeitrahmens der Betrachtung (z.B. 20 Jahre) einbezogen werden und nicht wie gewöhnlich der aktuelle (oder vergangene) Status. Vor allem im Sommer ist in naher Zukunft mit einem deutlich höheren Anteil an EE-Strom (aus PV) zu rechnen, während im Winter nur ein moderater Anstieg zu erwarten ist, es sei denn, ein signifikanter weiterer Ausbau der Windenergie oder starke saisonale Speicherkapazitäten werden aufgebaut.

Wenn eine große Anzahl von Gebäuden zukünftig WP zur Raumheizung und Warmwasserbereitung verwenden werden und Strom vor Ort mit PV produziert wird, hängen sowohl die zugekaufte elektrische Energie als auch der Anteil erneuerbarer Energien im Strom-Mix voneinander ab. Strom, der vor Ort verbraucht wird, ist im Netz nicht verfügbar und ein erhöhter Anteil fossiler Brennstoffe am Energiemix muss berücksichtigt werden. Die Einspeisung von PV-Strom in das Netz wird die fossilen Brennstoffe im Winter, Frühjahr und Herbst wahrscheinlicher ersetzen als im Sommer.

Ein Modell für den PE-/CO₂-Umrechnungsfaktor für den Strom-Mix muss daher die EE-Verfügbarkeit und die Lastkurve berücksichtigen. Ein möglicher Ansatz, den PE-Bedarf und die CO₂-Emissionen eines Gebäudes mit vor Ort RE-Erzeugung auszugleichen, ist schematisch in Abb. 5 dargestellt.

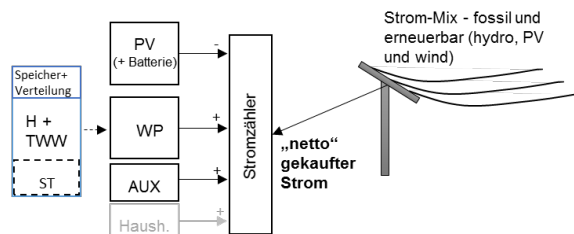


Abbildung 5: Ansatz für die Berechnung der monatlichen Nettoenergiebilanz mit teilweise durch ST gedecktem Bedarf an Heizung (H) und Warmwasser (TWW); Der restliche Bedarf wird durch eine Wärmepumpe (WP) gedeckt, die teilweise durch (vor Ort) PV versorgt wird, der verbleibende Strombedarf für die WP, Hilfsenergien (und Geräte) wird vom Netz mit volatilen Anteilen erneuerbarer Elektrizität gedeckt

Solarthermie (ST) wird zur Senkung des Energiebedarfs (Heizung, Warmwasser, Speicher- und Verteilungsverluste) verwendet. Eine Wärmepumpe (WP) deckt den verbleibenden Energiebedarf. Vor-Ort PV kann direkt für Haushaltsstrom und Hilfsenergien oder zum Antrieb der WP genutzt werden. Ein (Batterie-)Speicher wird benötigt, der Verlusten unterliegt, wenn der Eigenverbrauch erhöht werden soll.

Es wird eine monatliche Bewertung auf der Grundlage monatlicher Primärenergiefaktoren vorgeschlagen, anhand derer eine repräsentativere Umweltwirkung verschiedener Effizienz- und RE-Maßnahmen berechnet werden kann. Die spezifische Primärenergie (e_{PE}) wird für jeden Monat berechnet (i)

$$e_{PE} = \sum f_{PE,i} \cdot W_{el,i} \quad (\text{eq. 1})$$

Bei unterschiedlichen Anteilen von Wasser-, Wind-, PV- und fossiler Energie kann der PE-Umrechnungsfaktor auf monatlicher Basis unter Verwendung von z.B. den in Tabelle 1 aufgelisteten PE-Umrechnungsfaktoren.

$$f_{PE} = f_{PE,hyd} \cdot W_{el,hyd} / W_{el} + f_{PE,wind} \cdot W_{el,wind} / W_{el} + f_{PE,PV} \cdot W_{el,PV} / W_{el} + f_{PE,fos} \cdot W_{el,fos} / W_{el} \quad (\text{eq. 2})$$

Tabelle 1: CO₂-Emissionen und Primärenergie (PE) Umrechnungsfaktoren fossiler und erneuerbarer elektrischer Energiequellen, gem. DVGW 2016 und eigenen Annahmen*

Quelle	CO ₂ / [g/kWh]	f _{PE} / [kWh _{PE} /kWh _{el}]
Strom-Mix Deutschland	520	
Strom aus Gas	432	2.4
Wasser (Hydro)		0.01
Wind	9	0.05
PV (off-site)	56	0.1

Es werden exemplarisch zwei vereinfachte Szenarien mit unterschiedlichem Anteil erneuerbare Energien am Strom-Mix untersucht.

A: mit 10 % Wasserkraft-, 10 % Windenergie- und 10 % PV-Anteil

B: mit 10 % Wasserkraft, 30 % Wind und 30 % PV

Tabelle 2 zeigt für die zwei Szenarien (A und B, siehe auch Abb. 6) die sich ergebenden monatlichen Umrechnungsfaktoren.

Tabelle 2: Monatliche PE-Umrechnungsfaktoren siehe Abb. 6 und PE Umrechnungsfaktoren gem. bis Tab. 1

	A: 10-10-10	B: 10-30-30
Jan	2.01	1.53
Feb	1.96	1.42
Mar	1.89	1.23
Apr	1.6	0.5
Mai	1.33	0.08
Jun	1.2	0.08
Jul	1.18	0.08
Aug	1.28	0.08
Sep	1.53	0.33
Okt	1.78	0.98
Nov	1.92	1.33
Dez	2.01	1.54

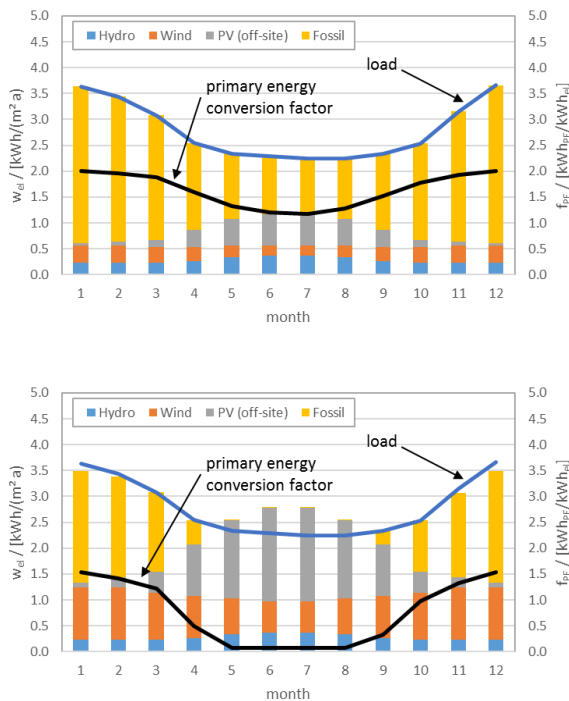


Abbildung 6: Monatlicher Anteil erneuerbarer Energien (Wasser, Wind, PV, fossil) und entsprechender PE - Umrechnungsfaktor, Beispiel eines PH mit einer WP für Heizung und Warmwasserbereitung mit (a) einem Anteil von 10% Wasser, 10% Wind und 10% PV und (b) ein Anteil von 10% Wasserkraft, 30% Wind und 30% PV im Strom-Mix

ERGEBNISSE UND DISKUSSIONEN

Die spezifische PE (e_{PE}) für die Heizung und Warmwasserbereitung mit der HP (nach Einführung von Verbesserungen, d. H. NZEB ist erreicht), mit Geräten ohne und mit 300 m² PV in den Südfassaden wird unter der Annahme der beiden Szenarien berechnet. Abb. 7 zeigt, dass in Szenario B mit einem höheren Anteil erneuerbarer Energien im Netz (insgesamt 70%) der zusätzliche PV in der Fassade zu weniger PE-Einsparungen führt als im Fall A mit

insgesamt 30% der erneuerbaren Energien. In Szenario A reduziert die zusätzliche PV in der Fassade den jährlichen spezifischen PE - Bedarf von 32,7 kWh_{PE}/(m² a) auf 15,2 kWh_{PE}/(m² a) oder um 53,5%, während sie in Szenario B von 21,9 kWh_{PE}/(m² a) bis 11,2 kWh_{PE}/(m² a) oder um 49,2%.

Stand der Technik ist die Verwendung eines konstanten PE-Umrechnungsfaktors, z.B. 1,8 in D, 1,9 in At. Es ergeben sich PE-Einsparungen mit einem konstanten PE-Umrechnungsfaktor von 42% ohne und 74% mit PV in der Fassade im Vergleich zum Fall ohne PV vor Ort, vgl. Abb. 8.

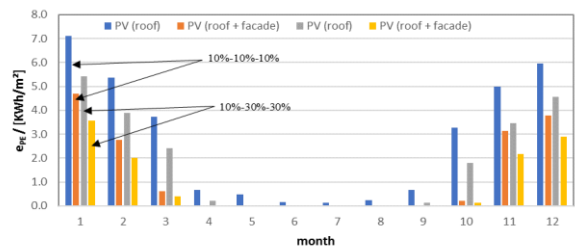


Abbildung 7: Spezifische PE (e_{PE}) für Heizung und Warmwasserbereitung mit WP, verbessertes System, mit Haushaltsstrom ohne und mit 300 m² PV in Südfassaden für Fall A (10 % Wasser, 10 % Wind und 10 % PV) und Fall B (10 % Wasserkraft, 30 % Wind und 30 % PV)

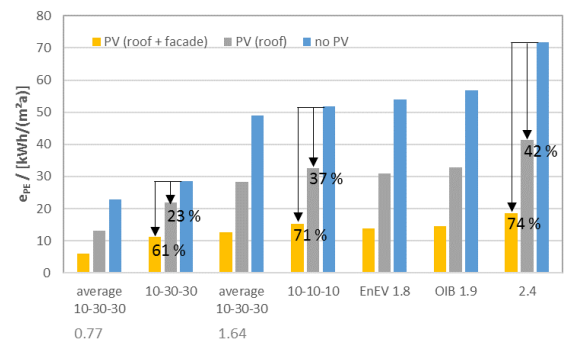


Abbildung 8: Jährliche PE-Einsparung für die verschiedenen Szenarien aus Abbildung 7.

Im Szenario A reduzieren sich die Einsparungen auf 37% ohne und 71% mit PV in der Fassade und auf 23% (ohne) und 61% (mit PV) in Szenario B. Bei konstantem (d.h. durchschnittlichem) PE-Umrechnungsfaktor werden Einsparungen unabhängig von der Jahreszeit gleich gewichtet. Somit werden Einsparungen im Sommer überbewertet. Maßnahmen wie (noch) besseres Dämmniveau, geringere Speicher- und Verteilverluste oder (noch) bessere WP würden die Winterlast weiter reduzieren und sind im Vergleich zu einer größeren PV-Fläche besser zu bewerten.

SCHLUSSFOLGERUNG

Zwei MFHs im PH-Standard mit ST- und WP-System und insitu-PV Erzeugung zur Erzielung maximaler PE-Einsparungen wurden in Innsbruck realisiert und über einen Zeitraum von mehr als zwei Jahren vermessen. Die Netto-Nullenergiebilanz (für Heizung und Warmwasser und Hilfsenergien) konnte im ersten Überwachungsjahr (2016) nicht erreicht werden, aber die auf den Ergebnissen nach Einführung der Verbesserungen basierenden Prognosen zeigen, dass Net-Zero erreicht werden kann. Der PH-Standard ist der Schlüssel zum Erreichen der NZE Bilanz für Heizung, Warmwasser und Hilfsenergien. Wenn der Haushaltsstromverbrauch in die Energiebilanz einbezogen wird, wären zusätzliche PV-Flächen an der Südfassade erforderlich.

NZEB reduziert die Netzbelastung im Winter nicht signifikant. Das Missverhältnis zwischen (Elektrizitäts-) Nachfrage und PV-Ertrag muss berücksichtigt werden, z.B. durch unterschiedliche Strompreise für Kauf und Verkauf oder durch saisonale/monatliche PE-Umrechnungsfaktoren. Es wird eine Methode diskutiert, die es ermöglicht, verschiedene Konzepte von nZEB/NZEB unter Berücksichtigung der Zeit (Saison) des Strombezuges aus dem Netz zu vergleichen. Damit wird es möglich verschiedene Technologien und Konzepte dahingehend zu optimieren, dass v.a. im Winter bei mangelnder Verfügbarkeit von EE Energie eingespart werden kann und damit der nicht-erneuerbare PE-Bedarf bzw. die CO₂-Emissionen reduziert werden können. Die zukünftige Entwicklung des Strom-Mix und der Last (Gebäudebestand) kann berücksichtigt werden und verschiedene Szenarien können bewertet werden.

DANKSAGUNG

Dieses Projekt wird finanziell von NHT, Innsbruck, Österreich unterstützt. PHPP-Berechnungen und PH-Zertifizierung wurde von PHI Innsbruck durchgeführt. Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung des Österreichischen Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie und der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) durch die IEA Forschungskoooperation (IEA HPT A49).

LITERATUR

- BPIE, *Nearly Zero Energy Buildings Definitions Across Europe*, EPISCOPE project (IEE/12/695/SI2.644739), 2016
- BEDW (2016), *Wie heizt Deutschland*, BEDW-Studie zum Heizungsmarkt, Juli, 2016.
- BEDW (2013), *Energie-Info*, Stromverbrauch im Haushalt, Berlin, 2013.
- DVGW 2016, Weiterentwicklung der Primärenergiefaktoren im neuen Energiesparrecht für Gebäude, Endbericht 7.4.2016
- Feist, Wolfgang (2014), *Passivhaus – das nächste Jahrzehnt*. In: Tagungsband zur 18. Internationalen Passivhaustagung, Aachen, April 2014.
- OIB-6 Richtlinie 6, *Energieeinsparung und Wärmeschutz*, Österreichisches Institut für Bautechnik, 2011, update 2015
- Ochs Fabian, Dermentzis Georgios, Feist Wolfgang (2014), *Minimization of the Residual Energy Demand of Multi-storey Passive Houses – Energetic and Economic Analysis of Solar Thermal and PV in Combination with a Heat Pump*, Energy Procedia Volume 48
- Ochs Fabian, Dermentzis Georgios, Aleksandra Ksiezyk (2018), *Simulation and Monitoring Results of two MFHs in PH Standard with Heat Pump, Solar Thermal and PV*, Solar Worls Congress, 2018, Abu Dhabi, UAE, 2018
- Statistik Austria, Bundesanstalt Statistik Österreich, 2016

CONVERGENCE TOWARD OPTIMAL BUILDING DESIGNS VIA MULTIPLE ITERATIVE LOCAL OPTIMIZATIONS APPLIED TO ATTRIBUTE CLUSTERS OF DESIGN VARIANTS

H. Shirdel¹, F. Tahmasebi^{1,2} and A. Mahdavi¹

¹Department of Building Physics and Building Ecology, TU Wien, Vienna, Austria

²UCL Institute for Environmental Design and Engineering, London, United Kingdom

ABSTRACT

The present paper explores the potential of a novel approach toward iterative global optimization of locally optimized attribute clusters of building design solutions. Thereby, clusters of design space attributes (i.e., sets of ontologically cognate aspects of designs) are made subject to multiple passes of local simulation-assisted optimization runs. Hence, instead of allocating an individual dimension to each and every variable of a complex design within the context of a single-pass global optimization campaign, multiple iterative optimization steps target coherent clusters of such attributes and pursue those until the overall design meets the expected performance (or until further performance improvement is not forthcoming).

INTRODUCTION

In the last decades, a number of developments have made global optimization procedures within large multi-dimensional design option spaces possible. Such developments include the increase in computing power, emergence of sophisticated optimization algorithms, and new techniques for the derivation of computationally efficient meta-models. Along with their promise, such developments also involve a number of potential drawbacks. For one thing, meta-models occasionally fail to capture the behaviour of "non-conventional" and complex designs. Another critical problem pertains to the potentially opaque nature of large-scale global

optimization exercises, which makes them less amenable to provision of intuitively comprehensible support in a naturally iterative design process.

In this context, the present paper explores the potential of a novel approach (introduced initially in Mahdavi et al. 2016) toward iterative global optimization of locally optimized attribute clusters of building design solutions. Thereby, clusters of design space attributes (i.e., sets of ontologically cognate aspects of designs) that are familiar to typical building designers are made subject to multiple passes of local simulation-assisted optimization runs. Hence, instead of allocating an individual dimension to each and every variable of a complex design within the context of a single-pass global optimization campaign, multiple iterative optimization steps target coherent clusters of such attributes and pursue those until the overall design meets the expected performance (or until further performance improvement is not forthcoming).

The paper reports on several tests of this approach, documenting the method's advantages (i.e., use of original simulation models instead of meta-models as well as iterative, transparent, and intuitive navigation of the design space).

The implementation of the proposed approach employs a number of existing graphical and computational applications, including Opossum as the optimizer of the system coupled to the energy simulation tools in Grasshopper which are Ladybug and Honeybee. Moreover, the

implementation targets scalability and flexibility: Specifically, users are to be provided with degrees of freedom in view of the selection of the clusters to be optimized. Also, additional clusters can be defined and variable sets in each cluster can be manipulated, while still achieving convergence within reasonable temporal horizons. We illustrate and document the performance of the current implementation of the proposed approach via optimization case studies.

The results thus far are highly encouraging: The proposed method delivers optimized solutions that are virtually indistinguishable from those of a reference one-shot global optimization run. But the results are not only obtained more accurate, but also via a transparent, traceable, and designer-friendly process.

BACKGROUND

Using computer programs for building energy analysis is not new. Since the late 1960s, the number of computer programs in both the public and private sectors has proliferated (Fiske & Bhonde 2015). High performance buildings are more likely to result from an effective performance-based design process. Such a process can benefit from computational support involving both building performance simulation and optimization techniques.

As such, the application of numerical optimization in the design process is not a recent phenomenon. In fact, research and development efforts in this domain have a track record over multiple decades, resulting in advanced in building informatics and mathematical optimization methods (Nguyen, et al., 2014). The ideas presented in this paper have thus the potential to further advance the integration of coupled simulation and optimization environments in the building process (Mahdavi et al. 2016).

TOOLS AND PLATFORM

A platform developed in Rhino/Grasshopper Ladybug and Honeybee was used for the energy simulation. Ladybug tools is a collection of free computer applications that support

environmental design and education. Ladybug Tools connects 3D Computer-Aided Design (CAD) interfaces to a host of simulation engines (Sadeghipour Roudsari & Mackey 2018). Honeybee supports detailed daylighting and thermodynamic modelling. Specifically, it creates, runs, and visualizes the results of energy models using EnergyPlus/OpenStudio (Sadeghipour Roudsari & Mackey 2018). It accomplishes this by linking the simulation engines to Rhino/ Grasshopper as CAD and visual scripting interfaces.

The selected optimizer for the implementation was Opossum, a recently introduced optimization plug-in for Grasshopper. It is a publicly available, model-based optimization tool aimed at architectural design optimization and especially applicable to problems that involve time-intensive simulations regarding, for instance, daylighting and energy use (Wortmann 2017).

OPTIMIZATION ITERATIONS APPROACH

The approach regarding optimization iterations in the following examples is a predefined sequence between the attribute clusters (Figure 1).

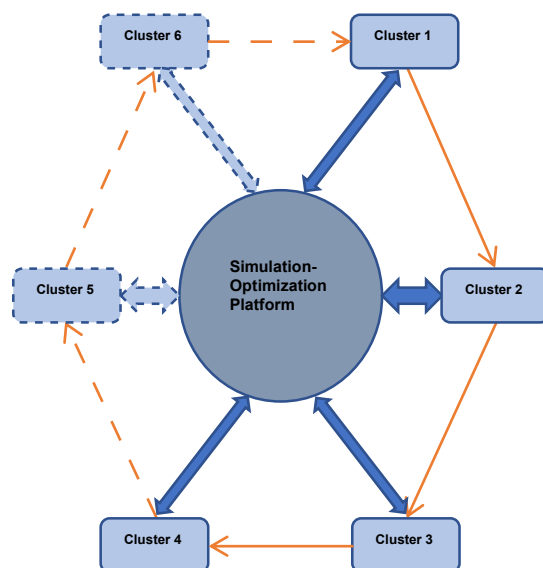


Figure 1: illustration of the iterations between attribute clusters.

FIRST DEMONSTRATIVE EXAMPLE

Model

The base model is an open-office building in Vienna. The building's dimensions (length, width, height) are 20 m, 15 m, and 5 m.

Five thermal zones have been defined, namely one core zone and four perimeter zones (Figure 2).

The glazing to wall ratio is 40% on the North façade, 30% on the West façade, 60% on the South façade, and 50% on the East façade. For each window, shading elements have been considered. Shades on the North façade are horizontal (two sets), whereas those on the West façade are vertical (two per window). Shades on the South façade are horizontal (two sets). Likewise, shades on the East façade are horizontal (two sets) (Figure 3).

The construction for the opaque and glazing parts of the building's envelope was selected from the EnergyPlus construction library under consideration of the climate zone of the building's location.

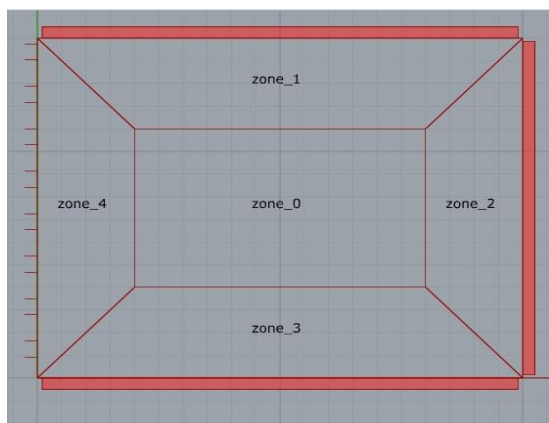


Figure 2: Schematic plan of the building model.

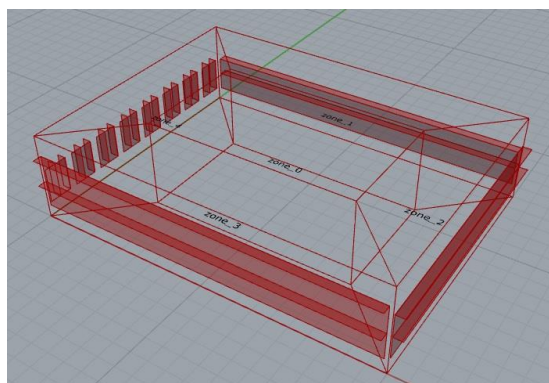


Figure 3: View of the building model.

Definition of the clusters

Building's Geometry (BG)

Assuming the building's area is fixed (in this case 300 m²), the first variable of this cluster is the building's length, can vary between 10 and 30 m.

Another variable is the orientation of the building with regard to the north axis and can vary between -90° and 90°.

In each façade, the window to the wall ratio can vary between 10% to 90%.

On each window, it is possible to apply horizontal or vertical or shading elements.

The depth of overhangs and fins could vary between 0 and 0.6 m in each façade.

The number of the shading elements could be between 0 to 5 on each window.

As a whole, this cluster has 18 independent variables.

Envelope Constructions (EC)

The variables of this cluster are External wall, Windows and Roof constructions. The values of these variables were extracted from the construction libraries of EnergyPlus (Table 1). To narrow down the search space and thereby reduce the optimization time, the construction libraries were filtered while considering the ASHRAE climate zone of the building's location as represented by the EnergyPlus weather file. Overall, there are 3 variables in this cluster.

Table 1: List of the construction.

List of the constructions based on EnergyPlus construction library.
0 - ASHRAE 90.1-2010 EXTWALL MASS CLIMATEZONE 5
1 - ASHRAE 90.1-2010 EXTWALL MASS CLIMATEZONE ALT-RES 5
2 - ASHRAE 90.1-2010 EXTWALL METAL CLIMATEZONE 5-6
3 - ASHRAE 90.1-2010 EXTWALL STEELFRAME CLIMATEZONE 4-8
4 - ASHRAE 90.1-2010 EXTWALL STEELFRAME CLIMATEZONE ALT-RES 2-6
5 - V ASHRAE 90.1-2010 EXTWALL WOODFRAME CLIMATEZONE 5
0 - ASHRAE 90.1-2010 EXTROOF IEAD CLIMATEZONE 2-8
1 - ASHRAE 90.1-2010 EXTROOF METAL CLIMATEZONE 2-5
0 - ASHRAE 90.1-2010 EXTWINDOW METAL CLIMATEZONE 4-6
1 - ASHRAE 90.1-2010 EXTWINDOW NONMETAL CLIMATEZONE 5-6

Control (CO)

This cluster has aimed the operation of the shading devices and window openings during the year on each façade. To control the shadings operation the solar incidence on the window has been considered and varies between 10 W/m² and 150 W/m². Plus, the angle of the shading slats which varies between 0° to 90°. To have the optimum natural ventilation and controlling the window operation, the minimum (varies between 18°C to 22°C) and maximum (varies between 22°C to 26°C) outdoor temperature which the window could be open or closed have been considered. Totally, there are 4 variables in this cluster. Figure 4 shows the schematic view of the platform and the predefined sequence of iterations between the attribute clusters in this case study.

Performance indicators and cost function

The selected performance indicators in the present experiment (and the basis for the definition of the cost function (U)) include the building's annual heating (H), cooling (C), and lighting (L) energy demands. To establish the cost function, it is assumed the building's heating systems uses natural gas and has an 85% efficiency. The cooling system was assumed to be electrically driven with a COP of 3.5. Furthermore, it has been assumed that, for the same energy content, the electricity price is 1.8 times the price of natural gas.

$$U = \left(\frac{H}{0.85}\right) + \left(\frac{C}{3.5} \times 1.8\right) + L \times 1.8$$

Results

This section includes the results (variable values and their evolution) from optimization iterations applied to the aforementioned attribute clusters. Thereby, abbreviations BM and GO refer to "Base Model" and "Global Optimization" respectively. Figure 5 illustrates the evolution of the cost function together with the total energy demand in the course of 6

iterations between attribute clusters. Table 2 includes the corresponding numeric values. Figure 6 shows the energy demand (heating, lighting, cooling, and total) evolution for the same iterations. The corresponding numeric values are included in Table 3.

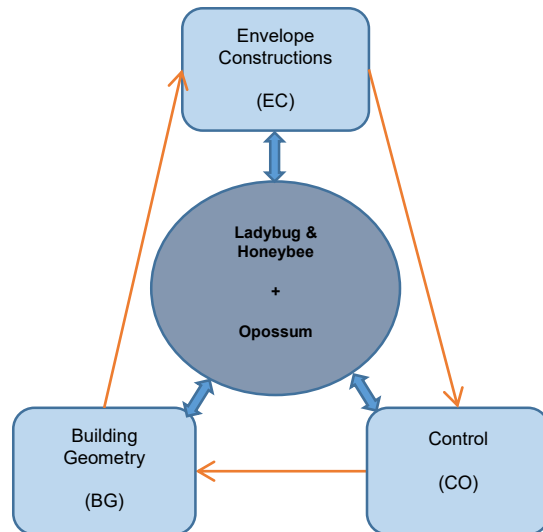


Figure 4: Schematic chart of the platform and iterations between the attribute clusters.

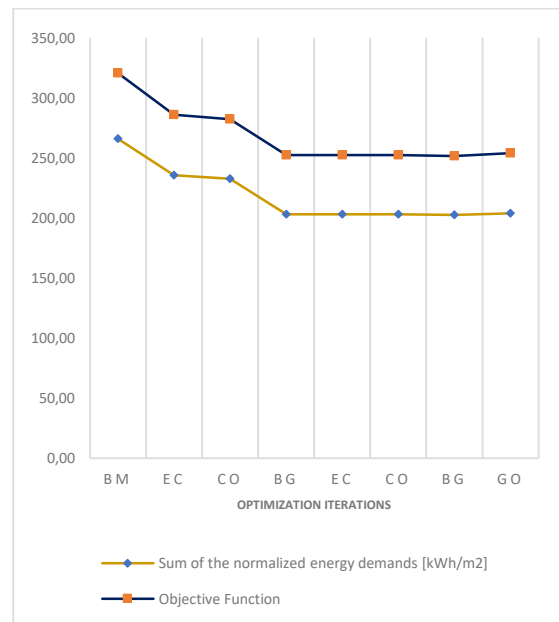


Figure 5: Cost function versus total normalized energy demand.

Table 2: Related values of the Figure 5.

	BM	EC	CO	BG	EC	CO	BG	GO
Sum of the normalized energy demands [kWh/m ²]	265,98	235,65	232,72	202,90	202,90	202,90	202,39	203,78
Objective Function	320,41	285,83	282,04	252,32	252,32	252,32	251,43	253,85

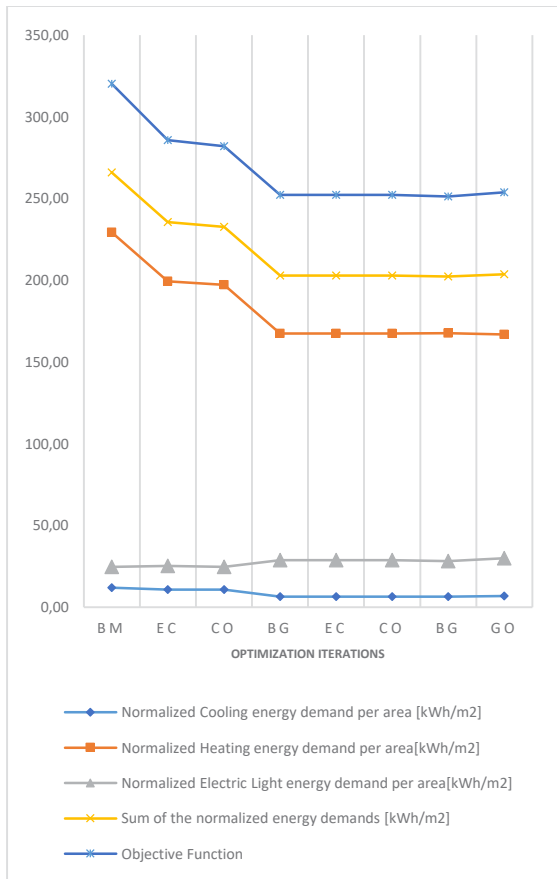


Figure 6: Cost function and detailed energy demand evolution.

Table 3: Related values of Figure 6.

	BM	EC	CO	BG	EC	CO	BG	GO
Normalized Cooling energy demand per area [kWh/m²]	11.92	10.85	10.77	6.54	6.54	6.54	6.45	6.90
Normalized Heating energy demand per area [kWh/m²]	229.39	199.51	197.28	167.58	167.58	167.58	167.73	166.92
Normalized Electric Light energy demand per area [kWh/m²]	24.67	25.29	24.67	28.78	28.78	28.78	28.21	29.96
Sum of the normalized energy demands [kWh/m²]	265.98	235.65	232.72	202.90	202.90	202.90	202.39	203.78
Objective Function	320.41	285.83	282.04	252.32	252.32	252.32	251.43	253.85

Table 4 shows the variable values and their evolutions during the iterations.

Table 4: Variables values evolution during the iterations.

	BM	EC	CO	BG	EC	CO	BG	GO
Building Length [m]	20			19			14	19
Building Orientation [degree from the North]	0			60			-90	-45
Window to wall ratio, North [%]	40			10			10	10
Window to wall ratio, East [%]	50			10			10	10
Window to wall ratio, South [%]	60			10			10	10
Window to wall ratio, West [%]	30			10			10	10
Position of the Shading, North (Horizontal/Vertical)	H			V			V	V
Position of the Shading, East (Horizontal/Vertical)	H			V			H	V
Position of the Shading, South (Horizontal/Vertical)	H			H			H	H
Position of the Shading, West (Horizontal/Vertical)	V			H			H	H
Shading slat length, North [m]	0.5			0			0	0.35
Shading slat length, East [m]	0.5			0.45			0	0
Shading slat length, South [m]	0.5			0			0	0
Shading slat length, West [m]	0.5			0			0	0
Number of the Shadings on the Windows, North	2			5			1	5
Number of the Shadings on the Windows, East	2			1			5	1
Number of the Shadings on the Windows, South	2			1			5	5
Number of the Fixed Shadings on the Windows West	2			0			1	1
External Wall Construction	2	3			3			3
Roof Construction	1	0			0			0
Windows Construction	0	1			1			1
Minimum Outdoor Temperature for Natural Ventilation [°C]	20			21			21	22
Maximum Outdoor Temperature for Natural Ventilation [°C]	24			26			26	26
Solar Incidence Set point for shading control [w/m²]	50			10			145	150
Shading Angle on the window [°]	0			0			0	0

SECOND DEMONSTRATIVE EXAMPLE

Model

The base model of the second case study is a 20 floors tower office building in Vienna (Figure 7). Each floor is an open office modelled as a thermal zone. Therefore, the model has 20 thermal zones. Each floor has a four-sided polygon shape. The radius of the peripheral circle of the first-floor polygon (the distance from the centre to the tip) is 5 m. The height of each floor is 4 m. The scale of the floors changes in a sinusoid pattern from the bottom to the top of the tower. Each floor rotates 5° with reference to the floor below. There is a pipe-wire skin at a distance of 1 m from the building's envelope. 50% of each façade (of each zone) consists of glazing. Half of the glazing area is operable on each side. There are two horizontal shading elements on each window. Each shading element is 0.5 m deep and 5 cm thick with a 45° angle (Figure 8).

The material of each shading device has 50% reflectance and 80% emissivity. Constructions of the opaque and glazing parts were retrieved from the construction library of EnergyPlus based on the ASHRAE climate zone of Vienna. Natural ventilation of each zone is controlled based on the outside air temperature. The shading elements are controlled based on the intensity of the solar radiation incident on the windows.

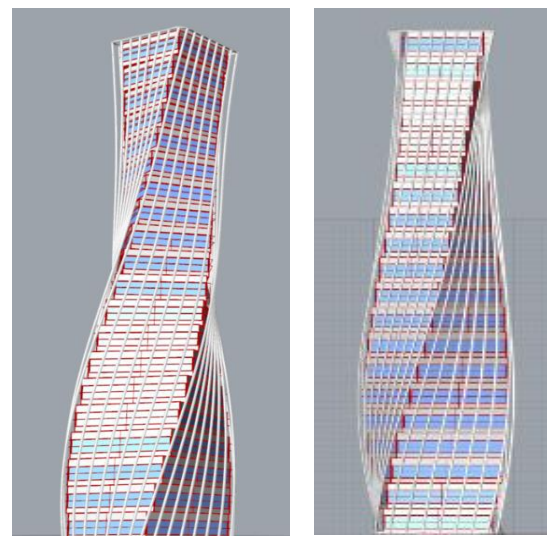


Figure 7: Views of the tower.

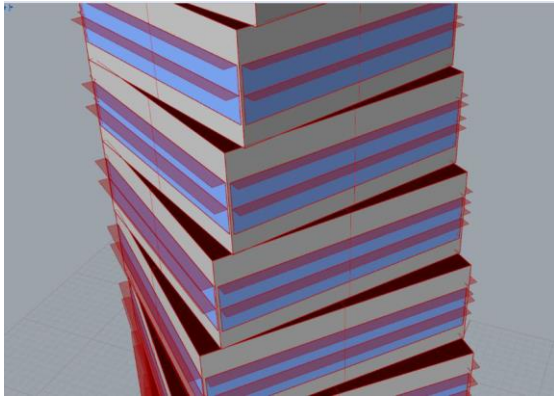


Figure 8: Closer view of the glazing and shading devices of the base model.

Definition of the clusters

Building Geometry (BG)

This cluster includes the geometry of the plan of the tower – the number of the edges of the polygon can vary from 3 to 6. The rotation of the successive floors can change between 0° to 10°.

Window to wall ratio of each façade of each zone represent a further variable with values that can vary between 10% and 90%. The length of the shading slat varies from 0 to 0.6 m. The number of the shading elements on each window can be between 0 and 5. The horizontal or vertical position of the shadings is also a variable. Overall, this cluster has 6 independent variables.

Material properties and Constructions (MC)

Reflectance and emissivity of the shadings (each varying between 5% to 95%), external walls, roof and window constructions represent the 5 variables of this cluster. The source for selecting the constructions is the same as the first example.

Control (CO)

The last cluster is concerned with operation of windows and shads during the year. For shades, the variables subjected to optimization are the threshold value for incident solar irradiance, above which the shades are deployed on, and the angle of the shading slats. With regard to ventilation, a base mechanical ventilation system is assumed that delivers a prescribed fresh air supply. However, given

appropriate conditions (expressed in terms of an outdoor ambient temperature band), an additional magnitude of fresh air flow via window operation is supplied. The variables subjected to optimization are in this case threshold values for outdoor temperature below which and above which windows are closed. This cluster includes thus 4 variables.

The platform and pattern of the attribute clusters iterations are the same as in the previous example.

Performance indicators and cost function

The performance indicators and cost function are the same one as in the previous example.

Results

This section includes results from optimization via predefined cycling between the aforementioned attribute clusters. Figure 9 illustrates the evolution of the cost function together with the total energy demand in the course of 6 iterations between attribute clusters. Following that, Table 5 contains the related numerical values of it. Figure 10 shows the energy demand (heating, lighting, cooling, and total) evolution for the same iterations.

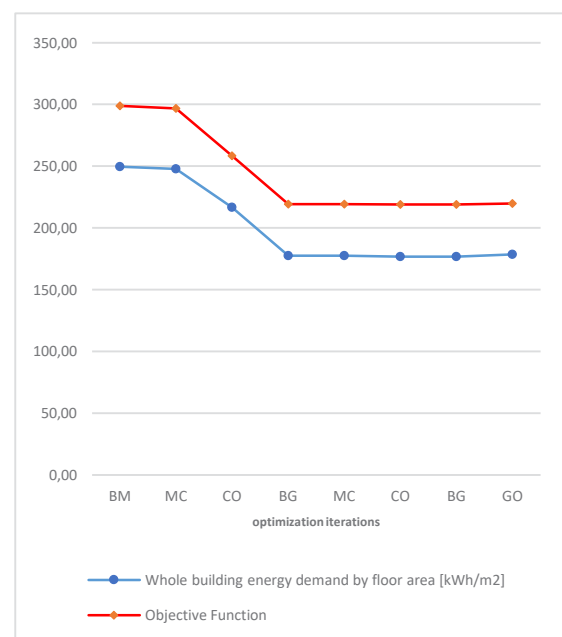


Figure 9: Cost function versus total normalized energy demand.

Table 5: Related values of Figure 9.

	BM	MC	CO	BG	MC	CO	BG	GO
Whole building energy demand by floor area [kWh/m ²]	249,43	247,79	216,72	177,36	177,36	176,76	176,76	178,43
Objective Function	298,85	296,87	258,36	219,13	219,13	218,88	218,86	219,66

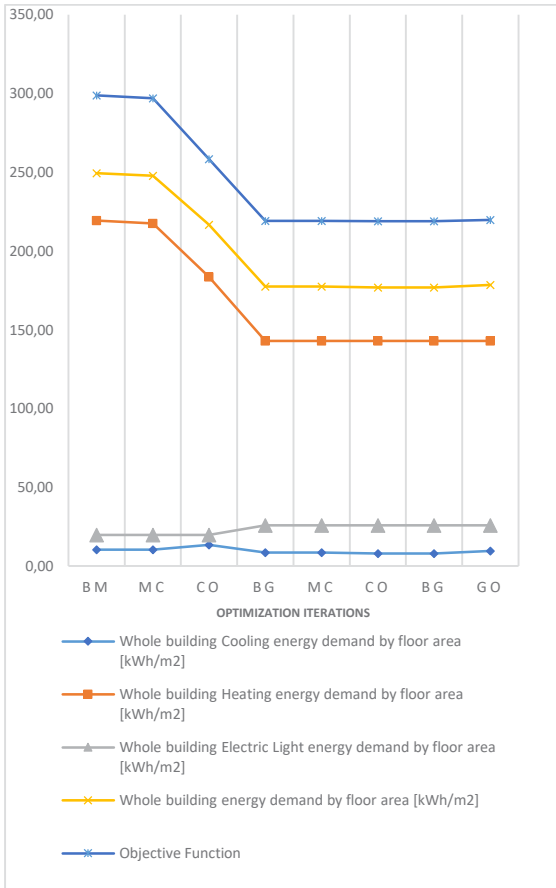


Figure 10: Cost function and energy demand evolution.

Table 6 entails the numerical values associated with Figure 10. Table 7 shows the evolution of the variable values during the 6 optimization iterations applied to attribute clusters.

Figure 11 illustrates additional information, which can be obtained via the proposed procedure and can provide the designer with the opportunity to study further details of the zones and design solutions as they emerge in the course of the iterations.

Table 6: Related values of Figure 10.

	BM	MC	CO	BG	MC	CO	BG	GO
Whole building Cooling energy demand by floor area [kWh/m ²]	10,39	10,50	13,41	8,58	8,58	7,90	7,91	9,66
Whole building Heating energy demand by floor area [kWh/m ²]	219,33	217,57	183,62	142,88	142,88	142,96	142,96	142,87
Whole building Electric Light energy demand by floor area [kWh/m ²]	19,70	19,73	19,69	25,90	25,90	25,90	25,89	25,89
Whole building energy demand by floor area [kWh/m ²]	249,43	247,79	216,72	177,36	177,36	176,76	176,76	178,43
Objective Function	298,85	296,87	258,36	219,13	219,13	218,88	218,86	219,66

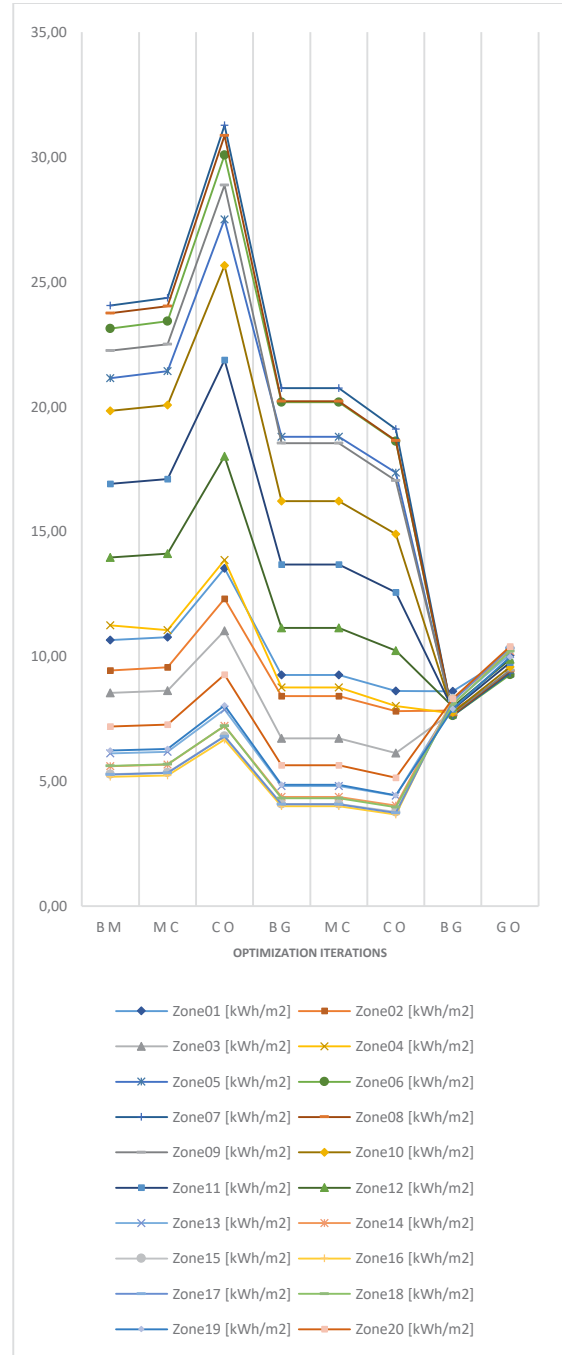


Figure 11: Zones normalized cooling demand evolution.

Table 7: Variable values evolution.

	BM	MC	CO	BG	MC	CO	BG	GO
Plan geometry (number of the polygon edges)	4			6			6	6
Rotations of successive floors [°]	5			10			1	2
Window to wall ratio [%]	50			10			10	10
Shading slot length [m]	0.50			0			0	0
Number of the shadings on the windows	2			0			0	4
Position of the shadings (Horizontal/Vertical)	H			H			H	V
External Wall Construction	2	4				5		3
Roof Construction	1	0				0		0
Windows Construction	1	1				1		1
Shading's material Reflectance [%]	50	27				23		94
Shading's material Emissivity [%]	80	39				46		81
Minimum Outdoor Temperature for Natural Ventilation [°C]	20		22				21	22
Maximum Outdoor Temperature for Natural Ventilation [°C]	24		24				24	23
Shading control setpoint (Solar incident on the windows) [W/m ²]	50		15				77	81
Shading angle [°]	45		0				20	60

DISCUSSION

Both presented examples display the rapid convergence toward optima, as indicated by decrease in value of energy use indicators and the cost functions (see Figures 5, 6, 9 and 10). The bulk of optimization-based design improvement is in fact achieved during the first three iterations. Note that after the third iteration, no significant change in cost function values was observed. Hence, in the present demonstration, only the first 6 iterations are illustrated. The process was terminated after 9 iterations.

As such, the end values of the individual design variables are not necessarily identical with those in the global optimization scenario. Interestingly, the proposed intra-cluster cycling approach in both case studies delivers better results with regard to the cost function.

CONCLUSION

We reported on the progress regarding a novel approach (Mahdavi et al. 2016) toward iterative global optimization of locally optimized attribute clusters of building design solutions. If well-structured, such clusters of design space attributes can be easily comprehensible to typical building designers as a compound yet coherent aspects of a design (e.g., building enclosure, building materials, building geometry, building systems, and control systems). Thus grouped, clusters can be made subject to multiple passes of local simulation-assisted optimizations instead of a single-pass black-box global optimization step. We provided a proof of concept of the proposed approach via a prototypical implementation using existing simulation and optimization tools. While not explicitly covered in this contribution, the implementation provides the users with degrees of freedom in view of the selection of the clusters to be optimized. Moreover, additional clusters can be defined and variable sets in each cluster can be manipulated, while still achieving convergence within reasonable temporal horizons.

We illustrated the performance of the current implementation of the proposed approach via two optimization case studies, which contained different complexities (i.e., a simple rectangular one-story building and a tower with more complicated geometry).

The results thus far are highly encouraging: The proposed method delivers optimized solutions (both at building and zone levels) that are – as far as the values of the energy performance indicators and the associate cost functions are concerned – virtually indistinguishable from those of reference one-shot global optimization runs. However, in our approach, the results are not only obtained more efficiently, but also via a transparent, traceable, and designer-friendly process.

REFERENCES

- Fiske, V. P. & Bhonde, C. B. K., 2015. Energy Simulation in Buildings. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, April.6(4).
- Mahdavi A., Shirdel H., Tahmasebi F., 2016. A novel approach to building performance optimization via iterative operations on attribute clusters of design options. Proceedings of the 11th European Conference on Product and Process Modelling (ECPPM 2016), Limassol, Cyprus. S.E. Christodoulou, R.J. Scherer (Ed.); Balkema, ISBN: 978-1-1380-3280-4; pp. 493 - 498.
- Nguyen A., Reiter S., Rigo P., 2014. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy*, Volume 113, pp. 1043-1058.
- Sadeghipour Roudsari, M. & Mackey, C. 2018. *Ladybug Tools*. <http://www.ladybug.tools/>
- Wortmann, T., 2017. *Opossum: Introducing and Evaluating a Model-based Optimization Tool for Grasshopper*. Hong Kong, s.n.

SYSTEM MAPPING AND GENERATIVE HIERARCHICAL ZONE CONTROL STRUCTURE FOR A SCALABLE BUILDING CONTROL LOGIC

N. Sterl¹, A. Mahdavi¹ and M. Schuß¹

¹Department of Building Physics and Building Ecology TU-Wien, Vienna, Austria
bpi@tuwien.ac.at

ABSTRACT

New technologies in building control and increasingly complex building systems have led to the need for more coordination and communication across involved engineering domains.

This paper presents a structural mapping and control structure generation approach. Control elements, their effects and interactions between devices and zones are mapped within a modular zone concept. It links to the structure of BIM and IFC data models.

A scalable and automatable method for the generation of a hierarchical closed-loop control scheme is developed. The computer aided tool provides inputs for the planning process, the structured approach allows integration into performance- and optimization simulation workflows.

INTRODUCTION

Latest developments for advanced building control systems have led to increasing complexity of building systems. A structured approach enhances the communication between architects and engineers and supports the configuration of building control structures. A systematic representation of the buildings' feedback control architecture is of special importance when advanced building control strategies as multi-parameter, hierarchical and predictive building controls are discussed.

Yet, there are only few established structural approaches towards a general scheme, aligning building physics, building controls, systems and their impacts and effects.

Publications and existing tools use a functional approach with automated generation of Building

Automation Control Systems (BACS) from spatial data, equipment and functions (Dibowski et al. 2006). These approaches are product- and network topology driven and aggregate functionalities of single input/single output control (SISO) systems to a distributed control within a BACS specification. Available software tools (e.g. Auteras, Kabitzsch 2018), help to establish a functional structure with informatics system centred views on datapoint and function specification (DIN EN ISO 16484).

This project on the contrary emphasizes a structural approach of classical closed-loop control. The system builds on a modular multiple-input/multiple-output (MIMO) system configuration and models system interdependencies.

This work refers to previous work (Rader et al. 2015, Mertz et al. 2003) focusing on a rule-based generation of a closed-loop control structure for building control systems.

A new zone concept is developed as modular kit and forms the basis for the composition and mapping process of the systems. The process is embedded into existing data formats and building model standards. A simple but effective user interface addresses the support for the definition of zones and modular integration of devices, sensors and controllers (Mahdavi 2015).

Subsequently, rules for an automated and scalable control scheme generation are developed. Special emphasis of this work is on the scalability of system mapping and control structure generation, as e.g. for large and complex buildings. At the same time, the focus is on a systematic and straightforward approach, which can be automated and yet is easily comprehensible.

STRUCTURAL MAPPING & HIERARCHY

The zone concept builds on a highly modular system. For an effect-oriented modelling both, spatial and physical system interdependencies are considered (Geyer 2012).

To reduce the complexity of the overall system, the building is decomposed into spatial structures as sections, spaces and zones or segments to VDI 3813. The 'zones' are pivot elements for the mapping of the underlying building structure and for linking the systems into a hierarchical control scheme. Building system control elements and their effects and interactions with respect to building physics and architectural boundary conditions are mapped to the affected physical zones.

A prototypical tool provides support and an effect-based system view on input-output relations and physical interactions of physical zones. Control circuit elements as actuators/controlling devices, sensors and controllers are integrated as a modular system kit and represent elementary SISO closed-loop control circuits. The object-oriented modular approach supports the automated generation process.

This spatial and structural system model representing elementary control circuits is then linked into a scheme consisting of multiple control levels and associated control zones. Higher controller levels coordinate the relations of control domains across respective zones.

Zone Concept

Physical Zone (PZ)

Figure 1 shows the modular base element of a physical zone. This modular base element setup is embedded in an architectural space and provides for a multitude of standard primary and secondary input-output relations. These causal relations are described in form of a directed graph connecting the impacts to the PZ output states. Their estimated effect intensity is represented by corresponding edge weights.

Acting agents, as controlling devices, are linked as modules to the physical zones input ports. The physical zone not only models the internal physical dependencies but also provides the necessary ports to map physical interactions of zones amongst each other.

The output ports represent the states of the controlled system. They are the anchor point for

sensor objects, which feed the measured output state values back into the control circuit.

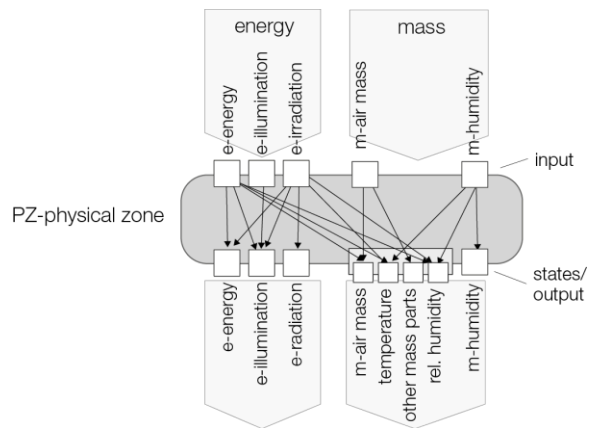


Figure 1: Physical zone

The zones shape and extent represents the impact sphere of a specific physical interaction; it can be imagined as a space, limited by an action induced effect of a certain magnitude. The extent and shape of a physical zone thus not necessarily follows the geometry of a room or architectural space.

Geometry type objects constitute discontinuities to the transmission of effects induced by devices (e.g. opaque wall for light transmission) and represent another set of limiting boundaries to an impact sphere, putting a geometric limit to an effect-based sphere of influence.

For effect propagation based on mass transfer (e.g. convection, ventilation), geometric boundaries are necessary conditions to assess an extent of the impact sphere.

Thus, even though the effect-based concept seems independent of geometries, there is a link between the geometry of building spaces and the extent of physical zones.

However, the relation of physical zones and geometric spaces (rooms) do not necessarily represent a one-to-one relation. For complex or large building geometries and areas showing considerably differing internal characteristics, conditions or constraints, several physical zones within one architectural space can be specified and be put in relation with each other (Wong et al. 2000). In that sense the physical zone element could be considered a very simplified finite element description method of an architectural space system configuration.

In terms of classical control theory, the physical zone represents the controlled process in a control loop (DIN IEC 60050-351). The input for this controlled system is the manipulating variable (device output).

Active Elements - Devices and Controllers

Figure 2 shows the hierarchical structure of devices, sensors and controllers

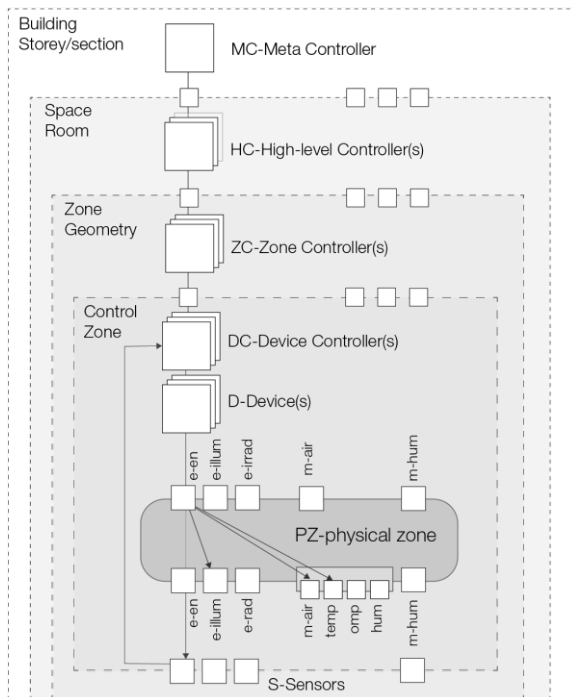


Figure 2: Control hierarchy

Devices (D)

A 'device' (final controlling equipment, acc. DIN IEC 60050-351) is an equipment or system, delivering some quantity of energy and/or mass to a physical zone. Its function is activated by a controller or by manual input and via an actuator. Devices are selected to address specific requirements as e.g. a radiator or floor heating for achieving target levels of thermal comfort.

One or more selected device modules are linked to the respective input port of a physical zone. Their impacts/effects are routed via the provided effect paths to the output states of the physical zone; the paths can also be manually specified.

A configuration of one device acting on the physical zone represents a minimum forward control system (e.g. direct human interference, switching a heater on/off).

Sensors (S)

Sensor modules are linked to the outputs of a physical zone and provide feedback information to the information network.

Device Controller (DC)

The device controller sets control actions based on target and feedback values. A controller in this scheme does not specify any actual type or algorithm but represents a container for control semantics. It even can represent different control algorithms for specific situations; e.g. represent an autonomous stand-alone feedback system in case of a failure mode operation or a servo controller with a different set of control parameters in case of a cascaded control.

A configuration of one DC, D, PZ and S represents a minimum SISO feedback control system configuration.

Unit (U)

Within the 'zone' concept, the 'unit' concept describes encapsulated systems. Examples are HVAC systems, containing themselves a complex self-contained control system. They are modelled as virtual zones and can be implemented into the presented zone concept. The outputs (mass or energy) of such systems are linked to the input ports of one or more physical zones. A higher-level building control acts on these virtual zone systems by transmitting target values.

Active components spanning their impact across several physical zones and/or spaces are handled in a similar way (e.g. external shades across several windows).

Control hierarchy

Zone controller (ZC)

Zone controllers represent the first coordination level of higher control instances and coordinate MIMO system priority issues; they resolve decoupling-, prioritization- or optimization tasks for several control actions impacting one PZ's output parameter. These zone controllers are grouped by comfort type categories the respective output state is referenced to; e.g. pertaining to the thermal-, visual-comfort and air quality domain.

High level controller (HC)

High level controllers assume coordination/optimization tasks in case device controllers

are responding to requests from several different previously assigned zone controllers. They handle conflicts of objectives across comfort domains; the prevailing conflicts are between the thermal & visual (heating, irradiation) and thermal & air quality domains (heating, ventilation), limiting the number of high-level controllers to two in most cases.

Meta Controller (MC)

A meta controller is bundling all remaining prioritization tasks amongst high-level controllers as well as addressing the interactions between spaces or storeys with their respective zones. Meta controllers represent the process management level, also cover other high-level tasks as e.g. estimates of disturbance variables (e.g. weather forecast) and perform optimizations with economic targets (e.g. energy, cost).

Structural Representation

The structural mapping into a hierarchy can be represented in the form of a directed graph and by the graphs adjacency matrix. The adjacency matrix for a directed graph is a non-symmetric square matrix with its elements $A_{ij} > 0$ indicating connections between two vertices i and j . The elements A_{ij} can have associated edge weights, representing the estimated magnitude of the relations effect between node i and j . As the modular block scheme of the structure itself, the hierarchy representation within an adjacency matrix can be built in a modular manner. Figure 3 shows the internal structure of the adjacency matrix with the zone sets on the diagonal. Connections within zones are represented by submatrices within the adjacency matrix. Physical zones are a further subset to these block matrices. Matrices represent a suitable method for scalable system descriptions, calculation algorithms and graph calculations.

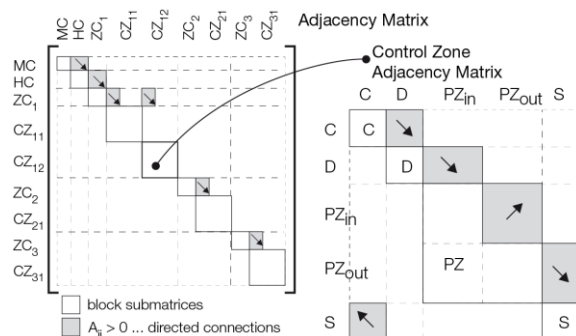


Figure3: Adjacency Matrix

Spatial hierarchy

The spatial hierarchy – building-storeys-space – corresponds to the hierarchical composition of building objects in the IFC - Industry Foundation Classes (buildingSMART 2018). Spaces can be further decomposed to several physical zones. The physical zone represents the base layers of control system related entities.

Figure 4 shows the two hierarchy systems, the IFC spatial structure and the control layer framework.

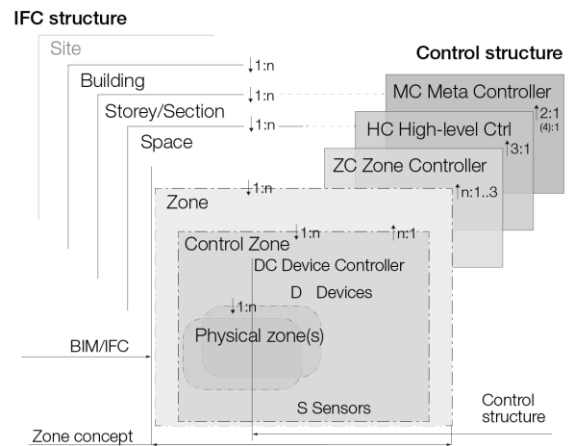


Figure 4: Hierarchy structure

In cases the zones represent a space in a one-to-one relation, the zone controller (ZC) spatially corresponds to a space level controller.

The functionality of a meta controller (MC) as highest coordination instance spans across the IFC-building or storey level, depending on the size and complexity of the building.

The high-level controller (HC) coordinates within zones, an agglomeration of zones or clusters of spaces and does not directly relate to a spatial IFC element.

GENERATIVE HIERARCHICAL CONTROL STRUCTURE

In a simple SISO control structure one controller/device impacts one system output in a one-to-one relationship without the need for an additional hierarchical coordination layer.

However, apart from the primary desired effect, a control action will cause secondary effects. Physical building systems show multiple and highly interrelated effects (MIMO system), impacting several output states of a physical zone.

The resulting structure is highly nested and can develop extreme complexity and representational problems. Hence the need to systematically organize the interdependencies and to assign subsequent coordination and control tasks to a superposed hierarchical structure.

With the objective for a scalable and converging method, this work proposes a set of rules for the structural generation and configuration of a multi-level control logic with a defined hierarchy of tasks. The steps towards the mapping and principal structure are modified with respect to previous publications (Rader et al. 2015, Mertz et al 2003), whereas the creation of the higher hierarchical levels of a multi-level control logic scheme takes a different approach.

Mapping process

The first steps guide through the modelling of the principal control circuits within a control zone and their cross-relational effects, leading to a set of single input/multiple output (SIMO) models.

- Step 1, PZ: one distinct physical control zone model acts as the pivoting base layer for each zone. The number of such PZ's per space depends on the degree of differing geometries and areas showing considerably differing characteristics, conditions or constraints.
- Step 2, D: To satisfy a specific given comfort requirement (e.g. room temperature for thermal comfort) corresponding devices are selected and connected to the ports of the physical zones.
- Step 3, S: The PZ's output is captured by a sensor, linked to the respective output port.
- Step 4, DC: Device controllers are connected to the respective device. Every individually controllable device is assumed to have a DC.

Creating the control structure

The second set of steps are employed to generate the relations of the control zone to the coordinating higher-level controllers:

- Step 5, ZC: if more than one device controller DC impacts one measured zone output state (sensor), a zone controllers' layer is generated as follows: these respective DC's are linked to one of four zone controllers. The targeted zone

controller depends on the domain this output/sensor signal is attributed to. E.g. a temperature sensor is attributed to thermal effect/comfort, hence the specific device controller is linked to the 'thermal' zone controller).

This layer accounts for the coordination of a comfort aspect across multiple devices and device controllers.

- Step 6, HC: If a device controller (DC) receives control requests from more than one zone controller, a high-level controller (HC) coordinates the actions of these zone controllers. Up to four HC categories are assigned by interdependency types. The common ones refer to the thermal-visual and the thermal-air quality relations. This layer accounts for the coordination across multiple basic comfort types and their related conflict of objectives.
- Step 7, MC: For coordination across spaces and storeys/sections a meta controller is established. The meta controller connects into the spaces' high-level controllers or the highest controller level within a space or zone respectively. This layer accounts for prioritization tasks amongst high-level controllers as well as interactions between spaces or storeys.

Generation process

The presented steps towards a hierarchical control structure form a strict rule-based process, suitable for automated generation. The proposed method is also convergent through the stringent formulation of the linking rules into zone controllers and high-level controllers. By their representation the number of zone controllers is limited to 3 (thermal, visual, air quality), the number of high-level controllers is 2 (with 2 rare control interrelations).

The physical zone concept with base modules and combinations of these, allow to model complex interacting structures. In the process self-contained SIMO system modules are aggregated to MIMO zone models. The generation process is automatable and scalable to any building size.

The generation of the coordinating controller levels and structure is performed according to steps 5 to 7. The proposed method uses the additionally available information on the measured output to categorize by related comfort category. Overlapping controls of devices and

subsequent impacts on PZ output states are merged into the coordinating functionality of zone controllers.

A different control theory approach is to assign the coordinating zone controllers according to the time constant equivalent of the affected physical system parameter. In the case of building control, however, this leads to a highly comparable classification as the visual effects clearly have the shortest time constants, whereas thermal-related effects are associated with slow systems and the biggest time constants.

Reduction of complexity

Looking at entire buildings and their large number of spaces, each containing numerous inter-related effects, the mapping process still leads to a highly complex model. This subsequently translates to a high number and complexity of higher level controllers (ZC, HC). Hence steps for a reduction of complexity are necessary. We propose three-process steps:

- Step 1: before running the generative algorithm, zones/spaces are tested for potential clustering. Zones with similar interactions between control actions are clustered and represented by one zone, e.g. similar device setup, adjacency relationships, utilization (VDI 3813). The control scheme is then generated with a representative element of each cluster.
- Step 2 involves a reduction of graph nodes within the control zones. An extensive number of nodes and edges are initially provided with the physical zone base element. Nodes and edges not connected to any device, sensor or port of an adjacent physical zone are eliminated. Under the assumption that devices always have a device controller the internally used level of devices is discarded. To simplify the graphical representation also the physical zone's inputs and output ports are eliminated. Thus the device controllers and their caused effects captured by sensors show as directly linked. In the graph representation this reduction does not have any limiting physical impact on the control circuits or overall control structure.
- Step 3 reduces the number of low effect cross relations in and between physical zones as well as between zones. As mentioned above, the edge weights of the

effect relationships relate to the adjacency matrix elements A_{ij} ($0 \leq A_{ij} \leq 1$); they represent an estimated magnitude of the induced primary and secondary effects. When propagating an effect through more than one physical zone, their impact magnitude weakens (combined effect = product of edge weights on the path). Some of the secondary cross effects thus will show a relatively low estimated level of impact. In such cases the respective impact can be disregarded for the control structure (connections with $A_{ij} \leq \text{limit}$). In control theory terms, these residual cross effects will then be treated as a disturbance variable.

Example

A floor of an office building serves as an example. Figure 5 shows the floor plan with 18 rooms. 8 offices are oriented towards the north and south respectively, 2 open plan offices extend from the southern to the northern facade. Due to the size and the different external impact the open plan offices are split into two physical zones.

The layout with its setup and employed devices allows a reduction acc. to VDI 3813-1 by clustering into sections, rooms and areas. This leaves 4 room types, the northern and southern offices, the hallway and the open plan office with its two internal zones

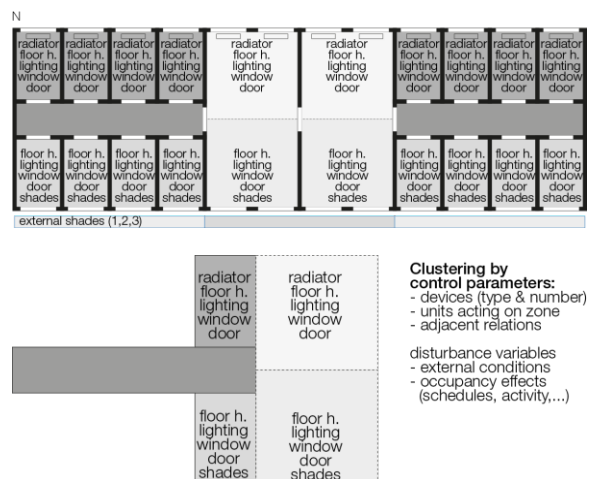


Figure 5: Floor plan

Figure 6 shows the modular structure derived from this room setup with its respective devices. The line width between device controllers and sensors corresponds to the edge weight of the connection, reflecting the extent of the estimated primary and secondary effects.

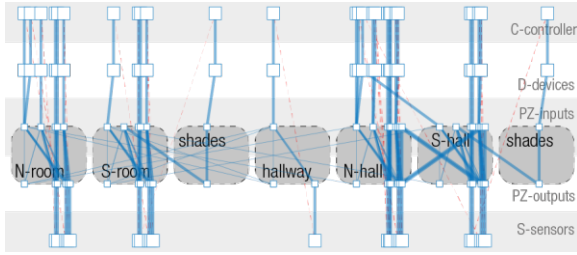


Figure 6: Example zones

Figure 7 (7a) presents the result of the generative algorithm, with the additional layers of zone controllers, high-level and meta controllers.

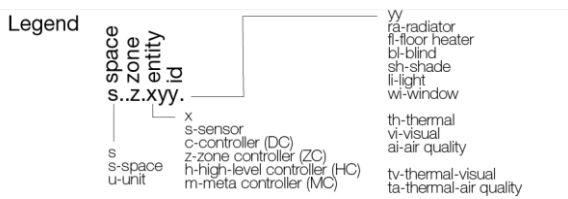


Figure 7a: Legend nodes

DISCUSSION

IFC to control structure

This automatable structural generation process for a hierarchical control scheme is generating the scheme from the IFC data model. The IFC data is parsed for spatial objects, their geometric information (walls, windows, doors, orientation) and data regarding devices and control related objects. With a complete data set (geometry and control elements) the imported data can be processed directly in the control structure generation workflow.

A prototypical software tool performs the automated processing; the modular concept allows to manually alter settings, parametrize (e.g. modify edge weights) or add control circuit entities (zones, devices, sensors, etc.).

The structural control hierarchy scheme does not link to a network topology or hardware concept. Nor does the control scheme or controllers refer to specified types or algorithms but represent a container structure for control semantics.

Connex to simulation

The presented methods integrate into simulation workflow in different ways. Simulations on reduced detail level can provide estimates for primary and secondary effect impact magnitude (Gladt 2014).

In turn the presented method provides an assessment method to qualify control structure parameters by impact ranking (Pareto analysis). By concentrating on control variables with significant impact, the complexity and computational load of control simulations for complete building setups can be reduced. Low-impact control effects can be excluded and treated as disturbance variables.

Especially for complex control algorithms and for simulations with high computational requirements, this approach is a decisive advantage. The resulting control hierarchy and its flexible node definition allows the simulation of hierarchical control structures of complex control algorithms, namely model based, predictive control and multi-objective optimization e.g. economic-, hierarchical and stochastic MPC.

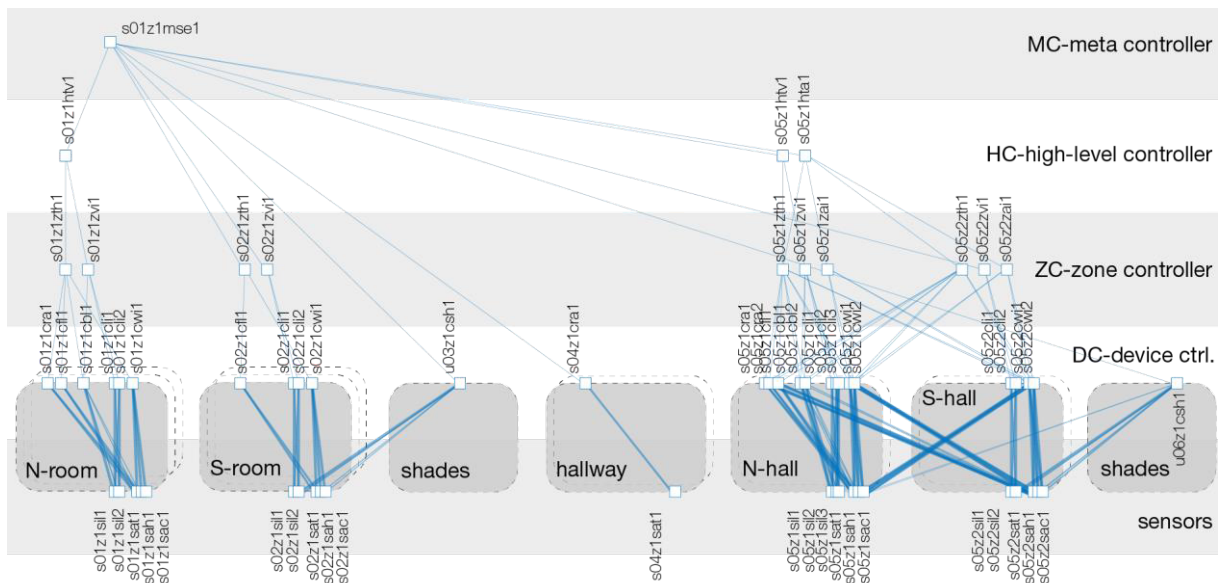


Figure 7: Hierarchical control structure

CONCLUSION

This project introduces an automated process to generate a building control structure. The process is based on a structural mapping of the building, its systems and its manifold physical interactions between control entities, devices and zones. The generation of a hierarchical control scheme is scalable and suitable for automated generation.

The process aligns building physics effects, building systems and controls and links to the BIM concept and IFC data models. The prototypical computer aided planning tool supports the planning and decision process, and the modular and hierarchical structural aspect allows integration into the performance- and optimization simulation workflow.

Continuing work concentrates on linking the control structure model into the domains of simulation, model identification, and support tools for building automation as well as into system engineering and its models.

REFERENCES

- Borrmann A., König M., Koch C., Beetz J. 2015. Building Information Modeling . Springer Verlag, DOI 10.1007/978-3-658-05606-3.
- buildingSMART International Ltd. (2018). IFC Standard. Industry Foundation Classes (IFC). accessed May 2018, www.buildingsmart-tech.org
- Diakite A., Zlatanova S., Li K-J. 2017. About the subdivision of indoor spaces in indoorGML . M. Kalantari, & A. Rajabifard (Eds.), ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (Vol. IV-4/W5, pp. 41-48).
- Dibowski H., Oezluek C., Ploennigs J., Kabitzsch K. 2006. Realizing the Automated Design of Building Automation Systems . 2006 IEEE International Conference on Industrial Informatics.
- DIN IEC 60050-351 2014. International electrotechnical vocabulary – Part 351: Control technology. DIN IEC 60050-351:2013. Berlin, Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN EN ISO 16484 2005. Building automation and control systems (BACS) – Part 3: Functions (ISO 16484-3:2005). Berlin, Deutsches Institut für Normung e. V.
- Geyer P. 2012. Systems modelling for sustainable building design . Advanced Engineering Informatics 26 (2012) 656–668.
- Gladt M. 2014. An algorithm for the automatic reduction of multi-zone models for thermal building simulation . PhD. Thesis, TU-Wien.
- Kabitzsch K. 2015. Automatisierter Entwurf interoperabler Raumautomation nach VDI 3813. Skriptum, accessed August 2017, https://www.inf.tu-dresden.de.
- Kabitzsch K. 2018. Auteras - Automatisierter Entwurf interoperabler Raumautomations-systeme; Tutorial. accessed May 2018, www.auteras.de..
- Mahdavi A., Schuss M., Rader B. 2015. A multi-domain multi-zonal schema for systematic compartmentalisation of building systems control logic . Journal of Information Technology in Construction - ISSN 1874-4753.
- Mertz K.B., Mahdavi A 2003. A Representational Framework For Building Systems Control . Eighth International IBPSA Conference.
- Merz R. M. 2002. Objektorientierte Modellierung thermischen Gebäudeverhaltens . Dissertation, Universität Kaiserslautern.
- Rader B., Mahdavi A. 2015. Usability Assessment of a Generative Building Control Logic Distribution Scheme .eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction - Martens, Mahdavi & Scherer (Eds), ISBN 978-1-138-02710-7.
- Suter G. 2014. Modeling multi-level spaces with network-based space layouts: a case study . G-ICE 2014, Cardiff, UK (16-18, July, 2014) Cardiff University .
- Valdes F., Gentry R., Eastman C., Forrest S. 2016. Applying Systems Modeling Approaches to Building Construction. 33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC 2016.
- VDI 3813, 2011. Building automation and control systems (BACS) - Fundamentals for room control. VDI 3813-part 1. Düsseldorf , Verein Deutscher Ingenieure e.V.
- Wong N.H., Mahdavi A. 2000. Automated Generation of Nodal Representations for Complex Building Geometries . Automation in Construction 10 2000. 141–153.

ENTWICKLUNG KONSISTENTER AUSLEGUNGSMODELLE FÜR OBERFLÄCHENNAHE GEOTHERMISCHE QUELLENSYSTEME

A. Van de Ven¹, R. Koenigsdorff¹ und S. Hofmann¹

Hochschule Biberach, University of Applied Sciences, Institut für Gebäude- und Energiesysteme
Karlstraße 11, 88400 Biberach a. d. Riß, Germany
vandeven@hochschule-bc.de, koenigsdorff@hochschule-bc.de, hofmann@hochschule-bc.de
+49 7351.582-263, +49 7351.582-255, +49 7351.582-267

KURZFASSUNG

Die fehlende Konsistenz vorhandener einfacher Auslegungs- und Simulationsmodelle für unterschiedliche oberflächennahe geothermische Quellensysteme schränkt bislang einen neutralen Vergleich in der Planungspraxis ein. In diesem Beitrag wird ein Vorgehen zur konsistenten Modellbildung für unterschiedliche Quellensysteme beschrieben. Der gegenwärtige Stand und Ergebnisse hierzu werden an den Beispielen von Erdwärmesonden mit signifikantem Grundwassereinfluss und von plattenförmigen Grabenkollektoren dargestellt.

ABSTRACT

The lack of consistency in available simple design and simulation models for different shallow geothermal systems currently limits a neutral comparison during common design processes. This paper describes an approach for consistent modeling of different shallow geothermal closed loop systems. The current state of this approach and results are presented for the cases of borehole heat exchangers influenced by groundwater flow as well as plate-shaped trench collectors.

EINLEITUNG

Grundsätzlich ist es möglich, jedes geothermische Anlagensystem mit Hilfe mehrdimensionaler, dynamischer Modelle (z. B. Finite-Elemente- oder Finite-Volumen-Verfahren) abzubilden und zu simulieren. Für die integrale Planung und Systemsimulation von Gebäuden mit oberflächennahen geothermischen Quellensystemen sind jedoch Modelle erforderlich, die für die breite Planungspraxis tauglich, d. h. nicht zu aufwändig und komplex sind, gleichzeitig aber die notwendige Genauigkeit aufweisen. Beim ökonomi-

schen, energetischen und ökologischen Vergleich verschiedener Systeme untereinander ist dabei vor allem die relative Modellgenauigkeit von Bedeutung, d. h. die korrekte Wiedergabe von Unterschieden zwischen den untersuchten Systemen. Deshalb ist die Verfügbarkeit von konsistenten Modellen wichtig.

Durchgängig konsistente Auslegungs- und einfache Simulationsmodelle für die unterschiedlichen oberflächennahen geothermischen Quellensysteme (Erdwärmesonden, Erdwärmekollektoren usw. unterschiedlicher Bauarten) sind jedoch nicht vorhanden, da ein Großteil der Auslegungsprogramme lediglich in der Lage ist, eines oder wenige unterschiedliche Quellensysteme abzubilden. Für Sondersysteme, wie z. B. spezielle Bauformen von Erdwärmekollekten, sind teilweise keinerlei planungstauglichen Auslegungsprogramme am Markt verfügbar. Außerdem berücksichtigen die existierenden Modelle selten alle thermisch relevanten Effekte. Dadurch wird häufig das ökonomische und energetische Potenzial der oberflächennahen Geothermie nicht voll ausgenutzt und Systemvergleiche bleiben unvollständig bzw. inkonsistent.

ANSATZ FÜR KONSISTENTE MODELLE

Die Auslegung und Simulation von Erdwärmesonden mithilfe einfacher, i. d. R. ganz oder teilweise auf analytischen Ansätzen beruhender Modelle ist im Vergleich zu anderen oberflächennahen geothermischen Quellensystemen gegenwärtig am weitesten fortgeschrittenen. Entsprechende Programme sind in der Planungspraxis weit verbreitet (z. B. EED, EWS, GEO-HAND^{light}). Bei den hierbei zugrundeliegenden Modellen wird unterschieden zwischen dem Wärmetransport im Erdwärmesonden-Bohrloch und dem

Wärmetransport im umgebenden Erdreich, das z. T. in bohrlochnahe und fernere Bereiche unterteilt wird.

Im Bohrloch wird der Wärmetransport bei Erdwärmesonden i. d. R. mit einem Widerstandsmodell beschrieben, welches alle Wärmetransportvorgänge im Bohrloch in einem effektiven Bohrlochwiderstand $R_{b,eff}$ zusammenfasst. Dieser bezieht sich auf die Bohrlochtiefe und hat die Einheit m-K/W. Häufig wird der innere Bereich des geothermischen Quellensystems (Bohrloch) lediglich stationär abgebildet, detailliertere Ansätze berücksichtigen jedoch auch die thermische Trägheit (Koenigsdorff et al., 2016).

Der Wärmetransport im Erdreich um die Erdwärmesonde(n) ist dagegen stets instationär zu betrachten. Ein weit verbreiteter und etablierter Ansatz ist die Verwendung von Sprungantwortfunktionen (*g-functions*). Diese können als Kennlinien aus numerischen Simulationen oder analytischen Lösungen gewonnen werden (Eskilson, 1987).

Die analytischen thermischen Modelle des Erdreichs um Erdwärmesonden basieren grundsätzlich auf Erweiterungen der Lösung für die Temperaturentwicklung um eine momentane punktförmige Wärmequelle in einem unendlich ausgedehnten, homogenen Medium. Durch Integration der Punktquelle über der Zeit können kontinuierliche Wärmequellen abgebildet werden und eine räumliche Integration ermöglicht grundsätzlich die Darstellung beliebiger Geometrien (Linien, Flächen, Volumenkörper usw.). Für oberflächennahe Wärmequellen ist der Übergang vom unendlichen auf einen halbusendlichen Körper erforderlich. Die Erdreichoberfläche wird dabei vereinfacht als adiabate oder isotherme Randbedingung abgebildet, welche z. B. durch eine zur Erdoberfläche spiegelsymmetrische Quelle (Method of image) erreicht wird (Carslaw et al., 2011). Im Falle ausschließlicher Wärmeleitung ohne konvektiven Einfluss durch strömendes Grundwasser wird die Wärmequelle als ruhend betrachtet, während der Einfluss einer Grundwasserströmung durch eine entsprechende Bewegung der Quelle abgebildet werden kann.

Das diesem Beitrag zugrunde liegenden Forschungsprojekt hat zum Ziel, diese Modellierungsmethodik auf eine möglichst große Bandbreite oberflächennaher geothermischer Quellensysteme folgendermaßen anzuwenden:

- Unterteilung des Berechnungsgebietes in grundsätzlich zwei Bereiche: das Quellensystem selbst (Wärmeübertrager ggf. inkl. Einbausituation) und umliegender Untergrund (Erdreich) inklusive des Einflusses der Erdoberfläche.
- Abbildung des Wärmetransports im Quellensystem mit analytischen Widerstandsmodellen und ggf. Kapazitäten.
- Abbildung des Erdreichs mithilfe ggf. superponierter analytischer Lösungen für ruhende bzw. bewegte Wärmequellen im (halb-)unendlichen Medium.
- Soweit relevant, zusätzlich Abbildung von Sondereffekten (z. B. Phasenwechsel, Anbindeleitungen), beispielsweise durch Näherungslösungen.
- Lastzerlegung. Für Auslegungssimulationen ist es i. d. R. hinreichend, den gebäude- bzw. anlagenseitigen Lastverlauf in den folgenden drei Lastfälle zu zerlegen (Koenigsdorff, 2011):
 - I. konstante Grundlast,
 - II. Spitzenlasten,
 - III. periodische Lastanteile.

Die einheitliche Festlegung dieses Vorgehens für alle untersuchten Quellensysteme ermöglicht eine konsistente Modellbildung, was die Voraussetzung für einen Vergleich der unterschiedlichen Quellensysteme ist. Die verwendeten analytischen Modelle und Näherungslösungen werden jeweils mit numerischen Simulationsmodellen in COMSOL Multiphysics® validiert und ggf. erweitert oder korrigiert.

In Folgenden wird hierzu auf erste Ansätze und Ergebnisse am Beispiel von Erdwärmesonden in strömendem Grundwasser sowie an einer Sonderbauart von Erdwärmekollektoren (plattenförmiger Grabenkollektor) eingegangen.

MODELLIERUNG VON ERDWÄRMESONDEN IN EINER GRUNDWASSERSTRÖMUNG

Bewegte unendliche Linienquelle

Analytische Modelle zur Bestimmung der Erdreichtemperatur am Bohrlochrand bei Erdwärmesonden basieren momentan i. d. R. auf der kontinuierlichen, endlichen Linienquelle im halbusendlichen Raum. Dieses Modell berücksichtigt zunächst ausschließlich die Wärmeleitung in einem homogenen Medium (Erdreich) und keine

eventuell vorhandene Grundwasserströmung (Eskilson, 1987).

Die bewegte Linienquelle kann zusätzlich zur Wärmeleitung auch den Einfluss eines einheitlich strömenden Mediums auf die Temperaturentwicklung um eine Wärmequelle berücksichtigen. Sie ist eine Weiterentwicklung der Momentan-Punkt-Wärmequelle, ergänzt um die Strömungsgeschwindigkeit. Hierdurch sind die vorher genannten Voraussetzungen zur konsistenten Modellierung des Wärmetransports im Erdreich erfüllt.

Analytische Lösungen

Die analytische, stationäre Lösung einer kontinuierlichen, unendlichen und bewegten Linienquelle mit konstanter Wärmeleistung, welche dem konstanten Grundlastanteil entspricht (Lastfall I), wurde bereits in (Carslaw et al., 2011) beschrieben und ist wie folgt angegeben:

$$\Delta \mathcal{G} = \frac{\dot{q}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{eff}}} \cdot e^{\frac{Pe}{2} \cdot \cos(\varphi)} \cdot K_0\left(\frac{Pe}{2}\right) \quad (1)$$

Dabei entspricht $\varphi = 0$ der Strömungsrichtung des Grundwassers in der Ebene senkrecht zur Wärmequelle, Pe die Péclet-Zahl, welche das Verhältnis des advektiven (konvektiven) zum diffusiven Wärmetransport beschreibt, und K_0 die modifizierte Besselfunktion zweiter Art. Weiterhin werden im Modell der bewegten Linienquelle die Effektivwerte (als volumetrisch gemittelte Werte) der Erdreieigenschaften für die Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit zur Berechnung der Temperaturänderung im Erdreich herangezogen.

Die zeitabhängige Veränderung der Erdreichtemperatur bei konstanter Wärmeleistung \dot{q} , welche asymptotisch in den stationären Zustand gemäß Gleichung (1) übergeht, ist in (Sutton et al., 2003) mithilfe der verallgemeinerten unvollständigen Gammafunktion Γ bestimmt worden:

$$\Delta \mathcal{G} = \frac{\dot{q}}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{eff}}} \cdot e^{\frac{Pe}{2} \cdot \cos(\varphi)} \cdot \Gamma\left(0, \frac{1}{4 \cdot Fo}; \frac{Pe^2}{16}\right) \quad (2)$$

Diese Sprungantwort in Gleichung (2) errechnet die Temperaturänderung am Bohrlochrand aufgrund einer Spitzenlast (Lastfall II).

In (Zubair et al., 1996) ist die Temperaturantwort einer bewegten, unendlichen Linienquelle für unterschiedliche Belastungsformen analysiert worden. Die quasi-stationäre, analytische Lösung bei einer periodischen Belastung (Lastfall III) der bewegten Linienquelle ist dort wie folgt angegeben:

$$\begin{aligned} \Delta \mathcal{G} = & \frac{\dot{q}}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{eff}}} \cdot e^{\frac{Pe}{2} \cdot \cos(\varphi)} \cdot \left\{ 2 \cdot K_0\left(\frac{Pe}{2}\right) \right. \\ & + a \cdot \cos(\tau_\omega) \cdot C_\Gamma\left(0, 0; \frac{Pe^2}{16}; \frac{\tau_\omega}{4 \cdot Fo}\right) \\ & \left. + a \cdot \sin(\tau_\omega) \cdot S_\Gamma\left(0, 0; \frac{Pe^2}{16}; \frac{\tau_\omega}{4 \cdot Fo}\right) \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

Dabei ist a das Verhältnis der resultierenden periodischen Belastung $\dot{q}_{\text{per,res}}$ zur (konstanten) Grundlast \dot{q} , τ_ω stellt die Periodendauer dar und C_Γ und S_Γ die erweiterte Zerlegungsfunktionen der verallgemeinerten unvollständigen Gammafunktion Γ .

Die analytischen Lösungen für die drei beschriebenen Lastfälle ermöglichen es, mithilfe des Superpositionsprinzips analog zu etablierten Auslegungsverfahren, wie EED, GEO-HAND^{light} usw., alle auslegungsrelevanten Temperaturreaktionen am Bohrlochrand einer Erdwärmesonde mit Grundwassereinfluss zu ermitteln.

Numerische Simulation

Die Überprüfung der analytischen Lösungen und ihrer Anwendbarkeit erfolgt mit COMSOL Multiphysics[®] in zwei Schritten. Im ersten Schritt sind identische Bedingungen wie im analytischen Modell angesetzt, um die analytischen und numerischen Modelle sowie deren Implementierungen gegenseitig zu vergleichen. Die unendliche Linienquelle ist dafür in der numerischen COMSOL-Simulation durch eine endliche Linienquelle abgebildet, welche am oberen und unteren Ende der Quelle von zwei adiabaten Flächen begrenzt ist. Die Rand- und Anfangsbedingungen dieses Modells sind:

- eine konstante Porengeschwindigkeit von $2,31 \cdot 10^{-5}$ m/s in einer Richtung senkrecht zur Linienquelle
- eine feste Temperaturvorgabe $\mathcal{G}_{E,0}$ an den Seitenflächen des Gebiets, die

gleich der Starttemperatur der Simulationen ist

- eine Ausströmbedingung stromabwärts der Linienquelle.

Die hier beschriebenen Lösungen basieren auf analytischen Modelle von Linienquellen in homogenen Medien und können daher keine unterschiedlichen Eigenschaften innerhalb und außerhalb des Bohrlochradius berücksichtigen. Somit vernachlässigen sie eine evtl. abweichende Permeabilität des Verfüllmaterials der Erdwärmesonde. Zur Überprüfung der Eignung des analytischen Modells für die Auslegung von Erdwärmesonden, wird im zweiten Schritt eine Wärmequelle mit einem realen Bohrdurchmesser von 150 mm abgebildet und für den Extremfall eines wasserundurchlässigen Bohrloches untersucht. Hierfür wird die Linienquelle durch eine zylinderförmige Aussparung mit dem Bohrdurchmesser ersetzt und ein Wärmestrom auf die Zylinderwand aufgeprägt (entspricht einer Zylinderquelle ohne thermische Kapazität im Inneren des Zylinders).

Vergleich der Ergebnisse

Ausschlaggebend für die Dimensionierung von Erdwärmesonden ist die Temperaturänderung am Bohrlochrand. Bei Grundwasserströmung liegt jedoch keine radialsymmetrische Verteilung der Temperaturänderung um das Bohrloch herum vor, wie dies bei reiner Wärmeleitung der Fall ist. Daher muss die Temperaturreaktion abhängig vom Winkel φ am Bohrlochrand analysiert werden. Hierbei strömt das Grundwasser in Richtung $\varphi = 0$. Der Winkel $\varphi = \pi/2$ ist somit die Richtung senkrecht zur Grundwasserströmung; das Grundwasser streift also lediglich die Wärmequelle an diesem Punkt.

Im ersten Schritt, dem direkten Vergleich der analytischen und numerischen Berechnungen für identische Bedingungen, werden die drei Lastfälle gemäß den Gleichungen (1), (2) und (3) – stationäre Reaktion auf eine konstante Belastung (I), instationäre Reaktion auf eine konstante Belastung (II) und quasi-stationäre Reaktion bei periodischer Belastung (III) – untersucht. Zum Vergleich dienen die Temperaturänderungen (Temperaturreaktionen) in einem typischen Bohrdurchmesser von $r_b = 0,075$ m um die Linienquelle.

Abbildung (1) enthält die Ergebnisse des stationären Lastfalls I für eine spezifische thermische Belastung von 14,38 W/m. Zum umfassenden

Vergleich wurde die Porosität des Erdreichs bei gleichbleibender Porengeschwindigkeit schrittweise erhöht. Hierdurch steigt die Péclet-Zahl entsprechend an, angefangen bei vollständig ruhendem Medium (reine Wärmeleitung) bis hin zum vollständig bewegten Medium. Die analytischen Ergebnisse nach Gleichung (1) (ILMS: Infinite Moving Line Source) und die numerischen Simulationsergebnisse stimmen sehr gut überein. Tendenziell steigt die relative Abweichung zwischen beiden Modellen mit zunehmender Porosität (zunehmender Péclet-Zahl) an. Allerdings beträgt die absolute Abweichung für alle berechneten Fälle maximal 0,1 K, was für die Praxis als hinreichend genau einzustufen ist.

Für die Winkel $\varphi = \pi/4$ und $\varphi = \pi/2$ nimmt die Temperaturreaktion mit zunehmender Péclet-Zahl, d. h. stärkerer Strömung, kontinuierlich ab. Direkt stromabwärts der Linienquelle ($\varphi = 0$) steigt die Temperaturreaktion jedoch ab einer Péclet-Zahl von ca. 3,5 wieder an. Dieser Anstieg ist darauf zurückzuführen, dass die anfangs noch radialsymmetrische Wärmeausbreitung um die Wärmequelle herum bei ansteigender Porosität und damit Péclet-Zahl Pe immer ellipsenförmiger wird mit einer stromabwärts gerichteten Spitze. Die Filtergeschwindigkeit sowie die Péclet-Zahl nehmen bei gleichbleibender Porengeschwindigkeit aber ansteigender Porosität zu, sodass seitlich der Wärmequelle ($\varphi = \pi/2$) jeweils mehr Wärme abtransportiert wird aufgrund des höheren Grundwasserstroms. Dadurch wird in Summe mehr Wärme konvektiv von der Quelle wegtransportiert. Die Verteilung der Temperaturänderungen am Bohrlochrand wird zunehmend ungleichmäßiger und erreicht ein Maximum direkt in Strömungsrichtung hinter der Wärmequelle.

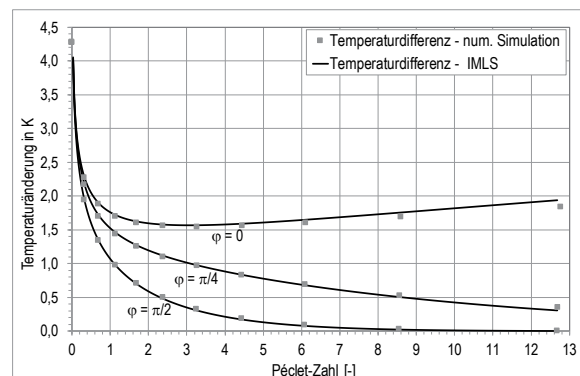


Abbildung 1: Vergleich der Temperaturänderung einer IMLS und der numerischen Simulation im stationären Fall.

Für den Lastfall II der instationären Reaktion auf eine konstante Belastung ist der gleiche spezifische Wärmestrom herangezogen worden wie im vorstehenden stationären Fall. Abbildung 2 zeigt den Vergleich der Temperaturänderung für eine Porosität von 0,3 ($Pe = 1,14$). Wie bereits im stationären Fall ist die Übereinstimmung zwischen der analytischen Lösung nach Gleichung (2) und der numerischen Simulation sehr gut. Die Abweichungen zwischen den Temperaturänderungen liegen im Tausendstel-Grad-Bereich.

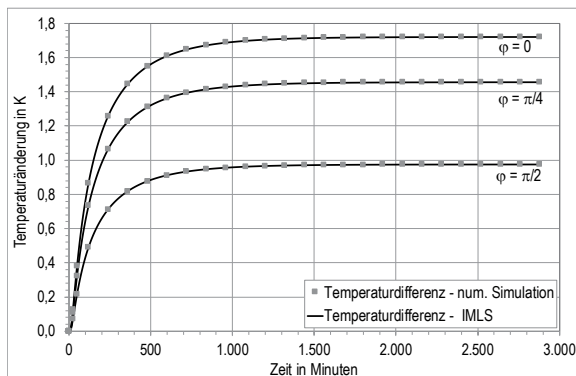


Abbildung 2: Vergleich der instationären Temperaturänderung einer IMLS und der numerischen Simulation als Reaktion auf eine konstante Belastung ($Pe = 1,14$).

Abbildung 3 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperaturänderung bei periodischer Belastung für den quasi-stationären Zustand (Lastfall III). Der konstante Grundlastanteil ist wiederum gleich wie in den beiden vorherigen Fällen ($14,38 \text{ W/m}$), die Porosität mit 0,3 ($Pe = 1,14$) ebenso. Für den Faktor α wurde beispielhaft 0,86 angesetzt. Auch hier liegt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der analytischen Lösung nach Gleichung (3) und der numerischen Simulation vor mit einer Abweichung von maximal 1,0 %. Die absolute Abweichung liegt erst in der dritten Nachkommastelle und ist somit unerheblich.

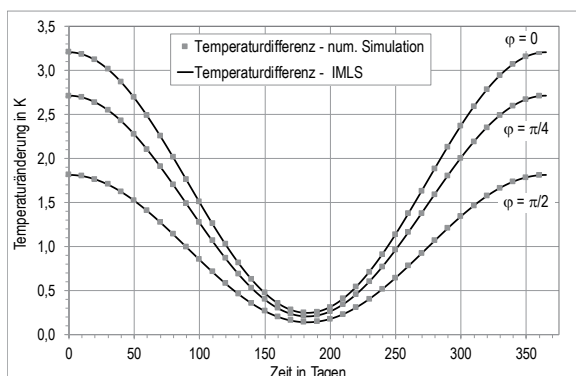


Abbildung 3: Vergleich der Temperaturänderung einer IMLS und der numerischen Simulation mit periodischer Belastung ($Pe = 1,14$).

Damit ist eine hinreichende Übereinstimmung zwischen analytischer und numerischer Lösung für identische Situationen (bewegte Linienquelle bzw. Linienquelle im durchströmten Erdreich) gegeben. Somit ist die numerische Simulation gegen die analytische Lösung und deren Implementierung in Python validiert und stellt die geprüfte Grundlage für Weiterentwicklungen dar.

Die Ergebnisse für eine Linienquelle in einem homogenen, durchströmten Medium bilden die Situation eines Bohrlochs ab, das sich nicht vom umgebenden Erdreich unterscheidet, also genauso durchströmt wird wie das Erdreich. Ordnungsgemäß mit Verfüllmaterial verpresste Bohrlocher sind jedoch hydraulisch nahezu undurchlässig. Deshalb besteht der zweite Schritt der numerischen Simulation in einer entsprechenden Modifikation des Modells und der Ermittlung der Auswirkungen dieser Änderung.

Die numerische Simulation des strömungsundurchlässigen Bohrlochs erfolgte wie oben beschrieben mit einer zylinderförmigen Wärmequelle gleicher Stärke und ebenfalls mit dem Radius $r_b = 0,075 \text{ m}$. Von diesem Modell liegen bis dato Ergebnisse für die stationäre Temperaturreaktion auf eine konstante Belastung vor. Zum Vergleich mit der Linienquelle mit strömungsdurchlässigem Bohrloch wurde die analytische Lösung herangezogen, die mit der entsprechenden numerischen Lösung sehr gut übereinstimmt (siehe Abbildung 1).

Durch diese Änderung in den Modellannahmen treten deutlich größere Abweichungen auf, wie Abbildung 4 entnommen werden kann. Die größte Abweichung zwischen Linienquelle und Zylinderquelle tritt in Strömungsrichtung direkt hinter dem Bohrloch auf. An dieser Stelle ($\varphi = 0$) betragen die Unterschiede zwischen beiden Modellen bis zu mehreren Kelvin. Ebenso sind an den beiden anderen betrachteten Punkten Differenzen von mehreren Zehntel Grad festzustellen. Diese Abweichungen haben (Wagner et al., 2013) ebenfalls nachgewiesen im Rahmen der Erstellung eines analytischen Modells für die Auswertung von Thermal Response Tests für Erdwärmesonden mit signifikanten Grundwassereinfluss. In (Wagner et al., 2013) wird vorgeschlagen, einen Korrekturterm anzuwenden zur Abschwächung des entstandenen Fehlers aufgrund der unterschiedlichen hydraulischen Eigenschaften in und außerhalb der Bohrlochs. Dieser Term wird herangezogen, um die er-

mittlere Filtergeschwindigkeit der Realität anzugleichen. An dieser Stelle besteht noch weiterer Forschungsbedarf um zu überprüfen, ob ein derartiger Korrekturterm auch für die hier in Entwicklung befindlichen Modelle verwendbar ist.

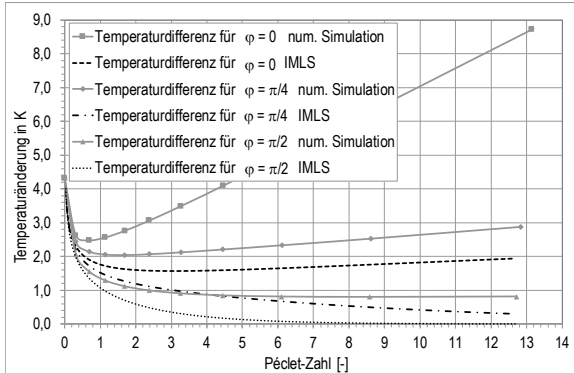


Abbildung 4: Vergleich der Temperaturänderung einer IMLS und eines wasserundurchlässigen Bohrlochs im stationären Fall

PLATTENFÖRMIGE GRABENKOLLEKTOREN

Quellensystem Erdwärmekollektoren

Wie oben beschrieben, stehen für Erdwärmesonden stationäre Bohrlochwiderstandsmodelle für die Wärmeübertragung innerhalb des Bohrlochs inklusive Erweiterungen für das dynamische Verhalten des Bohrlochinneren zur Verfügung (Koenigsdorff et al., 2016). Dagegen sind derartige Ansätze für die verschiedenen Bauarten von Erdwärmekollektoren noch aufzustellen, um in die hier beschriebene, konsistente Modellierungsmethodik integriert werden zu können. Als erstes Beispiel hierzu wurde ein aus einer Polypropylen-Stegplatte bestehender Grabenkollektor ausgewählt, der aus einer Vielzahl laminar durchströmter Kanäle besteht. Jeder Strömungskanal ist 5 mm hoch und maximal 4 mm breit, wobei die seitlichen Wände leicht gekrümmt sind, siehe Abbildung 5. Bei den im Folgenden beschriebenen Untersuchungen wurde Ethylenglykol (25 Vol-%) bei 0 °C als strömendes Wärmeträgerfluid in den Kanälen angenommen.

Wärmeübertragungswiderstand analog zum Bohrlochwiderstand bei Erdwärmesonden

Zur Beschreibung der stationären Wärmeübertragung im Plattenkollektor wird, analog zum Bohrlochwiderstandsmodell, ein Ersatzschaltbild aufgestellt. Da sowohl die Geometrie als auch die Einbausituation der plattenförmigen Grabenkollektoren einfach sind, ergibt sich ein ebenso

einfaches Widerstandsmodell. Der Wärmetransport vom Fluid in den Strömungskanälen bis zur Plattenaußenoberfläche setzt sich zusammen aus dem konvektiven Wärmeübergang zwischen dem Fluid und der Kanalinnenwand sowie aus der Wärmeleitung durch die Polypropylenplatte und der Wechselwirkung zwischen benachbarten Kanälen in der Platte. Die ersten beiden Vorgänge sind thermisch hintereinandergeschaltet, sodass sich aus der Reihenschaltung des konvektiven Widerstands R_α und des Wärmeleitungswiderstands R_{pp} der Gesamtwiderstand eines einzelnen Kollektorelements 1R_p ergibt, wie in Abbildung 5 dargestellt.

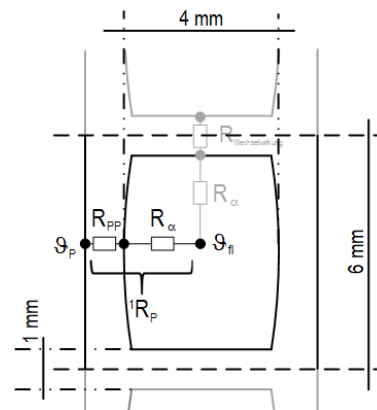


Abbildung 5: Aufbau des Plattenwiderstandes eines mittleren Elements 1R_p des plattenförmigen Grabenkollektors.

Da der Kollektor gleichmäßig durchströmt wird, herrscht in jedem Kanal ungefähr die gleiche Fluidtemperatur. Somit kann die Wechselwirkung zwischen den Kanälen vernachlässigt werden. Die gestrichelten Linien in Abbildung 5 können daher als adiabatisch angenommen werden, was eine Parallelschaltung der einzelnen Widerstände 1R_p über die gesamte Höhe des Kollektors ermöglicht. Mit diesem Widerstandsmodell kann die mittlere Temperatur an der Außenwand der Platte bei vorgegebenem Wärmestrom berechnet werden. Hierfür ist analog zu Erdwärmesonden die Fluidmitteltemperatur ϑ_{fl} zwischen Ein- und Austritt des Kollektors heranzuziehen.

Analytische Berechnung

Mithilfe einer Vereinfachung der Geometrie kann der Gesamtwiderstand analytisch abgeschätzt werden. Diese analytische Berechnung vernachlässigt die Kanäle in der Kollektorplatte. D. h. der Kollektor wird als zwei vertikale Polypropylenplatten abgebildet, deren Zwischenraum vollständig durchströmt wird ohne Zwischenstege alle 5 mm.

Der Widerstand R_{PP} wird vereinfacht als Wärmeleitwiderstand einer ebenen Wand mit der mittleren Wandstärke des Materials bestimmt und ergibt sich zu $0,00568 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. Der konvektive Widerstand R_α ist der Kehrwert des Wärmeübergangskoeffizienten α_{conv} , der bei den Nennbetriebsbedingungen der Kollektorplatte $368,46 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ beträgt. Daraus resultiert der analytisch ermittelte Gesamtwiderstand 1R_p des Grabenkollektors zu $0,0084 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ bezogen auf die Außenoberfläche und zu $0,00420 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ bezogen auf die Einbaufläche.

Numerische Simulation

Der Plattenwiderstand eines einzelnen Kanals 1R_p wurde für ein mittleres Element sowie für den Randbereich mittels numerischer Simulation mit folgenden Randbedingungen bestimmt:

- die an das nächste Element grenzenden Flächen (oben und unten) sind adiabatisch
- eine konstante Temperatur an den Kollektorwandaußenflächen \mathcal{G}_p (links und rechts)
- eine Randbedingung dritter Art innerhalb des Kanals für eine feste Fluidtemperatur \mathcal{G}_f und den analytisch bestimmten Wärmeübergangskoeffizient α_{conv} .

Die Simulationsergebnisse bei einem Kelvin Temperaturunterschied zeigen eine symmetrische Temperaturverteilung und nahezu parallel zur Außenfläche verlaufenden Isothermen (Abbildung 6) sowie dementsprechend senkrecht dazu verlaufenden Wärmestromdichten (Abbildung 7).

Der aus allen Elementen sich addierende gesamte Wärmestrom einer Kollektorplatte mit 1,2 m Höhe und 7 m Länge beträgt 1959,14 W. Hierbei wurden neben den mittleren Elementen gemäß Abbildung 5 auch Randelemente oben und unten berücksichtigt. Die Wärmeübertragung erfolgt dabei nach beiden Seiten hin und in geringem Umfang über die Stirnseiten oben und unten, sodass die gesamte wärmeübertragende Oberfläche also etwas mehr als doppelt so groß ist als die Einbaufläche ($7 \text{ m} \cdot 1,2 \text{ m} = 8,4 \text{ m}^2$). Bezogen auf die als Bezugsfläche dienende Einbaufläche ergibt sich der ein Gesamtwiderstand 1R_p von $0,00429 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

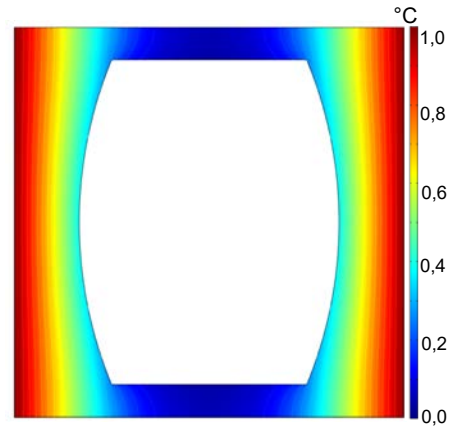


Abbildung 6: Temperaturverteilung in einem mittleren Element aufgrund einer Temperaturdifferenz von einem Kelvin.

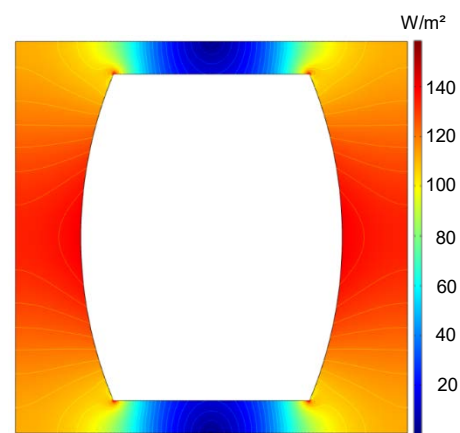


Abbildung 7: Wärmestromdichten in einem mittleren Element aufgrund einer Temperaturdifferenz von einem Kelvin.

Vergleich der Ergebnisse

Der Widerstand 1R_p fällt nach der analytischen Berechnung ca. 2 % kleiner aus als nach der numerischen Simulation. Da die numerische Simulation die Geometrie korrekt abbildet, ist diese genauer, d. h. die analytische Berechnung überschätzt den übertragenen Wärmestrom geringfügig. Grund hierfür sind die Zwischenstege, die wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit des Plattenmaterials von $0,22 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ die Wärmeübertragung mehr behindern als sie diese durch die vergrößerte Kontaktfläche zum Fluid verstärken. Wegen der geringen Abweichung kann für Auslegungsberechnungen trotzdem die analytische Berechnung von 1R_p herangezogen werden, z. B. versehen mit einem Sicherheitsabschlag (z. B. 2 – 5 %).

Die Modellierung der Wärmeübertragung in diesem speziellen Quellsystem ist damit abgeschlossen. Im Weiteren sind – analog zu Erdwärmesonden – vereinfachte Modelle der Wärmeübertragung im Erdreich zu erstellen.

Hierfür kann ausgehend von der Punktquelle eine Flächenquelle gebildet werden. Zusätzlich ist dann noch der Phasenwechsel (Eisbildung) im Erdreich in die Modellsystematik zu integrieren.

ZUSAMMENFASSUNG

Zur ökonomischen, energetischen und ökologischen Qualitätssteigerung in der Planungspraxis von oberflächennahen geothermischen Quellsystemen sind einfache und konsistente Auslegungsmodelle als Teil integraler Planung und Systemsimulation von Gebäuden unabdingbar. Daher ist in diesem Beitrag eine Methodik angewandt worden, die eine konsistente Modellbildung verschiedener Quellsysteme erlaubt. Diese unterscheidet zwischen der Wärmeübertragung innerhalb des Quellsystems und der Wärmeübertragung im Erdreich, welche ggf. um Näherungslösungen zur Berücksichtigung von Sondereffekten (z. B. Phasenwechsel, Anbindeleitungen usw.) zu erweitern sind. Außerdem wird die Erdreichbelastung (Wärmeeintrag oder -entzug) zerlegt in die Anteile Grund- und Spitzenlast sowie periodischer Anteil.

Die analytische Modellierung der Wärmeübertragung im Erdreich basiert auf Erweiterungen der momentanen Punkt-Wärmequelle. Als Weiterentwicklung des bisherigen reinen Wärmeleitungsmodells für Erdwärmesonden (endliche Linienquelle) wurde die unendliche, bewegte Linienquelle zur Berücksichtigung einer Grundwasserströmung für die drei o. g. Lastanteile untersucht. Die Ergebnisse der analytischen Ansätze und einer numerischen Modellierung stimmen gut überein. Jedoch zeigt sich weiterer Entwicklungsbedarf zur Berücksichtigung der unterschiedlichen hydraulischen Eigenschaften im Bohrloch und im Erdreich.

Die Wärmeübertragung im Quellsystem wird mit Widerstandsmodellen beschrieben. Diese bei Erdwärmesonden etablierte Methodik wurde beispielhaft auf einen plattenförmigen Grabenkollektor übertragen und dafür eine analytische Näherungsberechnung numerisch validiert.

DANKSAGUNG

Das diesem Beitrag zugrundeliegende Verbundvorhaben „Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden II“ mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET1386B gefördert. Die Autoren

danken dem Mittelgeber für die Unterstützung und dem Projektträger Jülich (PTJ) für die Betreuung des Vorhabens.

LITERATUR

- Carslaw, H.S., Jaeger, J.C. 2011. *Conduction of heat in solids*, 2. ed., reprinted, Clarendon Press, Oxford Great Britain.
- Eskilson, P. 1987. *Thermal analysis of heat extraction boreholes*, Dissertation, University of Lund Sweden.
- Koenigsdorff, R. 2011. *Oberflächennahe Geothermie für Gebäude. Grundlagen und Anwendungen zukunftsfähiger Heizung und Kühlung*, Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart Germany.
- Koenigsdorff, R., Feuerstein, P., Van de Ven, A. 2016. Anwendung und Adaption von an Erdwärmesonden in situ gemessenen Parametern in Auslegungsberechnungen sowie zugehörigen Berechnungs- und Simulationsprogrammen. Teilbericht AP 4 im Abschlussbericht zum LFZG-Verbundvorhaben „Nachhaltige Nutzung von Erdwärmesonden“, Okt. 2016, <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de>, 14.08.2018.
- Schramek, E.-R. (Hrsg.). 2003. *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. Einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik*, 71. Auflage. Oldenbourg, München Germany.
- Sutton, M.G., Nutter, D.W., Couvillion R.J. 2003. A ground resistance for vertical bore heat exchangers with groundwater flow, *Journal of energy resources technology* 125 (09.2003), pp. 183-189, the american society of mechanical engineers, New York USA.
- VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (Hrsg.). 2013. *VDI-Wärmeatlas*, 11. Auflage, Springer Vieweg, Berlin Germany.
- Wagner, V., Blum, P., Kübert, M., Bayer, P. 2013. Analytical approach to groundwater-influenced thermal response tests of grouted borehole heat exchangers, *Geothermics* 46 (2013), pp. 22-31, Elsevier Verlag, München Germany.
- Zubair, S.M., Chaudry, M.A. 1996. Temperature solutions due to time-dependent moving-line-heat sources, *Heat and Mass Transfer* 31 (1996), pp. 185-189, Springer-Verlag, Berlin Germany.

AUTOMATISIERTE DATENAGGREGATION ZUR EINBINDUNG EINER DYNAMISCHEN GEBÄUDESIMULATION IN EIN GEOINFORMATIONSSYSTEM

S. Weck-Ponten¹, R. Becker², S. Herle², J. Blankenbach², J. Frisch¹ und C. v. Treeck¹

¹ Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen - E3D, RWTH Aachen University

² Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme, RWTH Aachen University

KURZFASSUNG

Auf Stadtquartierebene liegt oft eine sehr geringe Informationsdichte bezüglich Energieverbrauchsdaten, Baujahresdaten oder anderen bauphysikalischen Eigenschaften vor. Eine automatisierte Datenaggregation und -anreicherung hilft dieser Informationsknappheit zu begegnen und somit die Wärmebedarfsvorhersagen und die Planung von Energiesystemen zu verbessern. Die Untersuchung umfasst den ganzheitlichen Simulationsprozess von der Datenaggregation und Darstellung in einem Web-basierten Geoportal über die Umrechnung der vorhandenen Gebäudedaten und die Kopplung an ein Simulationsprogramm bis hin zur Berechnung von Simulationsergebnissen und deren Rückgabe an das Geoportal. Die Kernthemen des Papers sind die Berechnungen und Schätzungen nicht flächendeckend vorhandener Daten auf Gebäude- und Stadtquartierebene, die Umrechnung von vorhandenen Daten in die vom Simulationsprogramm angeforderten Eingangsparameter sowie deren Einflüsse auf die Ergebnisse.

ABSTRACT

At city district level, there is often a sparse information density with regard to energy consumption values, year of construction data or other physical building properties. An automated data aggregation and enrichment helps to address this lack of information and thus improve heat demand forecasts and energy system planning. The investigation includes the holistic simulation process from data aggregation and illustration in a web-based geoportal over the calculation of building data and coupling to the simulation process up to the return of results. The main topics are the calculation and estimation of non-nation-wide existent data on the scale of buildings and

city quarters, it's conversion to simulation input parameters and their influences on simulation results.

EINLEITUNG

Um die Energiewende voranzubringen und auch die Sektorkopplung und den Wärmesektor verstärkt einzubinden, wird eine Diversität im Wärmeenergieportfolio benötigt. Oberflächennahe geothermische Anlagen sind in der Lage Gebäudeheiz- und Kühllasten monovalent zu decken und Energie saisonal im Erdboden zu speichern. Allein Nordrhein-Westfalen (NRW) verfügt über ein technisch nutzbares Potenzial an oberflächennaher Geothermie für einen Deckungsanteil von bis zu 57 % des Wärmebedarfs (Bracke et al., 2015). Momentan gibt es in der Praxis Unsicherheiten bei der Planung, bei Genehmigungsverfahren und beim Betrieb größerer Systeme, u. a. wegen einer Informationsknappheit im Gebäudequartierssektor und der errechneten Wärmebedarfe. Aufgrund dieser geringen Informationsdichte des Gebäudesektors ist eine automatisierte Datenaggregation für den dynamischen Gebäudesimulationsprozess essenziell.

KONZEPT

Für eine bessere Datenaggregation und Bereitstellung von relevanten Informationen wird ein geothermisches Informationssystem (GeTIS) entwickelt, welches über eine dynamische Verknüpfung mit zeitlich veränderlichen Daten (u. a. zur Geologie, Hydrologie und zu Gebäuden) und eine bidirektionale dynamische Kopplung von Gebäude- und Untergrundsimulationen die Auslegung oberflächennaher geothermischer Anlagen optimieren und die Planungssicherheit, Vorhersagegenauigkeit und Genehmigungsprozesse verbessern soll (Fichter et al., 2017). Die

für den Simulationsprozess notwendigen Informationen werden möglichst über standardisierte Webdienste eingebunden. Die Verknüpfung von geometrischen und semantischen Gebäudedaten mit einem Geoportal und der Gebäudesimulation wird im Folgenden näher betrachtet.

ANFORDERUNGEN DER GEBÄUDESIMULATION AN DAS PLANUNGSTOOL

Für die Aggregation, Bündelung und Darstellung von Gebäude- und Quartiersdaten sowie eine fehlerfreie Datenübertragung sind einige Anforderungen der dynamischen Gebäudesimulation an das Planungstool zu erfüllen. Als Grundlage dient eine Datenbank zur Bereitstellung und Speicherung von Eingangs- und Ergebnisdaten (u. a. geometrische und semantische Gebäudeinformationen). Für die Datenanbindung und -übertragung sowie Steuerung der Simulationsprozesse muss eine geeignete interaktive Benutzeroberfläche samt Schnittstellen vorhanden sein.

DIE NUTZEROBERFLÄCHE

Als Benutzeroberfläche des geothermischen Informationssystems dient ein Web-basiertes Geoportal (Abbildung 1).

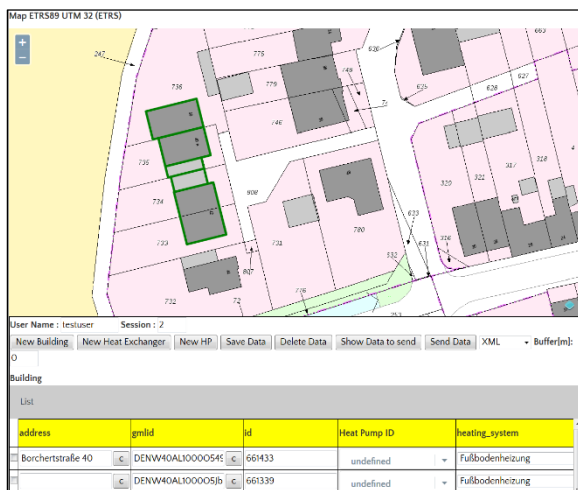


Abbildung 1: Ausschnitt des Geoportals – Aktueller Stand

Eine wesentliche Funktion des Geoportals bildet der Teil der Benutzeroberfläche, in dem die mittels einer Auswahlfunktion in der Kartenvisualisierung markierten Gebäude inklusive aller für die dynamische Gebäudesimulation notwendigen Eingangsparameter aufgelistet und vom Nutzer gegebenenfalls angepasst werden können. Das Geoportal basiert auf Technologien wie HTML5 und JavaScript sowie Softwarebibliotheken zum Web Mapping.

Im Geoportal erfolgen die Eingaben der Nutzer anhand von vorhandenen Daten sowie die Darstellung der Ergebnisse der Prozesse. Die vorhandenen Daten werden vielfach von Institutionen der Bundesländer, im konkreten Fall NRW, erfasst, gepflegt und durch Geodienste bereitgestellt. Mithilfe von Nutzeranfragen werden die Daten direkt vom Datenanbieter (z. B. Geologischer Dienst) aggregiert. Im World Wide Web haben sich hierfür die Standards der Open Web Services (OWS) des Open Geospatial Consortiums (OGC) etabliert. Zur Visualisierung von Geodaten dient der Web Map Service (WMS). Mit ihm lassen sich aktuelle wie auch historische (topografische) Karten und Luftbilder von den für Geobasisinformationen zuständigen Behörden integrieren und im Geoportal visualisieren. Die Luftbilder und historischen Daten geben zusätzliche Hinweise auf z. B. die Gebäudebaujahre. Unter Nutzung des GetFeatureInfo-Request des WMS lassen sich im Geoportal auf Mausklick seitens des Datenanbieters vorkonfigurierte semantische Informationen (z. B. zu den betroffenen Flurstücken) abrufen.

Der Web Feature Service (WFS) stellt sowohl geometrische als auch semantische Objektinformationen zur Weiterverarbeitung bereit. Die Objekte können anhand ihrer Geometrie im Geoportal visualisiert und ihre semantischen Informationen (z. B. Adressinformationen) durch Auswahl in der Geoportaloberfläche abgerufen werden.

Seitens der Datenanbieter werden bisher nicht alle notwendigen Informationen durch OWS angeboten. Dies gilt u. a. für die Gebäudedaten der 3D-Gebäudemodelle, die eine wesentliche Grundlage für die Bestimmung der für die späteren Prozesse notwendigen Eingangsdaten darstellen. Die Gebäudemodelle wurden von den Servern des Landes in der aktuellsten Version heruntergeladen und derzeit in einer eigenen PostgreSQL-Datenbank inklusive der für die Geometrie notwendigen Erweiterung PostGIS persistiert. Die 3D-Gebäudemodelle können im zur Verfügung stehenden Detaillierungsgrad 2 (engl.: Level of Detail, LoD2) entsprechend des zugrundeliegenden CityGML-Beschreibungsformats des OGC neben der oberirdischen Oberflächengeometrie des Baukörpers auch semantische Informationen zur Gebäudefunktion, zur Dachform, zur Anzahl der ober- und unterirdischen Geschosse oder zum Baujahr enthalten. Die Gebäudefunktion wird auf Grundlage des Amtlichen Liegenschaftskataster-Informationssystems

(ALKIS) ermittelt. Die Attribute sind bis auf die Gebäudefunktion und Dachform in den zur Verfügung stehenden Daten NRWs nicht gefüllt, so dass die benötigten Informationen unter Zuhilfenahme anderer Informationen ermittelt bzw. abgeschätzt werden müssen. Die Abschätzungs- und Berechnungsansätze für die Eingangsparameter der energetischen Gebäudesimulation werden im Abschnitt „Dynamische Gebäudesimulation“ näher erläutert.

Alle abgeleiteten bzw. nutzerseitig korrigierten oder ergänzten Daten (z. B. Baujahr oder Nettogrundfläche) werden nutzerbezogen zur späteren Wiederverwendung in einer Datenbank abgelegt. So kann durch Kombination der verschiedenen Informationsgrundlagen die Datendichte gerade im städtischen Bereich, z. B. durch Informationen aus Bebauungsplänen, für einzelne Stadtquartiere erhöht werden.

ANBINDUNG DER GEBÄUDESIMULATION AN DAS GEOPORTAL

In Abbildung 2 ist der Kopplungsprozess des Geoportals mit der Gebäudesimulation dargestellt. In verschiedenen kartographischen Darstellungen topografischer Karten werden im Geoportal Gebäude ausgewählt oder neue hinzugefügt. Layerinformationen (u. a. zu Wasserschutzgebieten), die Restriktionen oder Ausschlusskriterien für eine geothermische Nutzung beinhalten, können mit Hilfe des WMS eingblendet werden. Die Gebäude- und Simulationsdaten der ausgewählten Objekte werden in Tabellenform angezeigt und können nutzerseitig geändert werden. Nach erfolgter Eingabe der notwendigen Parameter wird die energetische Gebäudesimulation gestartet. Anschließend erhält der Nutzer eine Nachricht, dass die Ergebnisse im Geoportal abrufbar sind.

Zur Übermittlung der Daten aus dem Geoportal an die angebundene Gebäudesimulation wird der standardisierte Web Processing Service (WPS) des OGC genutzt. Der WPS ermöglicht das Ausführen beliebiger Prozesse durch den Nutzer über das Hypertext Transfer Protocol (HTTP). Dazu werden im WPS-Interface Methoden implementiert, die Parameter in einem XML-Encoding an den Server per POST-Request übermitteln. Mit dem Execute-Request werden so Eingabeparameter an den WPS übertragen, der den Simulationsprozess auf dem Server startet. Dies kann synchron oder asynchron erfolgen. Da im Betrieb

des Geoportals Prozessierungsanfragen verschiedener Nutzer zur gleichen Zeit zu erwarten sind, ist ein Konzept zur Lastenverteilung und zur optimierten Prozessierung sinnvoll. Dazu wird eine verteilte und skalierbare Architektur angestrebt, um zum einen die Prozessierung von Anfragen laufzeiteffizient abwickeln und zum anderen modular auf Änderungen der Modelle und Simulationen reagieren zu können. Ersteres umfasst dabei die Zuschaltung von redundanten Prozessierungsentitäten je nach Lastaufkommen. Die Modularität wird gewährleistet, indem der eigentliche Dienst in mehrere Mikroprozesse aufgeteilt wird. Somit repräsentiert der WPS-Dienst eine Reihe von hintereinandergeschalteten Diensten. Nach außen ist hingegen nur ein Dienst sichtbar.

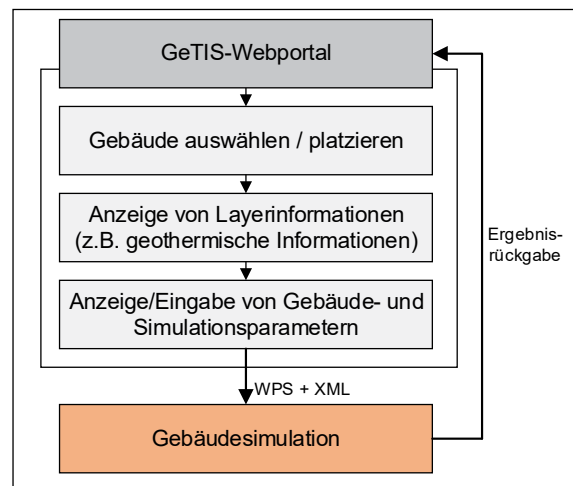


Abbildung 2: Kopplungsprozess des Geoportals mit der Gebäudesimulation

Wenn die Gebäudesimulation mit entsprechendem XML-Eingabedokument über die WPS-Schnittstelle angefragt wird, wird die Anfrage gemäß der optimalen Lastenverteilung an einen freien Server verteilt und die Simulationssoftware gestartet. Ein bidirektionaler Kommunikationsmechanismus zwischen dem Prozessierungsserver, dem WPS-Server und den Simulationsmodellen dient zur Übertragung von Zwischen- und Endergebnissen.

Die Schnittstelle zur Datenübertragung zwischen Geoportal und den Simulatoren ist mithilfe eines entwickelten XML-Schemas realisiert, welches durch eine entsprechende XML-Schemadatei (XSD) validiert werden kann. Das Dokument weist Unterstrukturen für angebundene Gebäude, Sonden oder Wärmepumpen sowie für geologische, Wetter- und Simulationsprozessdaten auf.

DYNAMISCHE GEBÄUDESIMULATION

Die für das Projekt GeTIS benötigten Heizwärmebedarfe der Gebäude werden mithilfe der quelloffenen Software „Tool for Energy Analysis and Simulation for Efficient Retrofit“ (TEASER) berechnet. TEASER eignet sich für die Datenanreicherung dynamischer Gebäudesimulationsmodelle mit einer geringen Informationsdichte auf Skalen von Einzelgebäuden bis hin zu Stadtquartieren. Dabei wird ein Gebäudemodell geringer Ordnung anhand von wenigen Eingangsparametern (u. a. zum Gebäudetyp, Baujahr und zur Gebäudegeometrie) im Modelica-konformen Textformat erzeugt. Die generierten Modelica-Modelle werden in der grafischen Entwicklungsumgebung Dymola simuliert und konsolenbasiert gestartet. Die Zeitschrittweite beträgt in der Regel eine Stunde. Auf Grundlage von stündlich aufgelösten Wetterdaten und internen Lasten werden Heizwärmelastkurven von Gebäuden und Quartieren berechnet. Einige Tests und Anwendungsversuche wurden durchgeführt und zeigten plausible Ergebnisse. Die auf den Median bezogene mittlere prozentuale Abweichung des Heizwärmebedarfs zu Messwerten eines Beispielquartiers beträgt 14,4 % (Müller et al., 2015) und bezogen auf die Nettogrundfläche in einem anderen Quartier 5,6 % (Remmen et al., 2018).

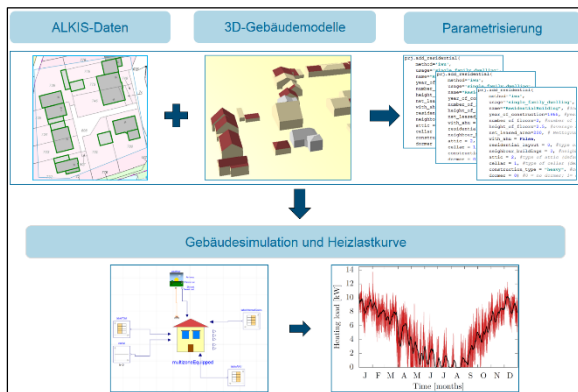


Abbildung 3: Simulationsprozess

Die für die Gebäudesimulation notwendigen Eingangsdaten werden im Geoportal aus den verschiedenen Datenquellen (siehe Abschnitt „Nutzeroberfläche“ und Abbildung 3) aggregiert, im standardisierten XML-Format über einen WPS an die Simulationssoftware übergeben und mithilfe eines in der Programmiersprache Python geschriebenen Parsers importiert.

Mithilfe von Parameterstudien der TEASER-Version 0.5.0 konnten die Gebäudesimulationsparameter (englische Bezeichnungen aus dem

Simulationsprogramm) für Wohn- (WG) und Nichtwohngebäude (NWG) mit dem größten Einfluss auf den Heizwärmebedarf identifiziert werden (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2).

Tabelle 1: Rangliste für Wohngebäude

Rang	Parameter
1	year_of_construction
2	neighbour_building
3	construction_type
4	weather
5	number_of_floors
6	net_leased_area
7	height_of_floors
8	attic
9	cellar
10	residential_layout
11	dormer
12	with_ahu

Tabelle 2: Rangliste für Nichtwohngebäude

Rang	Parameter
1	year_of_construction
2	window_layout
3	number_of_floors
4	weather
5	net_leased_area
6	height_of_floors
7	construction_type
8	office_layout
9	with_ahu

Das Baujahr (*year_of_construction*) ist einerseits sowohl bei WG als auch bei NWG der signifikanteste Parameter, da von ihm die bauphysikalischen Eigenschaften des Gebäudes stark abhängen, andererseits hat das Baujahr auf Gebäudequartiersebene eine flächendeckend sehr geringe Informationsdichte. Zur Ermittlung des Baujahres können die mittels WMS angebotenen Kartendaten historischer Luftbilder und topografischer Karten, im Geoportal verlinkte Bebauungspläne und Portale der zuständigen Behörden sowie Zensus-Daten der letzten Zensus-Erhebung „Zensus 2011“ herangezogen werden. Die zehnjährliche europaweite Volks-, Gebäude- und Wohnungszählung (Zensus) liefert Gebäudedaten, speziell das Baujahr, die für das Projektgebiet verfügbar und in eigenen Datenbanken persistiert sind, sodass sie mittels OWS im Geoportal visualisiert bzw. zur Erstabschätzung des

Baujahres genutzt werden können. Die Baujahre werden, um den Datenschutz und die informelle Selbstbestimmung zu gewährleisten, nicht gebäude- und baujahrscharf erfasst, sondern durch sogenannte Mikrozensusklassen, in denen jeweils mehrere (meist zehn) Baujahre in einer Gitterzelle von 100 mal 100m zusammengefasst sind (Zensus, 2016). Bei der automatisierten Ermittlung des Baujahres eines ausgewählten Gebäudes wird in erster Priorität der Median der zugehörigen Mikrozensusklassen genutzt. Diese Schätzung kann nutzerseitig geändert oder anhand weiterer zur rein visuellen Auswertung bereitgestellten Informationen (Luftbilder, Bebauungspläne etc.) angepasst werden.

Die Anzahl direkter Nachbargebäude, die Bau schwere, die verwendeten Wetterdaten, die Geschossanzahl und die Nettogrundfläche sowie die lichte Raumhöhe beeinflussen das Gebäudemodell eines Wohngebäudes in absteigender Reihenfolge unterschiedlich stark.

Der Parameter *height_of_floors* ist in TEASER einerseits als Geschosshöhe implementiert (vgl. die Python-Pakete *building.py* oder *citygml_input.py*), indem bei bekannter Geschossanzahl die Gebäudehöhe (*bldg_height*) durch erstere dividiert wird und andererseits als lichte Raumhöhe, die für die Luftvolumenberechnung (vgl. *set_volume_zone* in der *thermalzone.py*) herangezogen wird. Für den Parameter (*net_leased_area*) gilt ähnliches. Dieser ist teilweise als Bruttogrundfläche (vgl. *set_gml_attributes* in *buildings.py*) und als Nettogrundfläche implementiert (vgl. *set_volume_zone* in der *thermalzone.py* und *office.py*). Für die Datenanreicherung in GeTIS wird deswegen *height_of_floors* als die lichte Raumhöhe und *net_leased_area* als die Nettogrundfläche (NGF) in Anlehnung an die Nutzfläche nach der Energieeinsparverordnung (EnEV) angenommen.

Weitere Parameter mit weniger starkem Einfluss sind Informationen zu der Dach- und Kellerbeheizung, der Kompaktheit, zu Dachgauben und das Vorhandensein einer Lüftungsanlage.

Bei NWG hat das Fassadenlayout, also die Anordnung der Fenster und der Fensterflächenanteil an der Fassade, nach dem Baujahr den größten Einfluss, gefolgt von der Geschossanzahl, den verwendeten Wetterdatensätzen, der Nettogrundfläche, der lichten Raumhöhe und der Bau schwere. Die Kompaktheit und das Vorhanden-

sein einer Lüftungsanlage haben in den Testbeispielen kaum Einfluss auf den Heizwärmebedarf von NWG.

Die prozentualen Veränderungen des Heizwärmebedarfs zum vorherigen Wert ausgewählter Parameter werden in den Abbildung 4 und Abbildung 5 genauer dargestellt. Anhand von zwei Beispielgebäuden (ein WG und NWG im Projektgebiet) wurde der ausgewählte Parameter geändert, während die anderen unverändert blieben. Das WG ist als Einfamilienhaus (EFH) und das NWG als Bürogebäude ausgeführt. Der jeweils helle Balken in den Diagrammen beschreibt die Einstellung des Beispielgebäudes.

Für die Geschossanzahl (*number_of_floors*) der WG sinkt der Heizwärmebedarf von einem auf zwei Geschosse ab und steigt dann stetig an. Die prozentuale Änderung weist ein Maximum bei sechs Geschossen auf. Grund dafür könnte das sich ändernde Verhältnis der wärmeübertragenden Hüllfläche zu dem beheizten Gebäudevolumen (A/V-Verhältnis) sein. Aufgrund des Gebäudetyps (EFH) sind mehr als drei Geschosse untypisch. Bei NWG sinkt der Heizwärmebedarf mit steigender Geschossanzahl und die prozentualen Abnahmen laufen gegen einen Grenzwert.

Das Baujahr (*year_of_construction*) von WG und NWG weist klare Baualterstufen mit abnehmendem Heizwärmebedarf hin zu moderneren Gebäuden auf. Die NGF (*net_leased_area*) und die lichte Raumhöhe (*height_of_floors*) zeigen bei WG als auch bei NWG lineares Verhalten auf.

Die Anzahl der Nachbargebäude (*neighbour_buildings*) existiert als Parameter nur bei WG. Der Heizwärmebedarf sinkt im Vergleich zu einem freistehenden Gebäude bei einem Nachbargebäude um zehn und bei zwei um zwölf Prozent. Der Parameter Fassadentyp (*window_layout*) existiert nur für NWG. Der Heizwärmebedarf steigt hier mit steigendem Fensterflächenanteil an. Der Fassadentyp „BMVBS“ ist die Standardeinstellung in TEASER.

Durch die Wahl anderen Zeitreihendatensätze (Extremwetterdatensatz, etc.) der Wetterdatei ergeben sich prozentuale Änderungen bei WG bezogen auf die Jahreswerte von 2010 von $\pm 6\%$ im aktuellen Datensatz und -11% , -15% und -8% bei den zukünftigen Wetterdaten von 2035. Für NWG ist der Wetterdateneinfluss ähnlich.



Abbildung 4: Parametereinflüsse auf den über ein Jahr integrierten Heizwärmebedarf für ein Wohngebäude

Sind die Parametereinflüsse bekannt, kann der Detailgrad von Berechnungen und der Aggregationsaufwand an die Parameter angepasst werden. Die Definition der Parameter im Geoportal und deren Berechnungen richten sich dabei nach den Definitionen des Programms TEASER, da diese teilweise von Normen, Richtlinien oder Verordnungen, wie z. B. der EnEV, abweichen.

Die Geschossanzahl, lichte Raumhöhe, Netto-Grundfläche, Kompaktheit des Gebäudes sowie First- und Traufhöhe können nicht direkt aus den aggregierten Daten entnommen werden und müssen über geeignete, im Geoportal implementierte Berechnungsverfahren aus den vorhandenen semantischen und geometrischen Daten und

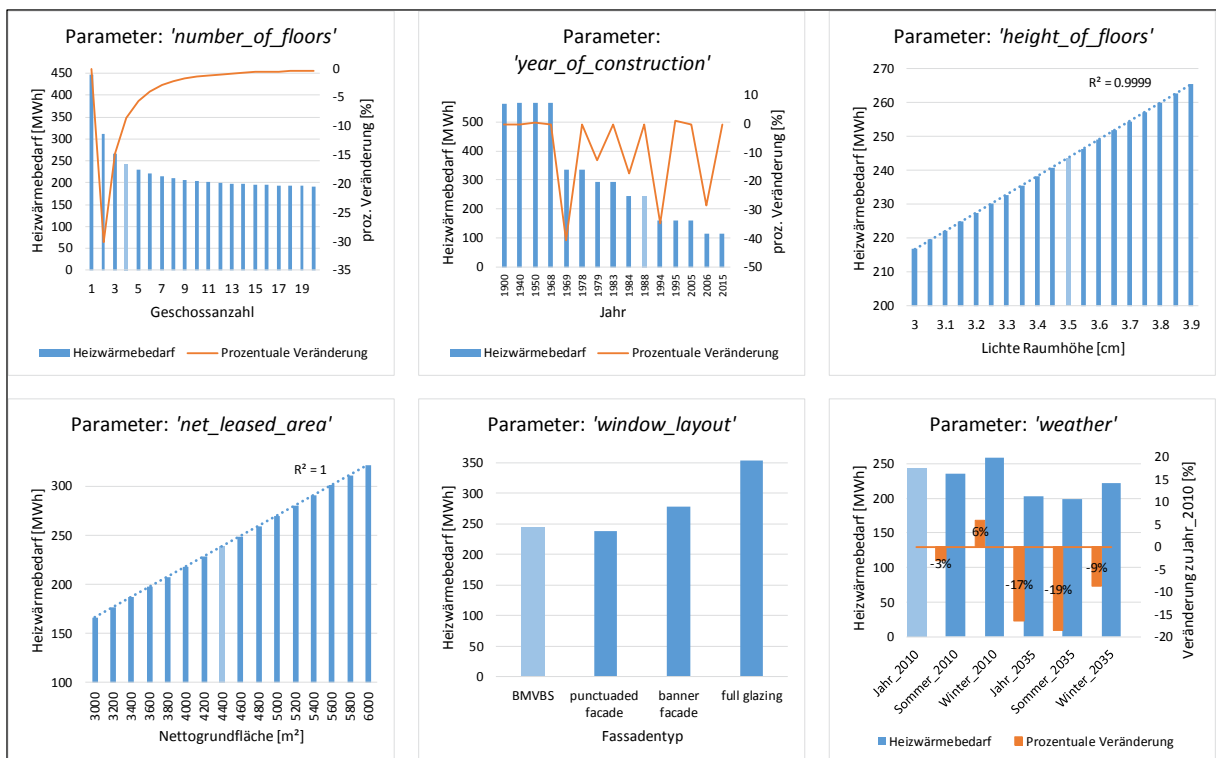


Abbildung 5: Parametereinflüsse auf den über ein Jahr integrierten Heizwärmebedarf für ein Nichtwohngebäude

gegebenenfalls zusätzlichen Parametern aus anderen Quellen abgeleitet werden.

Die Geschossanzahl wird in TEASER als Vollgeschosse ohne Dach oder Keller definiert und nach dieser Definition auch mithilfe der vorhandenen und abgeleiteten Informationen zur Dachform, First-, Trauf- und Geschosshöhe im Geoportal abgeschätzt. Der Einfluss von beheizten oder teilweise beheizten Dach- oder Kellergeschossen wird über Flächenkorrekturen intern im Gebäudemodell berücksichtigt.

Aus den vorhandenen 3D-Gebäudemodellen im Detaillierungsgrad LOD2 kann die Geschossanzahl nicht direkt bestimmt werden. Aufgrund der Definition in TEASER wird das gerundete Verhältnis von Trauf- zu Geschosshöhe herangezogen, um die Geschossanzahl zu bestimmen. Die Geschosshöhe setzt sich dabei aus der mittleren lichten Raumhöhe (in Abhängigkeit der Baualterklasse und des Gebäudetyps aus der Wohngebäudetypologie des Instituts Wohnen und Umwelt (IWU, 2005)) und einer durchschnittlichen Zwischendeckendicke aus Literaturwerten zusammen. Die Einteilung des Gebäudes in die IWU-Baualterklassen erfolgt anhand des abgeschätzten Baujahres.

Die First- und Traufhöhen werden über die geometrischen Informationen aus den CityGML-Daten aggregiert. CityGML enthält alle Wand- und Dachflächen der Gebäude als dreidimensionale Umringspolygone. In einer ersten Annäherung kann die Firsthöhe der höchsten und die Traufhöhe der niedrigsten Höhe der Dachflächen-Umringspolygone entnommen werden. Unter Berücksichtigung des Landeshöhensystems müssen die angegebenen Höhen noch um die Grundflächenhöhe des Gebäudes, die ebenfalls in den geometrischen Daten enthalten ist, vermindert werden.

Für die Nettogrundfläche (in TEASER *net_leased_area*) der WG sind mehrere Berechnungsansätze möglich. Der erste Ansatz stimmt mit den TEASER-internen Definitionen der Geschossanzahl und den Flächenberechnungen überein. Dieser stellt die beheizte Wohnfläche in Abhängigkeit der Anzahl beheizter Vollgeschosse, der Teilbeheizungsgrade von Keller- oder Dachgeschossen und der Bruttogrundfläche (BGF) dar (vgl. Loga et al., 2005). Da jedoch mit diesem Ansatz nicht die NGF, sondern die beheizte Wohnfläche berechnet wird und eine doppelte Wich-

tung der Teilbeheizungsgrade aus der automatisierten Parametrierung und der internen Berechnungsweise in TEASER nicht auszuschließen ist, werden die im Folgenden beschriebenen Ansätze verfolgt: Für WG nach EnEV und für NWG nach BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung), heute BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur).

Bei dem Ansatz nach (EnEV, 2009) wird für die Berechnung der Nettogrundfläche A_N (nach EnEV entspricht die Nettogrundfläche der Nutzfläche) von WG das Bruttovolumen V_e mit einem Faktor multipliziert:

$$A_N = V_e \cdot 0,32 \quad (1)$$

Das Bruttovolumen kann dabei aus den in den CityGML-Daten vorhandenen geometrischen Gebäudekoordinaten errechnet werden.

Für NWG wird der Ansatz nach (BMVBS, 2009) verwendet, der die Nettogrundfläche A_{NGF} über die Bruttogrundfläche A_{BGF} und einer Multiplikation mit einem gebäudetypbezogenen Flächenfaktor f_{BGF} berechnet:

$$A_{NGF} = A_{BGF} \cdot f_{BGF} \quad (2)$$

Die Flächenfaktoren sind für jeden gegebenen Nichtwohngebäudetyp in der Datenbank hinterlegt. Die Bruttogrundfläche wird über die in den CityGML-Daten vorhandenen geometrischen Koordinaten der Gebäudegrundfläche sowie der Geschossanzahl berechnet.

Die „Kompaktheit“ wird nach (Loga et al., 2005) abgeschätzt, indem das Verhältnis des Grundrissumfangs zum Umfang eines Quadrats mit gleicher Grundrissfläche bestimmt wird. Gebäude, bei denen dieses Verhältnis größer als 120 % ist, werden in TEASER als „gestreckt“ bezeichnet - die übrigen als „kompakt“. Der Grundrissumfang des Gebäudes wird über die ALKIS- und 3D-Gebäudedaten berechnet.

Zusätzliche Parameter (z. B. Informationen zum Heizungssystem des Gebäudes) werden in Auswahllisten dem Nutzer zur Festlegung angeboten. Die Anzahl direkter Nachbargebäude kann durch räumliche Abfragen in der Gebäudedatenbank abgeschätzt werden. Die notwendigen Adressdaten können durch Hintereinanderschaltung mehrerer WFS-Dienste aus den Daten des Liegenschaftskatasters ermittelt werden.

Einige benötigte Datensätze sind unzureichend gefüllt (z. B. das Sanierungsjahr und die Beheizungsgrade der Keller- oder Dachgeschosse) und können im Geoportal durch den Nutzer ergänzt werden. Alle anderen Gebäudesimulationsparameter werden im Geoportal auf Grundlage der aus OWS-Diensten beziehungsweise aus eigenen Datenbanken abgerufenen Daten automatisiert berechnet oder mit Informationen gefüllt. Die Nutzereingaben werden nutzer- und sitzungsbezogen in einem separaten Schema gespeichert. Der Vergleich zwischen Simulationen mit unterschiedlichen Randbedingungen ist dadurch einfach und schnell möglich.

DISKUSSION

Die Qualität der Berechnungs- und Simulationsergebnisse hängt stark von der Qualität und Quantität der vorhandenen Daten ab. Auf Stadtquartierebene liegt oft eine sehr geringe Gebäudeinformationsdichte vor. Daher ist ein zentrales Informationssystem mit einer automatisierten Datenaggregation für den Gebäudesimulationsprozess auf Skalen von Einzelgebäuden bis hin zu Stadtquartieren essenziell. Um höchstmögliche Datenaktualität zu erreichen, werden - soweit vorhanden - OWS-Dienste der Datenhalter benutzt, die prinzipiell auch von jedem anderen Client ansprechbar sind und in anderen Anwendungen eingebunden werden könnten. Andernfalls muss auf die Überführung der Daten in und deren Bereitstellung aus eigenen Datenbanken zurückgegriffen werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Anhand von definierten Anforderungen eines Simulationsprozesses an ein Planungswerkzeug wurde der Kopplungsprozess der dynamischen Gebäudesimulation mit einem Web-basierten Geoportal vorgestellt. Die Einflüsse der notwendigen Eingangsparameter der Gebäudesimulation auf den Heizwärmebedarf wurden anhand von Parameterstudien abgebildet und hierarchisch in einer Rangliste geordnet. Darüber hinaus wurden die Berechnungen und Schätzungen der einflussreichsten Parameter erläutert, die nicht flächendeckend vorhanden sind. Durch Bildung von geeigneten Schnittstellen und die Automatisierung der Prozesse zwischen der Nutzeroberfläche, der Datenbank, verschiedenen Webadressen und den Simulationen konnte der Datenaustausch deutlich vereinfacht werden.

AUSBLICK

Für eine Präzisierung der Simulationsergebnisse, könnte die automatisierte und ortsspezifische Anbindung von Wetterdaten über OWS hilfreich sein. Als Wetterdaten sollen die je Kilometerquadrat ermittelten ortsgenauen Datensätze der Testreferenzjahre (TRY) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) von 2016 verwendet werden.

DANKSAGUNG

Das Projekt GeTIS (FKZ: 03ET1357A) wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Rahmen des Schwerpunktprogramms EnEff:Wärme gefördert.

LITERATUR

- BMVBS 2009. Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand
- Bracke R., Rocholl W., Schmidt B., Bussmann G., Eicker T., Kelz B. 2015, Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW Teil 4 – Geothermie LANUV-Fachbericht 40
- EnEV 2009. Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung Vom 29. April 2009
- Fichter E., Weck S., Becker R., Derksen J., Düber S., Frisch J., Löhring R., Koppmann D., Blankenbach J., van Treeck C., Ziegler M. Int. Building Simulation 2017. Geothermal Information System for Potential Studies in Subsurface Soil Layers
- IWU 2005. Deutsche Gebäudetypologie Systematik und Datensätze
- Loga T., Diefenbach N., Knissel J., Born R. 2005. Kurzverfahren Energieprofil - Entwicklung eines vereinfachten, statistisch abgesicherten Verfahrens zur Erhebung von Gebäudedaten für die Erstellung des Energieprofils von Gebäuden
- Müller D., Fuchs M., Lauster M., Teichmann J. 2015. EnEff:Campus - Entwicklung eines integralen Planungshilfsmittels – Abschlussbericht
- Remmen P., Lauster M., Mans M., Fuchs M., Osterhage T., Müller D. 2018. TEASER: an open tool for urban energy modelling of building stocks
- Zensus. Statistische Ämter des Bundes und der Länder. 2016. Zensus 2011: Vielfältiges Deutschland - Endgültige Ergebnisse - 2. Auflage

VII. AUSBILDUNG UND WISSENSTRANSFER, PRAXISBEISPIELE

DAS RAUMKLIMA GENUTZTER PONTONS VON SCHWIMMENDEN HÄUSERN

F. Hansel¹, A. Malakhova¹, H. Stopp¹ und P. Strangfeld¹

¹ Einrichtung, BTU Cottbus-Senftenberg, Cottbus, Germany
Fakultät 6: Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung
Fachgebiet Bauphysik und Gebäudetechnik
Lipezker Str. 47 03048 Cottbus www.b-tu.de horst.stopp@b-tu.de.

1 Einführung

Gegenstand der Untersuchungen ist das Raumklima (Raumlufthtemperatur und rel. Luftfeuchte) in einem Schwimmponton unter Einwirkung des Außenklimas und der außenklimaabhängigen Seewassertemperatur.

Bisherige Langzeitmessungen an verschiedenen ausgeführten Schwimmhäusern im Lausitzer Seenland [1, 2] haben ergeben, das recht erhebliche Probleme bei der Einhaltung des sommerlichen Wärmeschutzes bestehen. Die angewendete Leichtbauweise mit anteilmäßig großen Glasflächen führt in der weitgehend verschattungsfreien Umgebung zu hohen Raumlufthtemperaturen, die mit hohem technischen und energetischen Aufwand (Klimaanlagen) auf einem zumutbaren Niveau gehalten werden müssen.

Unter der Annahme, dass es energetisch vorteilhaft sei, die Thermik des umgebenden Seewassers für die passive Herstellung eines komfortablen Wohnraumklimas zu nutzen, stellt sich die Frage, ob die Nutzung des Pontoninnenraumes als Wohnraum eine praktikable Lösung ist. Im Winter könnte theoretisch der Heizwärmebedarf gesenkt werden, da sich die umgebende Wassermasse aufgrund ihrer hohen Wärmekapazität sehr viel langsamer abkühlt als die Umgebungsluft. Negative Temperaturen treten nur im oberen Bereich der sich nach langen Frostphasen bildenden Eisschicht auf. Ebenso erwärmt sich das Seewasser im Sommer sehr langsam und erreicht im Jahresgang kaum Temperaturen von mehr als 25°C.

2 Raumlufthtemperatur und Raumlufthfeuchte

Die beiden betrachteten Komponenten des Raumklimas Temperatur und rel. Luftfeuchte stehen in einem indirekten Zusammenhang, da der Sättigungsdampfdruck und damit der maximal mögliche Wasserdampfgehalt in der Luft eine Funktion der Lufttemperatur ist. Temperaturänderungen bewirken daher bei gleichbleibendem Wasserdampfgehalt in der Luft auch Änderungen der relativen Luftfeuchte. Die instationären Übergangsprozesse zwischen den Zuständen werden von der wirksamen Wärme- und Feuchtespeicherkapazität der beteiligten Körper wesentlich mitbestimmt. Diese hängen von den Stoffeigenschaften, der Größe der beteiligten Austauschoberflächen und den an diesen Oberflächen auftretenden Gradienten von Temperatur und Wasserdampfdruck ab. Eine getrennte Betrachtung des thermischen und hygrischen Verhaltens des Pontoninnenraumes ist deshalb nicht möglich. Denn die Wärmekapazität eines Baustoffes beeinflusst nicht nur den zeitlichen Verlauf der Raumlufthtemperatur sondern ebenso das Zeitverhalten der relativen Raumlufthfeuchte. Letzteres wird aber auch durch die zeitliche Feuchteanlagerung und Feuchteabgabe des Baustoffes beeinflusst. Umgekehrt beeinflussen die Feuchteanlagerungsprozesse das thermische Verhalten des Raumes, da es sich um Prozesse mit Phasenübergängen handelt, die der Raumlufth Wärmeenergie entziehen oder zuführen.

Das dynamische Wechselspiel zwischen Baustoff, Oberfläche und Umgebungsluft ist überaus komplex. Aus den Wärme- und Feuchtebilanzen lässt sich ein die Vorgänge beschreibendes

Differentialgleichungssystem aufstellen. Zur Lösung des Gleichungssystems sind Algorithmen entwickelt worden, die in verschiedenen Computerprogrammen implementiert sind.

3 Angewandte Berechnungssoftware

3.1 CLIMT

Analytische Lösungen des oben erwähnten Differentialgleichungssystems setzen ein hohes Maß an geeigneten Abstraktionen voraus. Eine solche Lösung wurde von HÄUPL entwickelt und in der Berechnungssoftware CLIMT [3] mit dem integrierten Klimadatengenerator CLIG [4] implementiert. Das Programm richtet sich als einfach zu handhabendes Tool insbesondere an Architekten. Es zeichnet sich durch eine große Rechengeschwindigkeit aus und bedarf zu seiner Handhabung keines mathematischen Spezialwissens.

Drei Energiebilanzen bilden den Kern des thermischen Modells. Die erste Gleichung beschreibt den Energiespeicher der mit dem Außenklima beaufschlagten Oberflächen. Die zweite quantifiziert den Energietransport über die Struktur durch Leitung, Strahlung und Ventilation. Die dritte formuliert den Energiespeicher der Innenoberflächen. Der Vorteil dieses Lösungsverfahrens besteht darin, dass der im Programm implementierte Berechnungsalgorithmus immer mit einem fest programmierten Rechenzeitschritt (1 Stunde) arbeiten kann und dass somit der Zeitaufwand der Berechnung des Jahresganges gering und vom speziellen Anwendungsfall weitgehend unabhängig bleibt. CLIMT berechnet die wirksame Wärmespeicherkapazität über die Eindringtiefe eines repräsentativen Temperatursignales in die mehrschichtig aufgebaute Raumhülle. Für Innen- und Außenseite der Raumhülle sind unterschiedliche Temperatursignale möglich. Die Speicherkapazität der von der Temperaturänderung erfassten Materialsichten wird aus den Stoffgrößen berechnet und unter der vereinfachenden Annahme einer linearen Temperaturänderung über dem Bauteilquerschnitt anteilig in Ansatz gebracht. Da für die Berechnung der Eindringtiefe die Materialeigenschaften der verschiedenen Baustoffe einer mehrschichtigen Wand gemittelt werden müssen, stößt das Verfahren in einigen, im Bauwesen relativ selten vorkommenden, Fällen an seine Grenzen (z.B. dickwandige,

wärmegedämmte Metallkörper). Die Wärmeübergangskoeffizienten sind mit Normwerten fest belegt und können nicht verändert werden. Das Verhältnis von Konvektion zu Wärmestrahlung ist zu gleichen Teilen ebenfalls fest vorgegeben. Der einzige Einstellparameter über den die Temperaturberechnung angepasst werden kann, ist die Periodendauer des repräsentativen Temperatursignales. Für diesen Wert wird nach HÄUPL für mitteleuropäische Verhältnisse eine mittlere Klimaperiodendauer von 10 Tagen empfohlen.

Das integrierte Feuchteberechnungsmodell von CLIMT ist aus Analogiebetrachtungen zum Wärmeberechnungsmodell heraus entwickelt worden. Aus den Materialeigenschaften errechnet sich, für eine charakteristische Zeitperiode, die Eindringtiefe des Feuchtesignals und die wirksame Feuchtespeicherkapazität. Die Stoffübergangswerte folgen entsprechend aus den Wärmeübergangskoeffizienten, die Dampfdruckdifferenzen an den Oberflächen ersetzen die Temperaturgradienten. Im Gegensatz zur thermischen Berechnung stößt bei dieser Betrachtung die Anwendung auf eine mehrschichtige Wand in vielen praktisch umgesetzten Fällen auf Schwierigkeiten. Die den Feuchtetransport bestimmenden Eigenschaften der Baustoffe können nicht sinnvoll gemittelt werden, da diese oft sehr verschieden sind (z. B. bei Oberflächenbeschichtungen). CLIMT verwendet daher bei einer mehrschichtigen Wand nur die dem Raum zugewandte Schicht zur Berechnung des Feuchtespeichers. Diese Vereinfachung liefert eine hinreichende Genauigkeit, da die Eindringtiefe des Feuchtesignals sehr viel geringer als die thermische Eindringtiefe ist.

3.2 TRNSYS

TRNSYS ist eine Berechnungssoftware zur Simulation technischer Systeme der Gebäudetechnik. Ein Anwendungsschwerpunkt ist die energetische Analyse. Unter anderem besteht die Möglichkeit das Zusammenspiel technischer Einrichtungen in komplexen Mehrzonengebäuden zu berechnen. Zu diesem Zweck ist die Raumklimaberechnung als wesentlicher Bestandteil integriert. Die Software bedarf zur korrekten Benutzung einiger mathematischer Hintergrundkenntnisse. Sie kann durch den Benutzer durch selbstentwickelten Programmcode (FORTRAN) erweitert werden.

Das thermische Berechnungsmodell von TRNSYS verwendet für die Lösung der beschreibenden Differentialgleichungen die Methode der Z-Übertragungsfunktionen nach MITALAS [5]. Nach Transformation in den Z-Bereich können in gleichem zeitlichen Abstand vorliegende Eingangsdaten mit mathematisch einfacheren, systembeschreibenden Gleichungen verarbeitet werden. Eine Übertragungsfunktion ist das Verhältnis der transformierten Zeitfunktion der Ausgangsgröße zur transformierten Zeitfunktion der Eingangsgröße und gibt somit die Antwort des Systems auf die angelegten Randbedingungen wieder. Nachteilig ist, dass die anwendbare Zeitschrittweite der Berechnung vom Anwendungsfall abhängt und bei einigen Fällen sehr zeitraubend werden kann. Die Koeffizienten der Übertragungsfunktionen werden aus den konstruktiven Daten und Stoffwerten, in einem integrierten Programm, vor der eigentlichen Simulation berechnet. Über die einstellbare Zeitbasis der Übertragungsfunktionen kann der Benutzer darauf Einfluss nehmen. Dieser Parameter beeinflusst den anwendbaren Simulationszeitschritt und damit die Rechengeschwindigkeit der Simulation. Wärmeübergangskoeffizienten können wahlweise fest vorgegeben oder intern unter Berücksichtigung der Temperaturdifferenz Wand – Raumluft berechnet werden.

Das "Effective Capacitance Humidity Model" (ECHM) von TRNSYS ist ein Berechnungsmodell für die Berechnung der Raumluftfeuchte, das in Bezug auf die Feuchtespeicherkapazität der Raumhülle sehr stark vereinfacht ist. Die wirksame Feuchtespeicherkapazität wird hier einfach als Vielfaches der Masse des Raumluftvolumens angegeben. Sie kann nur aufgrund von vorliegenden Erfahrungen geschätzt werden, was die praktische Anwendbarkeit in vielen konkreten Fällen in Frage stellt.

Die beiden Programme vernachlässigen die Oberflächenkondensation an der Raumhülle bei Unterschreitung der Sättigungstemperatur. Die Anwendbarkeit beschränkt sich bei solchen Fällen auf die Aussage einer wahrscheinlichen Oberflächenkondensation. Das genauere zeitliche Verhalten der berechneten Raumluftfeuchte ist verfälscht, da der Phasenwechsel verzögerungsfrei und ohne Energieaustausch angenommen wird.

Das Buffer Storage Humidity Model (BSHM) von TRNSYS beschreibt einen Feuchtespeicher, bestehend aus einem Oberflächenspeicher und einem Tiefenspeicher, die beide miteinander gekoppelt sind. Der Oberflächenspeicher steht in Kontakt mit der Raumluft. Für jeden Speicherbereich sind der Anstieg der Sorptionsisotherme des Speichermaterials, die Masse des Speichermaterials und ein Austauschkoefizient zur Beschreibung des Feuchteüberganges von Luft auf den Oberflächenspeicher bzw. vom Oberflächenspeicher auf den Tiefenspeicher anzugeben. Für die praktische Anwendung ist problematisch, dass die Berechnung der Masse und Austauschkoefizienten für beide Speicherbereiche die Kenntnis der Eindringtiefe des Feuchtesignals voraussetzen. Im Gegensatz zu CLIMT ist diese Berechnung im Programm nicht integriert. Der Benutzer muss die erfasste Speichermasse selbst berechnen oder schätzen, was bei mehrschichtigen Konstruktionen oder Räumen mit verschiedenen Wandkonstruktionen oder sonstigen feuchtespeichernden Gegenständen im Raum kaum hinreichend genau realisierbar ist.

4 Validierung der Berechnungsergebnisse für einen Raum mit vorgegebenem Feuchtespeicherverhalten

Zunächst wird das Ergebnis der Raumluftfeuchteberechnungen im Labormaßstab überprüft. Dafür wird ein kleiner Prüfraum aus inertem Material (Bild 4-1) geschaffen und mit einer definierten stündlichen Luftmenge bekannter Temperatur und Feuchte beaufschlagt. Als Feuchtespeicher wird eine Materialprobe mit bekannten Abmessungen und Stoffeigenschaften eingesetzt. Durch periodische Änderung der relativen Zuluftfeuchte wird ein dynamisches Eingangssignal angelegt und die Reaktion des Innenraumklimas gemessen. Die Eingangsdaten werden als Inputdateien den Berechnungsprogrammen zugeführt. Durch Vergleich der Ergebnisse mit den aufgezeichneten Messwerten kann die Güte der Berechnungsmodelle abgeschätzt werden.

Bild 4-2 zeigt die Gegenüberstellung der Messwerte (rote Kurve) mit den Berechnungsergebnissen von CLIMT und TRNSYS (ECHM-Modell). Wird der Einstellparameter des ECHM-Modells auf 1 gesetzt ergibt sich der schwarze Kurvenzug. Die Feuchtekapazität des Raumes

ist damit offensichtlich zu niedrig angesetzt, da der berechnete Luftfeuchteverlauf dem Gang der Zulufffeuchte (grüne Kurve) nahe liegt. Wird der Einstellparameter auf 10 gesetzt (dunkelgraue Kurve) ist die Feuchtekapazität zu groß. Die Ergebniskurve besitzt eine viel kleinere Amplitude als die Messwertkurve. Bei Einstellparameter 5 ergibt sich die hellgraue Kurve, die im Verlauf dem Ergebnisverlauf von CLIMT (blaue Kurve) recht nahe liegt. Die Übereinstimmung mit den Messergebnissen ist in diesem Fall qualitativ hinreichend genau. Abweichungen von $\pm 3\%$ relative Feuchte sind aufgrund der Meßgenauigkeit der verwendeten Sensoren akzeptabel.

In Bild 4-3 sind die Ergebnisse des BSHM-Modells von TRNSYS dargestellt. Bei den Berechnungen stellt sich das Problem dar, dass die anzusetzende Dicke der beiden Speicher unbekannt ist. Diese hängt ja von den Baustoffeigenschaften und der Einwirkzeit des Feuchtesignals ab. Durch die Vielzahl der möglichen Kombinationsmöglichkeiten der Schichtdickenannahmen ist hier die Einjustierung der Ergebniskurve auf die Messkurve nicht eindeutig. Das Bild zeigt die Kurven von 3 ausgewählten Eingabevarianten.



Bild 4-1: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Luftfeuchteverlaufes

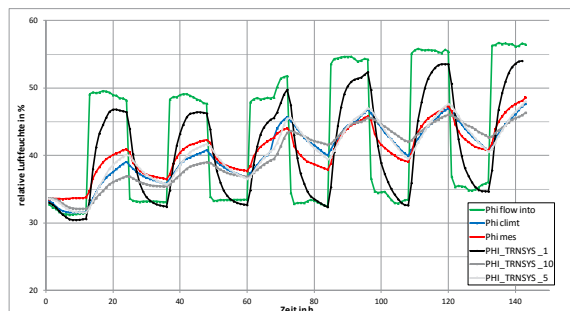


Bild 4-2: Vergleich der Trnsys- (Modell ECHM) und der CLIMT-Ergebnisse mit den Messwerten

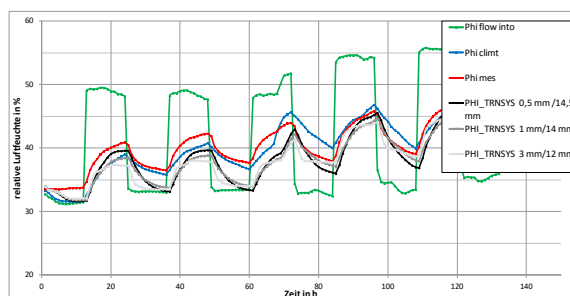


Bild 4-3: Vergleich der Trnsys- (Modell BSHM) und der CLIMT-Ergebnisse mit den Messwerten

Aus den Laboruntersuchungen ist zu entnehmen, dass CLIMT und TRNSYS einander ähnliche Ergebnisse ausrechnen, die auch den gemessenen Werten nahe liegen, sofern man die Einstellparameter passend einjustiert. Qualitativ geben offenbar beide Programme die physikalischen Prozesse richtig wieder. Eine Prognoserechnung zur Bestimmung des Klimaverlaufes für einen Raum, für den noch keine gemessenen Erfahrungen vorliegen, ist jedoch mit Unsicherheiten behaftet, da die zu wählende Einstellung unbekannt ist.

Bei CLIMT gibt es nur die speicherwirksame Klimaperiodendauer als Einstellparameter. Für diese gibt es einen empfohlenen Wert (10 Tage), der sich in vielen praktischen Fällen bewährt hat. In besonderen Fällen muss dieser Wert an das tatsächliche Klimasignal angepasst werden, so z.B. bei der Laboruntersuchung auf die Dauer des Feuchtesprungs von 12 Stunden. Dies ist nachvollziehbar und bietet einen guten Orientierungspunkt bei der Berechnung unbekannter Anwendungsfälle.

Die Einstellmöglichkeiten von TRNSYS sind vielfältig. Wenn jedoch noch keine Messwerte oder andere Erfahrungen zum Anwendungsfall vorliegen bleibt die Wahl der Einstellparameter willkürlich und ist damit nicht praktikabel.

Für die Berechnungen des Raumklimas in einem hypothetischen Schwimmponton ist die Software CLIMT somit besser geeignet und wird bei den nachfolgenden Untersuchungen verwendet.

5 Raumklimaberechnung mit CLIMT

5.1 Klimatische und konstruktive Randbedingungen

5.1.1 Außenklima und Seewassertemperatur

Der Schwimmponton unterscheidet sich von einem gewöhnlichen Raum dadurch, dass ein bedeutender, auftriebsabhängiger Anteil der Außenoberfläche an das Seewasser angrenzt. Die Seewassertemperatur folgt im Trend der Umgebungslufttemperatur, wird aber wesentlich durch die thermodynamischen Eigenschaften des Wassers (insbesondere Wärmekapazität und Dichte) beeinflusst. Der Jahrestemperaturverlauf der mittleren Seewassertemperatur hängt außerdem maßgeblich von den Eigenschaften des Gewässers ab, insbesondere Wasservolumen, Oberfläche und Grundwasserströmung. Die Dichteanomalie bestimmt zusammen mit diesen Parametern sowie klimatischen Einflüssen wie Wind und Niederschlag den zeitlichen Verlauf der Temperaturverteilung über die Seetiefe. Für die Berechnung des Wärmestroms durch die Pontonwandung ist die mittlere Seetemperatur nur in den Zirkulationsphasen im Herbst und Frühjahr aussagekräftig. Im Sommer und Winter weicht die relevante Seeoberflächentemperatur wegen der sich einstellenden Schichtung bei vielen Seen erheblich vom Mittelwert ab.

Für die nachfolgenden Untersuchungen wird eine im Vorfeld der Untersuchungen aufgenommene Messreihe der Oberflächenwassertemperatur vom Geierswalder See im Lausitzer Seenland genutzt. In Bild 5.1.1-1 sind die Messwerte, die über den Jahreswechsel 2015/16 aufgezeichneten wurden, eingetragen. HÄUPL empfiehlt für die Approximation des Jahresganges die Verwendung einer phasenverschobenen Sinusfunktion, da diese nur drei Einstellparameter besitzt. Über Amplitude, Periodenlänge und Phasenverschiebung kann der Verlauf in weiten Grenzen angepasst werden. Diese Möglichkeit ist in CLIMT implementiert. Es können bis zu 6 verschiedene Temperaturfunktionen definiert werden, die den entsprechenden Oberflächen zugewiesen werden. Das Maximum

der im Diagramm orangefarbig dargestellten Kurve liegt bei 23 °C, was sich mit vorliegenden Messdaten aus den Sommermonaten vergangener Jahren deckt.

Für das Außenklima wird der Meteorolog-Datensatz für Potsdam verwendet. Dieser ist das Resultat statistischer Auswertung langjähriger Wetteraufzeichnungen für die betreffende Region. Eine solche langjährige Datenerhebung gibt es für die Seewassertemperaturen des Lausitzer Seenlandes nicht. Aus diesem Grunde besteht also kein wirklicher Zusammenhang zwischen dem verwendeten Außenklima und dem angenommenen Seewassertemperaturverlauf. Die gewählte Approximation muss genügen, da repräsentativeres Datenmaterial nicht zu Verfügung steht.

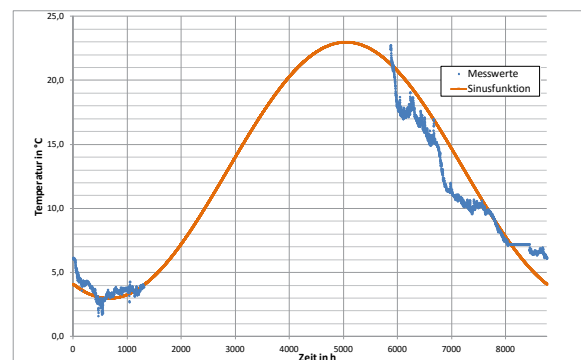


Bild 5.1.1-1: Approximation des Jahresganges der oberflächennahen Seewassertemperatur durch eine Sinusfunktion

5.1.2 Beschreibung des Schwimmkörpers

Als Grundlage der raumklimatischen Untersuchungen wird der Schwimmponton für den im Rahmen des Autartec-Projektes durch die Firma Wilde Metallbau GmbH entwickelten Demonstrator verwendet. Die Wahl ist dadurch begründet, dass nach Fertigstellung des Demonstrators die Möglichkeit besteht, Raumklimamessungen im Ponton vorzunehmen und damit die Genauigkeit der Berechnungen zu verifizieren.

Die Eintauchtiefe des Pontons im Wasser ist von der Gewichtsbelastung abhängig. Da zum Zeitpunkt der Berechnungen noch keine endgültigen Informationen über das Gewicht der Aufbauten vorlagen, wird die Eintauchtiefe mit 50% der Pontonhöhe festgelegt.

Der Ponton besteht aus 5 mm dickem Stahlblech. Vorhandene Versteifungen werden zu-

nächst vernachlässigt und später als separate im Raum liegende Wärmekapazität berücksichtigt. Der Ponton ist 5,5 m lang, 2,5 m breit und 1,5 m hoch. Bei der angenommenen Eintauchtiefe befindet sich eine Oberfläche von jeweils ca. 26 m² in Kontakt mit dem Seewasser bzw. mit der Außenluft. Da der Ponton mit einem überstehenden Deck überbaut werden soll, wird ein Verschattungsgrad gegen Solarstrahlung von 100% angenommen.

5.2 Berechnungsvarianten

Bild 5.2-1 zeigt die Ergebnisse für die Grundvariante (oben beschriebener Stahlblechponton ohne Wärmedämmung und zusätzliche Wärme- und Feuchtespeicherkapazitäten) bei einer Luftwechselrate von 0,1 h⁻¹. Es befinden sich keine besonderen Feuchte- und Wärmequellen in Raum. Für jeden Monat des Jahres sind die mittlere Raumlufttemperatur (rot), die mittlere relative Luftfeuchte (grün), das Maximum und Minimum der Raumlufttemperatur (orange bzw. violett) sowie das Maximum und Minimum der relativen Luftfeuchte (blau bzw. cyan) aufgetragen. In der Zeit von November bis Februar treten im Raum zeitweise Temperaturen auf, die unter dem Gefrierpunkt des Wassers liegen. Im Januar und Februar liegt die Monatsdurchschnittstemperatur im negativen Bereich. Die relative Raumluftfeuchte überschreitet im Mittel während des Gesamtjahres deutlich den 50%-Wert. Die Maximalwerte liegen bei oder nahe 100%, so dass im Gesamtjahreszeitraum mit sporadischer Tauwasserabscheidung an der Pontoninnenwand gerechnet werden muss.

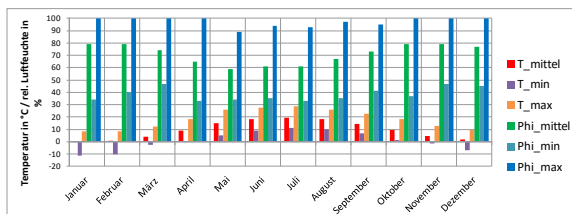


Bild 5.2-1: Ergebnisse Grundvariante Luftwechsel 0,1 h⁻¹, ohne Heizung

Durch einen erhöhten Luftwechsel (Bild 5.2-2) können die Verhältnisse nicht wesentlich verbessert werden. Die maximale relative Luftfeuchte sinkt infolge der ungesteuerten Lüftung im Sommer nur geringfügig ab.

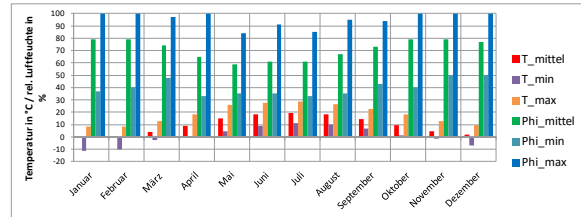


Bild 5.2-2: Ergebnisse Luftwechsel 0,5 h⁻¹, ohne Heizung

Durch die Bekleidung der Pontonwandung mit einem hygroskopischen Material (zementgebundene Holzfaserverplatte) kann die mittlere relative Raumluftfeuchte deutlich verringert werden (Bild 5.2-3). Jedoch zeigen die blauen Balken der Maxima weiterhin hohe Werte an. Das Problem der sporadischen Tauwasserbildung bleibt über lange Zeiträume im Jahr bestehen.

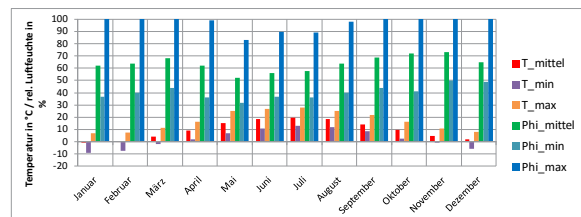


Bild 5.2-3: Ergebnisse Luftwechsel 0,1 h⁻¹, zementgebundene Spanplatte als innere Wandbekleidung

In Bild 5.2-4 ist nun zusätzlich zur Beplankung eine innere Wärmequelle aktiviert, welche die Raumlufttemperatur auf einen Minimalwert von ca. 10°C begrenzt. Wie bei einer thermostatgeleiteten Heizung wird dem Raum über eine definierte, lineare Heizkennlinie ein Wärmebeitrag zugeführt. Entsprechend liegen die mittleren Raumlufttemperaturen in den Wintermonaten bei 10°C mit einem geringen Schwankungsbereich der Maxima und Minima infolge Regelabweichungen. Die Änderung des Raumlufttemperaturverlaufes ändert das Verhalten der Luftfeuchte wesentlich. Das Maximum der Raumluftfeuchte liegt nun in der zweiten Jahreshälfte, während in der kalten Jahreszeit kaum Luftfeuchten über 60% auftreten. Der Verlauf ist typisch für einen beheizten Raum mit konstanter Luftwechselrate.

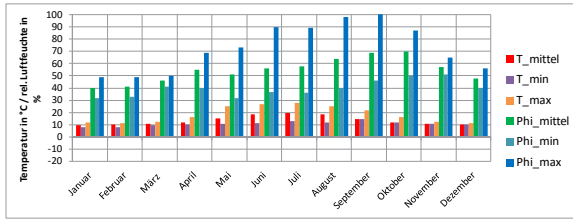


Bild 5.2-4: Ergebnisse Luftwechsel $0,1\ h^{-1}$, zementgebundene Spanplatten als innere Wandbekleidung, Heizung 10°C

Um die Spitze der relativen Luftfeuchte im August/September abzumildern ist eine gezielt verstärkte Lüftung notwendig. Wenn die absolute Luftfeuchte im Raum größer ist als die absolute Luftfeuchte der Außenluft, wird der Raum mit einer Rate von $0,50\ h^{-1}$ belüftet, ansonsten wird nur eine minimale Luftmenge in der Größenordnung von $0,01\ h^{-1}$ (geschätzter Luftwechsel über Fugen) zugeführt. Das Ergebnis ist in Bild 5.2-5 zu sehen.

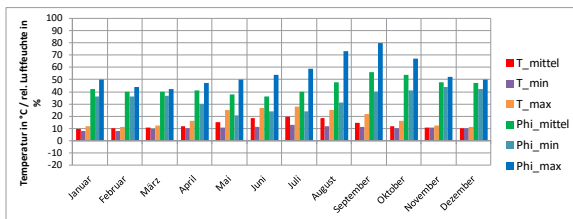


Bild 5.2-5: Ergebnisse für gesteuerten Luftwechsel $0,01$ bis $0,50\ h^{-1}$, zementgebundene Spanplatte als innere Wandbekleidung, Heizung Solltemperatur 10°C

Aus den vorstehenden Grafiken ist zu entnehmen, dass die mittlere Raumlufttemperatur in allen bisher betrachteten Fällen, auch in den Sommermonaten, unter 20°C liegt. Deshalb ist der Pontonraum in dieser Konfiguration für dauerhaftes Wohnen ohne ganzjährige zusätzliche Heizung nicht geeignet.

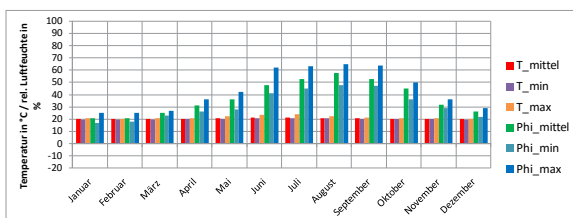


Bild 5.2-6: Ergebnisse Luftwechsel $0,1\ h^{-1}$ zementgebundene Spanplatte als innere Wandbekleidung, Innendämmung, Heizung 20°C

Bild 5.2-6 zeigt den Fall, dass die Heizung eine Raumtemperatur von 20°C aufrechterhält. Die Temperatur ist über das ganze Jahr weitgehend

konstant und die relative Raumluftfeuchte ganzjährig unter 70%. Für ein komfortables Wohnklima ist die relative Luftfeuchte im Winter zu niedrig. Durch Nutzung der Sonneneinstrahlung auf die Außenhülle kann der erforderliche Heizenergiebedarf reduziert werden. Allerdings wird die Wirksamkeit mit zunehmender Dämmschichtdicke der Pontonwandung herabgesetzt. Besser könnte Solarstrahlung mit einem thermischen Kollektor nutzbar gemacht werden und dem Raum gezielt über eine innere Wärmequelle zugeführt werden. Eine einfache Variante ist die ungesteuerte Strahlungswärmenutzung über eine transparente Außenhülle. Diese würde auch die Nutzung des Tageslichtes zur Beleuchtung des Pontoninnenraumes ermöglichen. In Bild 5.2-7 sind die Ergebnisse für den Fall dargestellt, bei dem ein über der Wasserlinie liegender Bereich der in südlicher Richtung liegenden Außenwand durch eine Glasfläche ($3\ \text{m}^2$ Zweifach-Wärmeschutzverglasung mit Argonfüllung) ersetzt wird.

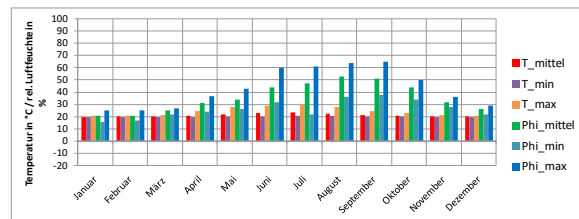


Bild 5.2-7: Ergebnisse Luftwechsel $0,1\ h^{-1}$, zementgebundene Spanplatte als innere Wandbekleidung, Innendämmung, Heizung 20°C , Fenster Südseite

In den Sommermonaten wird durch diese Maßnahme erwartungsgemäß die mittlere Raumlufttemperatur erhöht und es treten größere Temperaturspitzen auf. Die Raumlufttemperatur überschreitet an 32 Tagen des Jahres kurzzeitig gegen Mittag den Wert von 26°C , bleibt aber ganzjährig unter 30°C . Die mittlere relative Raumluftfeuchte liegt im Sommer wegen der erhöhten Temperaturen, etwas niedriger als im Fall ohne Glasfläche. Die Effekte sind aus energetischer Sicht nicht ganz optimal, da die Wärme- und Feuchtespeicherkapazität des Raumes durch die Fensterfläche etwas verringert ist und über die Glasfläche besonders im Winter erhöhte Transmissionswärmeverluste auftreten. Ein umlaufendes Fensterband würde den Jahresheizwärmebedarf deutlich vergrößern, da die solaren Gewinne der Nordseite relativ zu den erhöhten Wärmeverlusten zu klein sind.

6 Zusammenfassung

Die Idee, den Pontoninnenraum durch die komfortable Ausnutzung der Thermik des umgebenden Seewasser vorteilhaft als ganzjährig genutzten Wohnraum vorzusehen, ist ohne technische Hilfsmittel nicht umzusetzen. Die großflächige Beaufschlagung der Außenwandung durch das Wasser führt zu ähnlichen Verhältnissen wie in einem herkömmlichen Kellerraum. In normalen Wohnräumen wird die Lufttemperatur im Sommer stark durch solare Wärmeeinträge über Fenster und Wände beeinflusst. Dementsprechend sind Anforderungen des sommerlichen Wärmeschutzes zu beachten. Im Schwimmponton ist dagegen, wie im Keller, die Wirkung der Solarstrahlung erheblich reduziert. Die Raumlufttemperatur folgt praktisch phasenverschoben der mittleren Außenlufttemperatur und ist damit auch in den Sommermonaten für ein behagliches Klima zu niedrig.

Durch transparente Außenflächen in dem über dem Wasserspiegel liegenden Außenwandbereich kann Solarwärme nutzbar gemacht werden, um den Wohnkomfort zu erhöhen. Jedoch ist der Effekt insofern nicht optimal, dass durch die Glasflächen die Transmissionswärmeverluste größer werden und die Gesamtwärmekapazität des Raumes abnimmt.

Sowohl die wasser- als auch die luftkontaktierten Flächen müssen wärmegeklämt sein, um die Wärmeverluste in der Heizphase in Grenzen zu halten. Leider wird dadurch aber auch der positive Effekt der Raumkühlung in den Sommermonaten durch das tiefer temperierte Seewasser und die wirksame Wärmekapazität der Raumumschließungsfläche verringert. Während bei fensterloser Hülle die Raumlufttemperatur unter 20°C bleibt, können mit zunehmender Fensterfläche zeitweise sehr große Temperaturschwankungen im Tagesverlauf auftreten. Allerdings ist die konstruktiv realisierbare Fensterfläche aufgrund der Pontonaufbauten und der wasserangrenzenden Flächen von vornherein stark begrenzt.

Durch technische Maßnahmen, z.B. durch eine geregelte Beheizung über einen thermischen Solarkollektor mit ausreichend dimensioniertem Speicher, könnte ein behagliches Klima in den Sommermonaten gewährleistet und der konventionell zu deckende Heizwärmebedarf in der Heizperiode reduziert werden.

Die Raumnutzung ohne jede Heizung (z.B. als Lager) ist nur sehr eingeschränkt möglich. Die relative Luftfeuchte ist insbesondere in der kalten Jahreszeit sehr hoch was zu lokaler Tauwasserbildung und Schimmelpilzbildung führen kann. Um akzeptable Luftfeuchten zu erreichen ist die Kombination eines ausreichenden Feuchtespeichers mit einer mäßigen Beheizung und einer feuchtegesteuerten Lüftung erforderlich.

Literatur

- [1] Stopp, Strangfeld: Schwimmende Wohnbauten: Grundlagen (Beuth Praxis), Beuth Verlag 2012, 208 S.
- [2] Hansel, Stopp, Strangfeld u.a. „Schwimmende Häuser für die entstehende Lausitzer Seenkette – ein Produkt der Lausitz ?“, gefördert durch das BMBF, FKZ 1763X06, Abschlussbericht Hochschule Lausitz (FH), FB Architektur/Bauingenieurwesen/ Versorgungstechnik, Cottbus 2010, 327 S.
- [3] Häupl, Bishara, Hansel: Modell und Programm CLIMT zur einfachen Ermittlung der Raumlufttemperatur und Raumluftfeuchte bei quasifreier Klimatisierung. Bauphysik 3 (2010), H.3, S.185-206
- [4] Häupl, Hansel: Klimagenerator CLIG zur Gebäude- und Bauteilsimulation. Bauphysik 3 (2017), H.3, S. 175-190
- [5] Mitalas: Comments on the Z-Transfer function method for calculating heat transfer in buildings. ASHRAE Transactions Vol. 84, Part 1, 1978, p. 667 – 67

DIGITALE WERKZEUGE UND SOFTWAREBASIERTE LÖSUNGSANSÄTZE: EINBLICK IN DIE ENTWICKLUNGEN UND ANWENDUNGEN DER FORSCHUNGSINITIATIVE ENERGIEWENDEBAUEN

L. Kirnats¹, J-N. Joost², S. Berg³, J. Frisch⁴ und C. van Treeck⁵

¹Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen (E3D), Rheinisch-Westfälische Universität Aachen, Aachen, Deutschland

²E3D, RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland, ³E3D, RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland, ⁴E3D, RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland, ⁵E3D, RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

KURZFASSUNG

Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitforschung zu Forschungsvorhaben, die seitens des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Bereich „Energie in Gebäuden und Quartieren“ zur korrespondierenden Forschungsinitiative ENERGIEWENDEBAUEN gefördert werden, sind mehr als 900 Projekte hinsichtlich ausgewählter Themen ausgewertet worden. Bei der wissenschaftlichen Querschnittsforschung handelt es sich um eine Methodik zur Analyse von Forschungsvorhaben auf der übergeordneten Ebene. Das resultierende Ergebnis liefert einen verbesserten Einblick in das nationale Forschungsgeschehen. Den Schwerpunkt der hier betrachteten Tiefenbohrung bilden digitale Werkzeuge und softwarebasierte Lösungsansätze im Kontext Energie in Gebäuden und Quartieren. Neben einer eindeutigen terminologischen Abgrenzung werden die querschnittsübergreifende Relevanz von Tool- und Softwareentwicklungen im Rahmen von Forschungsprojekten, eine Typologie von softwarebasierten Lösungsansätzen, eine Tendenz zur Multi-Skalen Modellierung, die programmiertechnische Umsetzung, Lizenzierungsmodelle und das digitale Ökosystem der Anwendung im Rahmen dieser Querschnittsanalyse betrachtet.

ABSTRACT

As part of the accompanying research to the corresponding research initiative ENERGIEWENDEBAUEN, more than 900 research projects are analyzed with respect to various topics. The so-called scientific cross-sectional research is a methodology for the analysis of research projects on superordinate level. The

results provide insights into national research priorities. The initiative focusses on research projects around the topic of energy in buildings and city quarters. The research projects should enable the development of software-based solutions and the application of digital tools in this case. In addition to a clear terminological distinction, the cross-cutting relevance of software development in the context of research projects, a typology of software-based approaches, a trend towards multi-scale modeling, the programming implementation, licensing models and the digital ecosystem of applications are discussed within this work.

EINLEITUNG

Um die Energiewende und die Ziele zum Erreichen eines nahezu klimaneutralen Gebäudebestands bis zum Jahr 2050 sowie zur drastischen Reduktion des Energiebedarfs zu unterstützen, (BMWi, 2015), werden im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung zahlreiche Forschungsvorhaben von Universitäten und Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Unternehmen gefördert. Unter dem Themenzusammenschluss „Energieoptimierte Gebäude und Quartiere“ fördert das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) die Bereiche Energieoptimiertes Bauen (EnOB), Niedertemperatur-Solarthermie, Thermische Speicher, Forschung für energieeffiziente Wärme- und Kältenetze (EnEff:Wärme), Solarisierung von Wärmenetzen sowie Forschung für die energieeffiziente Stadt (EnEff:Stadt) (BMWi, 2014).

Die Förderung betrachtet damit Effizienzpotenziale von Gebäuden und Quartieren, technische Innovationen und Technologien, die in Demonstrationsvorhaben umgesetzt werden. Ein wichtiger Aspekt ist hierbei der Fokus auf systemischen

Ansätzen – im Gegensatz zu Einzellösungen (BMW, 2015). Systemische Ansätze sind vor dem Hintergrund von vernetzten Gebäude- und Quartierskonzepten, Konzepten, die die Rolle der Nutzer aktiv einbeziehen oder im Kontext der Sektorkopplung von Bedeutung. Ziel dieses Beitrages ist es, vor diesem Hintergrund den vorhandenen Status Quo der bestehenden Forschungslandschaft aus dem Blickwinkel von digitalen Werkzeugen zu analysieren.

Der Entwicklungsprozess von digitalen Werkzeugen im Rahmen dieser Forschungsprojekte wurde bereits häufig durch ein breites Fachpublikum aus Wissenschaft und Praxis diskutiert (BF-EWB, 2016; BF-EWB, 2017; Clarke and Hensen, 2015). Neben einem mangelnden Bezug zu den Anwendern und damit einhergehend zu verbessernden Forschungstransfer der entwickelten digitalen Werkzeuge in die Praxis wurden auch die zu verbessernde Transparenz und Übersicht über die aktuellen Entwicklungen im Rahmen von Forschungsprojekten thematisiert. Letzteres adressiert einen Forschungsbedarf, dem mittels Querschnittsmethodik begegnet werden kann. Auf der Grundlage einer seitens der wissenschaftlichen Begleitforschung erarbeiteten umfassenden Datenlage zu den Entwicklungen von softwarebasierten Lösungsansätzen und Anwendungen von digitalen Werkzeugen soll im Rahmen des vorliegenden Beitrags eine Übersicht über die Forschungsprojekte geschaffen werden. Die Auswertungen basieren auf einer Datenerhebung mittels eines Online-Fragebogens der Begleitforschung, bei dem insgesamt 763 Forschungsprojekte angeschrieben wurden. Von den angeschriebenen Projekten haben 536 Teil- und Verbundprojekte an der Datenerfassung teilgenommen.

WISSENSCHAFTLICHE BEGLEITFORSCHUNG ENERGIEWENDEBAUEN

Um eine inhaltliche Vernetzung und einen reichsübergreifenden Informationsaustausch zu gewährleisten, wurden die untereinander abhängigen Förderinitiativen in dem übergeordneten Forschungsnetzwerk ENERGIEWENDEBAUEN zusammengefasst. Zur Unterstützung der Vernetzung aller vom BMW geförderten Projekte im Forschungsbereich Energie in Gebäuden und Quartieren wurde die wissenschaftliche Begleitforschung ENERGIEWENDEBAUEN (BF-EWB) initiiert. Das interdisziplinär aufgestellte Forschungsteam bestehend aus zwei Instituten der

RWTH Aachen University und drei Forschungsinstituten der Fraunhofer Gesellschaft ermöglicht durch eine breite und schwerpunktübergreifende Ausrichtung eine engere Verzahnung sämtlicher geförderter Projekte (BF-EWB, 2018). Neben der Identifikation und Formulierung von zentralen Forschungsfragestellungen, Technikscouting und Trendanalysen, gehören u.a. projektübergreifende Auswertungen zu den Aufgabenbereichen der BF EWB. Die sogenannten Tiefenbohrungen vermitteln einen Einblick in und einen Überblick über die aktuellen Entwicklungen in der Forschungslandschaft. Eine besondere Stellung im Rahmen dieser Forschungsprojekte nimmt die querschnittsübergreifende Entwicklung von softwarebasierten Lösungsansätzen und Anwendungen von digitalen Werkzeugen ein. Gegenwärtige Fragestellungen im Bereich von Gebäuden und Quartieren haben eine hohe Komplexität, weswegen die Entwicklung von digitalen Werkzeugen häufig zum Lösungsansatz der übergeordneten Forschungsfragestellung selbst wird. Insbesondere im Quartiersbereich sind auf dem Markt zur Bearbeitung der Fragestellungen keine digitalen Planungswerkzeuge verfügbar, womit eine Toolentwicklung notwendiger Bestandteil eines Vorhabens ist.

METHODIK

Um eine effiziente Abfrage von Informationen zu ermöglichen und dennoch die Heterogenität von Forschungsprojekten hinreichend genau abbilden zu können, wurde durch das Konsortium eine themenübergreifende Datenerhebung mit einer impliziten Bedingungslogik entwickelt. Im Zuge dieser Informationsabfrage werden Projektleiter von Forschungsprojekten angeschrieben, die in den Sachbereich der Begleitforschung fallen, und gebeten Informationen zu ihrem Verbund- oder Teilprojekt bereitzustellen. Diese Informationen werden über einen Online-Fragebogen erfasst und dienen später als Datengrundlage für diverse Analysen der Querauswertung und Tiefenbohrungen. Im Ergebnis sollen dadurch neue Fragestellungen für die Forschung identifiziert und Einblicke in die Forschungslandschaft gewährt werden. Öffentlich zugängliche Projektinformationen sind zudem über die "Landkarte der Projekte" im Internetportal ENERGIEWENDEBAUEN abrufbar.

Der Online-Fragebogen ist unterteilt in mehrere thematische Abfragen, die aus einer Einordnung

der Forschungsschwerpunkte in Kategorien einen individuellen Abfrageverlauf ergeben. Unter den Kategorien werden relevante thematische Schwerpunkte zusammengefasst, wie beispielsweise Forschungsprojekte mit einem besonderen Augenmerk auf neue Technologien, Versorgungsnetze, Gebäude oder Quartiere. Die Entwicklung von softwarebasierten Lösungsansätzen und Anwendung von digitalen Werkzeugen nimmt dabei aus mehreren Gründen in der Umfrage eine Sonderstellung ein. Zum einen findet die Anwendung von digitalen Werkzeugen in einem Forschungsprojekt häufig parallel statt und zum anderen stellen neuentwickelte softwarebasierte Lösungsansätze nicht selten eine Verknüpfung und Kopplung bestehender Rechenkerne und -modelle dar, etwa über eine modell- oder datenseitige Kopplung (van Treeck, 2014).

Für eine repräsentative Darstellung der Forschungsaktivitäten muss daher zunächst in der Datenerhebung zwischen Anwendern und Entwicklern differenziert werden. Während die Abfrage von Metainformationen zu Anwendungen kategorieübergreifend erfolgt, bilden Entwicklungen von softwarebasierten Lösungsansätzen einen eigenen Forschungsschwerpunkt und werden daher in einer eigenständigen Kategorie zusammengefasst. Die Anwendung von digitalen Werkzeugen kann hingegen in jedem Forschungsprojekt zum zentralen Gegenstand des Vorhabens werden, weswegen die Abfrage von Informationen unabhängig von der Kategorie und somit querschnittsübergreifend erfolgen muss. Forschungsprojekte, die sich beispielsweise mit der Nutzung thermischer Aquiferspeicher für die Wärme- und Kälteversorgung von Stadtquartieren beschäftigen, können genauso wie Forschungsprojekte, die robuste Planungsmethoden für Energiesysteme auf Netzebene entwickeln, im Zuge der Bearbeitung der Forschungsfragestellung auf digitale Werkzeuge zurückgreifen bzw. eine Entwicklung von softwarebasierten Lösungsansätzen anstreben.

Des Weiteren muss in der Datenerhebung berücksichtigt werden, dass Entwickler andere Metainformationen als Anwender benötigen. Dadurch, dass in der Anwendung digitale Werkzeuge zum Einsatz kommen, die sich bereits in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium befinden, kann jede Anwendung trennscharf über den Namen abgefragt werden. Außerdem kön-

nen oberflächlich weitere Informationen zum Anwender und zur Software erfasst werden. Dem gegenüber befinden sich die softwarebasierten Lösungsansätze in einer unvollendeten Entwicklungsstufe, weswegen zwar vertiefte software-spezifische Informationen abgefragt werden können, dies jedoch nur auf übergeordneter Projektebene erfolgen und nicht trennscharf für jede Entwicklung im Verbundprojekt erfasst werden kann.

Die Ergebnisse, die im Folgenden vorgestellt werden, basieren auf dem ersten Durchlauf des Online-Fragebogens, bei dem die Projektleiter in der Bearbeitungszeit vom 9. Mai bis 7. August 2017 die Möglichkeit hatten den Online-Fragebogen auszufüllen. Insgesamt wurden 763 Teilprojekte angeschrieben, wovon 277 Teilprojekte an der Umfrage teilgenommen haben. Insgesamt 83 Verbundprojekte hatten die Möglichkeit gewählt, ihren Fragebogen stellvertretend für alle Teilprojekte des jeweiligen Verbundvorhabens, koordiniert über einen Konsortialpartner, auszufüllen. Insgesamt wurden 406 Datensätze abgeschlossen, entsprechend 76% der gesamten Rückmeldungen. Von den 130 fehlenden Antworten, entsprechend 24% aller Forschungsprojekte, konnten 67 Teilprojekte einem Verbundpartner bzw. Verbundprojekt zugeordnet werden. Somit gibt es insgesamt von 63 Teilprojekten keine Daten, was einem Anteil von 10% an allen 763 Teilprojekten entspricht. Aus Sicht der wissenschaftlichen Begleitforschung stellt dies eine sehr gute Ausgangsbasis für eine Auswertung dar.

TERMINOLOGIE

Grundsätzlich soll an dieser Stelle zunächst kein Versuch unternommen werden, eine einheitliche Definition von digitalen Werkzeugen bzw. softwarebasierten Lösungsansätzen zu formulieren. Dennoch ist eine klare begriffliche Abgrenzung notwendig, um die Ergebnisse der Analyse im Kontext der zugrundeliegenden Terminologie reflektieren zu können. Allgemein handelt es sich bei Software um „Computerprogramme, Verfahren und möglicherweise damit verbundene Dokumentation und Daten zum Betrieb eines Computersystems“ (IEEE Std 610.12-1990). Vor dem Hintergrund dieser Definition folgt eine kurze Diskussion und Abgrenzung der Begriffe „Softwarebasierter Lösungsansatz“ und „Digitales Werkzeug“.

In diesem Zusammenhang präsentiert Abbildung 1 den Entwicklungsprozess einer Organisation in der graphischen Struktur eines Trichters. Die Begriffe „Softwarebasierter Lösungsansatz“ und „Digitales Werkzeug“ lassen sich in erster Linie durch den aktuellen Status des Entwicklungsprozesses differenzieren. *Softwarebasierte Lösungsansätze* entstehen in der Entwicklungsphase und greifen auf bereits bestehende oder entwickelte Methoden aus der Grundlagenforschung zurück. Ins Verhältnis gesetzt zu Software, stellen softwarebasierte Lösungsansätze eine unvollendete und unausgereifte Entwicklungsstufe einer Software dar. Ähnlich zu Software sind softwarebasierte Lösungsansätze in ihrer Natur amorph und universell, sodass bereits bestehende Lösungsansätze kombiniert einen neuen Lösungsansatz ergeben. Die Fortentwicklung dieser Lösungsansätze findet in der betrachteten Stichprobe primär im Rahmen von Forschungsprojekten statt. Die Erhebung der Metadaten (Information über Zielgruppen, Anwendungsschwerpunkte, etc.) zu den Entwicklungen im Rahmen eines Forschungsprojektes werden wie bereits erwähnt über eine eigene Kategorie abgefragt.

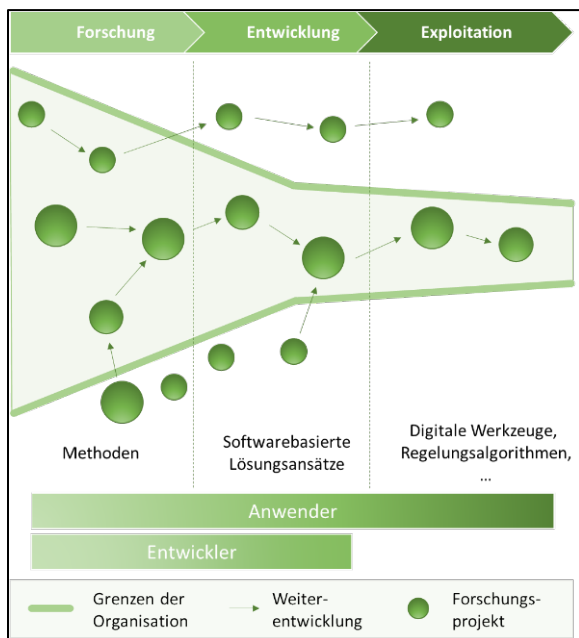


Abbildung 1: Phasen des Entwicklungsprozesses

Die Erzeugnisse aus der Entwicklung von softwarebasierten Lösungsansätzen können vielfältig sein. So kann das Ergebnis ein validiertes Wärmepumpen-, Fensteröffnungsmodell, ein Regelungsalgorithmus zur prädiktiven Regelung von Wärme- und Kälteanlagen oder ein digitales

Werkzeug zur Co-Simulation sein. In der aktuellen Analyse zu Anwendungen wird der Fokus auf digitale Werkzeuge gelegt, die sich insbesondere durch eine Benutzerschnittstelle (UI) abgrenzen und einen hohen Grad der Verbreitung bei Anwendern haben. Regelungsalgorithmen, Modelle, etc. werden in der Datenerhebung in weiteren Kategorie zusammengefasst und finden nur implizit Eingang in diese Auswertung. Es können beispielsweise in MATLAB oder LabView entwickelte Modelle und Algorithmen verwendet worden sein, zu denen jedoch keine weiteren Informationen gegeben wurden.

ERGEBNISSE

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse aus der Auswertung der Datenerhebung von 2017 präsentiert und diskutiert.

Querschnittsübergreifende Relevanz von Entwicklungen

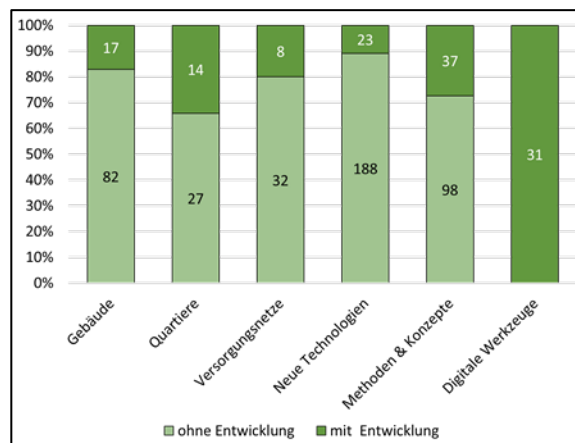


Abbildung 2: Entwicklung von softwarebasierten Lösungen in Forschungsprojekten

Von den insgesamt 406 abgeschlossenen Datensätzen haben insgesamt 130 Verbund- oder Teilvorhaben angegeben, dass im Rahmen des Forschungsprojektes ein softwarebasierter Lösungsansatz entwickelt wird. Umgerechnet entspricht das ca. einem Drittel (32%) aller Forschungsprojekte und veranschaulicht in diesem Zusammenhang die themenübergreifende Relevanz von Entwicklungsaktivitäten in Forschungsprojekten.

Insgesamt beschäftigen sich 31 von 130 Teil- oder Verbundvorhaben mit der *Entwicklung* von digitalen Werkzeugen ohne die explizite Angabe eines weiteren thematischen Schwerpunktes des Forschungsvorhabens. Dies bedeutet allerdings nicht, dass diese Forschungsprojekte keinen

konkreten Anwendungsfall aus den genannten Themenfeldern behandeln. Ein Forschungsprojekt könnte Planungsinstrumente für zukünftige Niedertemperatur Fernwärmeversorgungssysteme entwickeln und würde so im engen Zusammenhang zu dem Schwerpunkt Versorgungsnetz stehen, ohne beispielsweise konkret im Rahmen des Projektes ein Versorgungsnetz zu optimieren. Die restlichen 99 Verbund- oder Teilvorhaben verteilen sich auf fünf weitere Forschungsschwerpunkte und verdeutlichen, dass ein großer Anteil der Entwicklungen in das Umfeld eines anwendungsorientierten Forschungsprojekts integriert ist. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt entwickelt beispielsweise in einem Verbundvorhaben (03ET1405A) ein Messverfahren für schnelle und genaue energetische Analysen von Gebäudehüllen und Identifikation von erhöhten Energieverlusten. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Entwicklung neuartiger softwarebasierter Lösungen einen signifikanten Anteil in der Forschungslandschaft einnehmen und ein unausgeschöpftes Entwicklungspotential in diesem Forschungsbereich signalisieren. Gleichzeitig lässt sich aus der Grafik schließen, dass die Entwicklung von softwarebasierten Lösungsansätzen bereits in ein anwendungsorientiertes Problemumfeld integriert ist. Teilbereiche können ohne eine begleitende Werkzeugentwicklung nicht bearbeitet werden, da geeignete Ansätze nicht marktverfügbar sind.

Typologie softwarebasierter Lösungsansätze

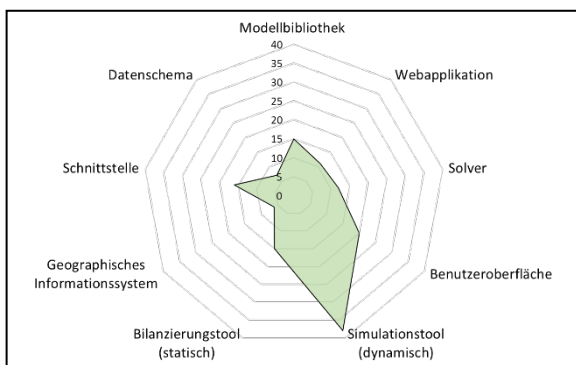


Abbildung 3: Klassifizierung von softwarebasierten Lösungsansätzen

Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, kristallisiert sich bei näherer Typisierung der softwarebasierten Lösungsansätze ein eindeutiger Schwerpunkt der derzeitigen Entwicklung heraus. Die Entwicklung von dynamischen Simulationsverfahren hebt sich mit einem Anteil von 45% sichtbar von allen Entwicklungen ab und verdeutlicht, dass die

Komplexität der Probleme im Bereich der Energiewende durch eine statische Betrachtungsweise nicht mehr hinreichend genug gelöst werden kann. Gleichzeitig unterstreicht dies die Forderung nach Standards für die modell- und datenseitige Kopplung von Werkzeugen, um einen hohen Integrations- und Weiterverwendungsgrad sicherzustellen und Doppelförderungen zu vermeiden.

Anhand der folgenden zwei Beispiele soll demonstriert werden, dass die Implementierung dynamischer Simulationsverfahren in den einzelnen softwarebasierten Lösungen sehr unterschiedliche Ausprägungen annehmen kann. In einem Verbundvorhaben (03ET1372A) an dem sich das Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen beteiligt, wurde beispielsweise ein Ansatz zur Modellierung des Verhaltens von Gebäuden und Energiesystemen mit Hilfe von Grey-Box-Modellen gewählt, mit dem übergeordneten Projektziel, präzise Vorhersagemodellen zur kurzfristigen oder langfristigen Prognose des zukünftigen Energieverbrauchs im Gebäude zu entwickeln. In einem weiteren Verbundvorhaben unter Mitwirkung des Fraunhofer Instituts für offene Kommunikationssysteme (03ET1312A) wird an softwarebasierten und dynamischen Planungs- und Steuerungstechniken zur optimalen Abstimmung von Systemkomponenten im Betrieb für eine nachhaltige und wirtschaftliche Nutzung von dezentralen Energiesystemen geforscht. An Beispiel der beiden Forschungsprojekte lässt sich zusammenfassend festhalten, dass sich die konkreten Entwicklungen hinsichtlich der betrachteten Lebenszyklusphasen und modellierten Ebenen des Gesamtsystems unterscheiden. Letzteres spielt in Hinblick auf die Genauigkeit eine hervorgehobene Rolle, denn durch das Zusammenführen verschiedener Ebenen wird das Gesamtsystem genauer beschrieben, wodurch eine realitätsgetreue Vorhersage von Prozessen und Modellen möglich wird. Im weiteren Verlauf werden die Ebenen Netz, Quartier, Gebäude etc. als Skalen bezeichnet und näher betrachtet.

Tendenz zur Multi-Skalen Modellierung

Abbildung 4 veranschaulicht die relevanten Skalen und Ebenen bei der Modellierung von softwarebasierten Lösungsansätzen und schlüsselt diese nach Häufigkeit der Ausprägung auf. Besonders stark ausgeprägt ist die Entwicklung von softwarebasierten Lösungen für das Gebäude

(44%) und die Anlagentechnik (43%) wohingegen die Entwicklung von softwarebasierten Lösungsansätzen für Bauteilkomponenten, Netze oder Quartiere weniger im Fokus stehen. Aus der Abbildung geht jedoch nicht hervor, ob die Skalen isoliert oder kombiniert modelliert werden.

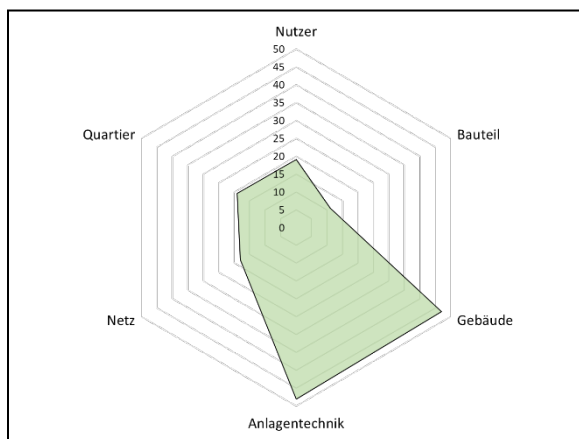


Abbildung 4: Spektrum der Modellierung

Abbildung 5 greift den zuletzt genannten Aspekt auf und schlüsselt die Anzahl der kombinierten Skalen in einem softwarebasierten Lösungsansatz nach der absoluten Häufigkeit auf. Die gekoppelte Betrachtung von mehreren Skalen nimmt mit 62% einen hohen Anteil an allen Entwicklungen ein und deutet darauf hin, dass tendenziell die Modellierung multipler Skalen stark an Bedeutung gewinnt. Dabei hat insbesondere die gekoppelte Betrachtung von zwei Skalen, wie zum Beispiel eines Gebäudes in Verbindung mit der Anlagentechnik, mit 36% einen hohen Anteil, wohingegen softwarebasierte Lösungsansätze für die holistische Modellierung des Gesamtsystems noch komplett fehlen.

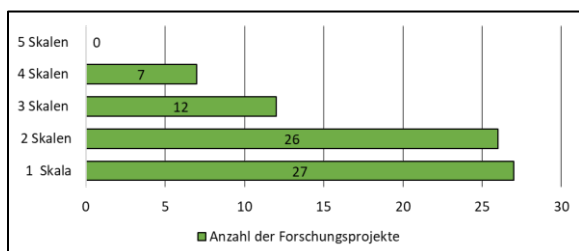


Abbildung 5: Skalen der Modellierung

Letzteres hängt möglicherweise mit dem Fehlen fundierter methodischer Ansätze zur systemischen Bewertung oder mit der fehlenden Vorgabe, modell- und datenseitige Kopplung von Methoden und Werkzeugen einzufordern, zusammen. In einem Verbundvorhaben an dem sich das Zentrum für innovative Energiesysteme

(03ET1464A) beteiligt wird zum Beispiel eine Software zur gekoppelten Simulation von Gebäuden und Anlagen zur Kühlung, basierend auf flüssigen Übertragungsmedien, weiterentwickelt und um luftgestützte Systeme, größere Leistungsklassen und solare Kühlung mit Photovoltaik-Modulen in Kombination mit elektrischen Kältemaschinen ergänzt.

In einem weiteren Verbundvorhaben „Living Roadmap“ wird unter der Mitwirkung der RWTH Aachen ein ganzheitliches planungs- und betriebsunterstütztes Instrument entwickelt, das insgesamt vier Skalen abdeckt und durchgängig von der Konzeptentwicklung, dem Betrieb, der Nutzereinbindung bis hin zur Potentialermittlung für Investitionen genutzt werden kann. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Trend bei der Modulierung weg von der Betrachtung isolierter Teilsystemen, hin zu multi-skalen Abbildung des dynamisch-technischen Verhaltens eines Gesamtsystems (Nutzer – Bauteil – Gebäude – Anlagentechnik – Netz – Quartier) geht.

Programmiertechnische Umsetzung

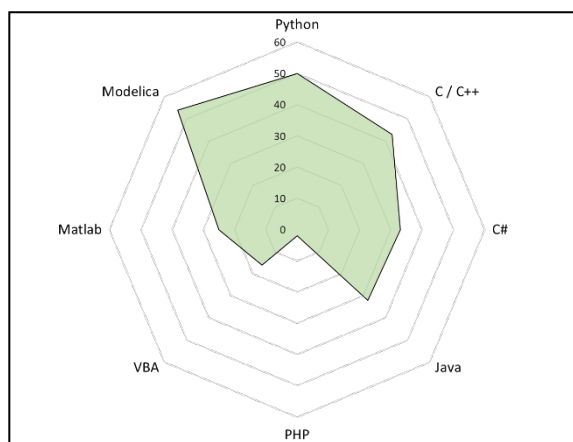


Abbildung 6: Verwendete Programmiersprachen in der Entwicklung

Abbildung 6 veranschaulicht die zur Formulierung von Datenstrukturen und Algorithmen verwendeten Programmiersprachen. Am häufigsten wurde die objektorientierte Modellierungssprache Modelica für physikalische Systeme verwendet. Diese eignet sich etwa für die Modellierung von komplexen Simulationsmodellen und damit für den hier diskutierten Schwerpunkt der Entwicklung. Darüber hinaus werden objektorientierte Programmiersprachen C/C++ und Python verstärkt angewendet. Skriptsprachen wie PHP, JAVA oder PERL finden keine oder nur sehr geringe Verwendung.

Lizenzierung und Zielgruppen

Ingenieurbüros sind mit 32% die am häufigsten angepeilte Zielgruppe von Entwicklern. Neben den Ingenieurbüros bilden Wissenschaft und Forschung selbst (29%), Architekten (13%), Energieversorger (12%), Stadtplaner und Wohnungsbau-gesellschaften (jeweils 7%) mögliche Zielgruppen. Von allen 130 Forschungsprojekten, in denen softwarebasierte Lösungsansätze entwickelt werden, haben insgesamt nur 40% Angaben zu Nutzungsrechten gemacht. Dies ist insofern interessant, als bei den Befragten einerseits eine klare Vorstellung der Zielgruppen besteht, andererseits offensichtlich ein Mangel an Vorstellung, wie diese erreicht werden sollen. Dies kann mit der experimentellen Natur von Forschungsprojekten zusammenhängen und der Ungewissheit der technologischen Anschlussfähigkeit, auf geringes Kommerzialisierungsbestreben der Entwickler oder geringe Skalierbarkeit der Entwicklungen hinweisen. Dieser Aspekt ist noch nicht ausreichend geklärt und wird daher Gegenstand der weiteren Querauswertung sein.

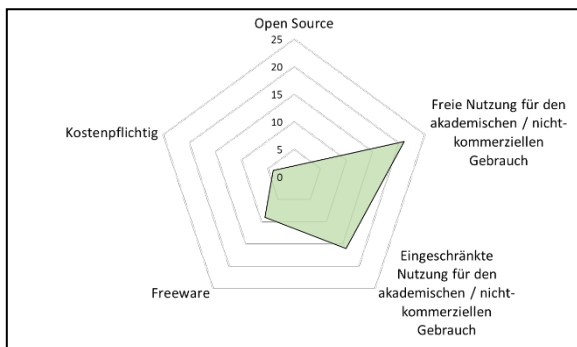


Abbildung 7: Lizenzierung

Abbildung 7 veranschaulicht in diesem Zusammenhang die Häufigkeit verschiedener Lizenzmodelle bei softwarebasierten Lösungsansätzen. Ein großer Anteil von Forschungsprojekten strebt demnach eine freie Nutzung für den akademischen und nicht kommerziellen Gebrauch an (40%). Eine Veröffentlichung des Quelltextes unter einer Open Source Lizenz wird jedoch nur von den wenigstens Institution in Erwägung gezogen (3%). Dies stellt beispielsweise einen fundamentalen Unterschied zur Forschung im US-amerikanischen Markt dar, bei dem oftmals die Bereitstellung von wissenschaftlicher Software als Open Source Lösung praktiziert und damit eine hohe internationale Sichtbarkeit erreicht wird. Ein prognostizierter Paradigmenwechsel von der Einzeltoolentwicklung hin zu integrativen Ansätzen (evtl. auch als Open Source), der im

Rahmen des EnOB Symposiums 2014 formuliert wurde (van Treeck et al., 2014), konnte bisher nur in Einzelfällen beobachtet werden.

Auswertung: Zielgruppen und Anwendung

Neben der Entwicklung wird die Anwendung von digitalen Werkzeugen häufig als ein zentraler Gegenstand der Forschungsprojekte gesehen. Rund die Hälfte aller Befragten gaben an, dass die Anwendung von digitalen Werkzeugen eine hervorgehobene Rolle im Forschungsprojekt spielt. Anwendungen finden dabei querschnittsübergreifend und parallel statt. Im Schnitt werden zwischen 4 bis 5 digitale Werkzeuge in einem Forschungsprojekt parallel eingesetzt. Dies zeigt zum einen, dass zur Bearbeitung der komplexen Aufgabenstellungen bisher kein Softwarehersteller eine Komplettlösung anbietet. Zum anderen folgt daraus, dass Interoperabilität bei der Lösung von Mehrskalen- und Mehrebenenproblemen in unterschiedlichen Domänen, im Sinne von einer datenseitigen und modellseitigen Kopplung von digitalen Werkzeugen, eine besondere Bedeutung zukommt (van Treeck et al., 2014). In diesem Zusammenhang zeigt Tabelle 1, dass ungefähr 70% der eingesetzten Anwendungen proprietär und kostenpflichtig sind. Lediglich 30% entfallen auf Freeware (11,2%) und auf Open Source Lösungen (19,2%). Diesbezüglich spielen Anbieter proprietärer Software ihre Vorteile hinsichtlich Benutzerfreundlichkeit aus, die sich häufig aus einer zeiteffizienten Bedienung, Transparenz hinsichtlich der Validierung sowie Aufbereitung der Ergebnisse und technischem Support ergeben. Dadurch stoßen proprietäre Softwareanbieter eines digitalen Werkzeugs auf höhere Akzeptanz und damit einhergehend breitere Anwendung. Dabei ordneten sich ca. 80% der Anwender der Wissenschaft und Forschung zu. Es folgen Ingenieurbüros (10%), Betreiber (4%), Architekten (2%), Energieversorger (2%) und Wohnungsbau-gesellschaften (1%).

Tabelle 1: Verteilung der genutzten Lizenzierungsmodelle

Lizenzierungsmodell	Proprietär Software	Freeware	Open Source
Prozentualer Anteil [%]	69,6	11,2	19,2

Schlussfolgernd lässt sich zunächst anmerken, dass die Ergebnisse zur Anwendungen digitaler Werkzeuge stark die Gewohnheiten aus Sicht der

Wissenschaft und Forschung reflektieren. Damit ist der untersuchte Querschnitt zwar nicht repräsentativ für Anwender aus der Praxis, er bildet jedoch eine spezielle Gruppe von frühzeitigen Anwendern ab, die die neusten technischen Errungenschaften für die Problemstellungen im Bereich Energie in Gebäuden und Quartieren einsetzen. Die Anwendung von digitalen Werkzeugen wird dort von proprietären und kommerziellen Anbietern mit 1,81 digitalen Werkzeugen pro Forschungsprojekt dominiert, wobei Freeware (1,31) und Open Source (1,48) Lösungen zum festen Repertoire dazugehören.

Zu einer Anwendung von digitalen Werkzeugen kommt es beispielsweise in einem Verbundvorhaben, an dem sich die Technische Universität Chemnitz (03ET1230B) beteiligt und neuartige oberirdische Tankspeicher in Segmentbauweise entwickelt. Dabei kommt es zum kombinierten Einsatz von verschiedenen numerischen Simulationswerkzeugen, wie zum Beispiel CFX, MATLAB, TRNSYS, Delphin und OpenFOAM. In einem weiteren Forschungsprojekt unter der Mitwirkung der Hochschule Zittau/Görlitz (03ET1363A) werden modulare Latentwärmespeicherelemente für Kaminöfen wärmetechnisch mit Hilfe von OpenFOAM ausgelegt und

konventionell mit Excel ausgewertet. Beide Beispiele verdeutlichen hochtechnologische Anwendungsfälle. Für eine detaillierte Analyse der Anwendungen wurde auf der Grundlage einer Bestandsaufnahme von digitalen Werkzeugen eine Netzwerkanalyse durchgeführt, deren Ergebnisse im Verlauf näher betrachtet werden.

Digitales Ökosystem der Anwendung

Auf der Grundlage der Datenerhebung kann eine Bestandsaufnahme der in Forschungsprojekten konkret eingesetzten digitalen Werkzeuge gemacht werden. Aus diesen Angaben können Beziehungen, übergeordnete nutzerspezifische Muster und Toolketten sichtbar gemacht werden. Das digitale Ökosystem der Anwendungen ist in Abbildung 8 exemplarisch anhand eines Graphen abgebildet. Die Knoten repräsentieren ein digitales Werkzeug, wobei die Größe und die Farbe mit der absoluten Häufigkeit der Nennungen einhergehen. Eine Kante entsteht aus der gemeinsamen Nennung von digitalen Werkzeugen. In diesem Fall bildet der Graph nicht die Möglichkeit ab, dass Werkzeuge über gemeinsame Schnittstellen gekoppelt werden können.

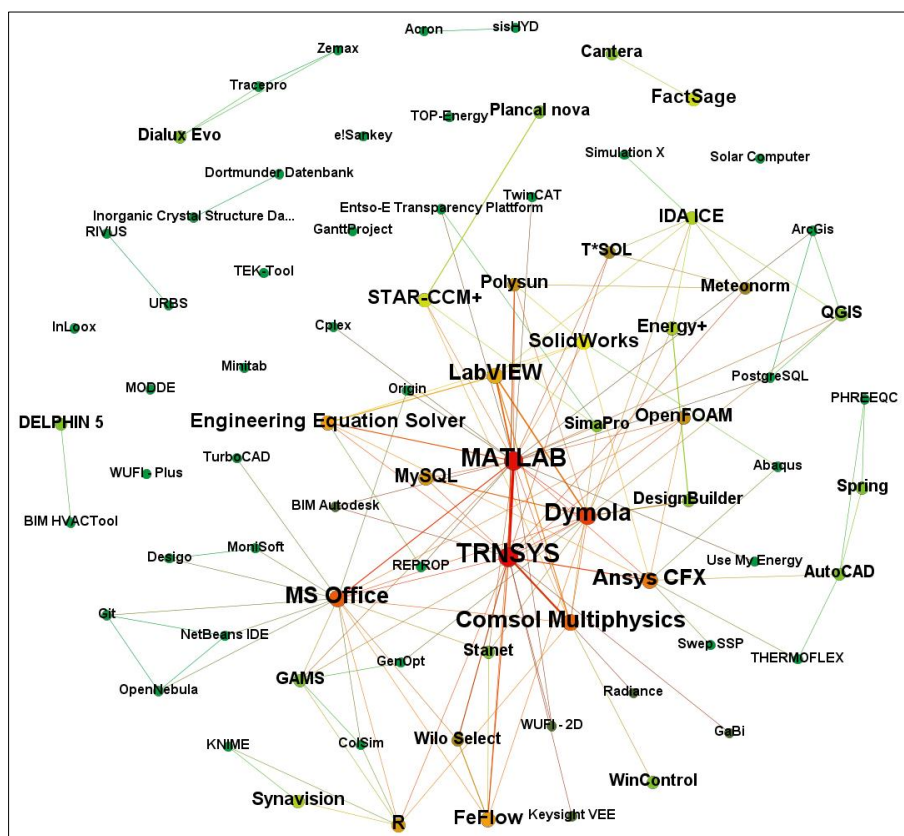


Abbildung 8: Netzwerkanalyse des Tools-Ökosystems der EWB-Forschungsprojekte

Die Knoten werden so angeordnet, dass Knoten höheren Grades (d.h. mit mehr ausgehenden Kanten und somit mit mehr nutzerspezifischen Verbindungen) näher ins Zentrum der Darstellung rücken. Je häufiger ein digitales Werkzeug in Kombination mit anderen verwendet wird, desto zentraler ist die Position dieses Werkzeugs im Netzwerkdiagramm. Werkzeuge und Software mit einer breiten und häufig kombinierten Anwendung finden sich im Zentrum wieder, wohingegen Insellösungen und Nischenanwendungen den Rand der Darstellung prägen.

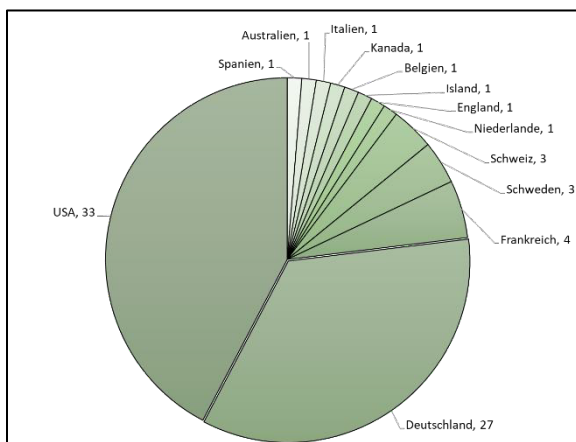


Abbildung 9: Verteilung von Entwicklungsstandorten nach Toolanzahl

Auf der Grundlage der erhobenen Daten wurden die Entwicklungsstandorte der in Forschungsvorhaben eingesetzten digitalen Werkzeuge ausgewertet. Abbildung 9 schlüsselt die Anzahl der digitalen Werkzeuge nach dem Entwicklungsstandort auf. Die Mehrzahl der Anwendungen lassen sich ihren Ursprungsländern USA (33), Deutschland (27) und Frankreich (4) zuordnen. Aus der Gegenüberstellung von Standorten mit nutzerspezifischen Verbindungen lassen sich Schlüsse über nationale Unterschiede von digitalen Werkzeugen ziehen. Aus dem Verhältnis der kumulierten Verbindungsanzahl und der kumulierten absoluten Häufigkeit der digitalen Werkzeuge eines Standortes lässt sich ein gewichteter Vernetzungsgrad herleiten. Der Vernetzungsgrad gibt Aufschluss über die Rolle der digitalen Werkzeuge im Netzwerk. Ein hoher Vernetzungsgrad trifft auf digitale Werkzeuge zu, die systemrelevant für das Ökosystem sind. Im Umkehrschluss deutet hingegen ein geringer Vernetzungsgrad auf leicht substituierbare und spezialisierte Insellösungen hin. Anwendungen aus den USA und Frankreich haben einen höheren Vernetzungsgrad und fungieren als Ökosystem für

andere Anwendungen, wohingegen digitale Werkzeuge aus Deutschland einen geringen Vernetzungsgrad aufweisen und somit eher als spezialisierte Insellösungen charakterisiert werden können. Als Ursache kann unter anderem die in Deutschland bislang zu wenig verfolgte Strategie offener und frei zugänglicher Lösungen und die damit einhergehende fehlende internationale Sichtbarkeit identifiziert werden. Weitere Hemmnisse bestehen in fehlenden Schnittstellenvorgaben die standardisierte digitale modell- und datenseitige Kopplung zwischen Planungswerkzeugen, Algorithmen und Methoden.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Entwicklung von softwarebasierten Lösungsansätzen und die Anwendung von digitalen Werkzeugen nimmt bei der Bearbeitung von komplexen Fragestellungen im Rahmen von Forschungsprojekten einen hohen Stellenwert ein. Die hohe Fragmentierung und Heterogenität dieser Entwicklungen führt oftmals zur Intransparenz und sorgt häufig für Kontroversen hinsichtlich der Rolle von Forschungsprojekten bei der Softwareentwicklung. Im Rahmen dieser Veröffentlichung wurde ein übergeordneter Einblick in die Entwicklungsaktivitäten und Anwendung gegeben. Neben einer eindeutigen terminologischen Abgrenzung wurde die querschnittsübergreifende Relevanz von Softwareentwicklung im Rahmen von Forschungsprojekten, eine Typologie von softwarebasierten Lösungsansätzen, eine Tendenz zur Multi-Skalen Modellierung, die programmiertechnische Umsetzung, Lizenzierungsmodelle und das digitale Ökosystem der Anwendung diskutiert. Anknüpfungspunkte für weiteren Forschungsbedarf bilden Fragestellungen bezüglich der Rolle der Entwicklung von Software, Planungswerkzeugen, Algorithmen und computerbasierten Methoden im Rahmen von Forschungsprojekten im gesamtwirtschaftlichen Kontext, Fördermodelle für einen besseren Forschungs- und Technologietransfer, wie integrale Entwicklungsansätze zur synergetischen Softwareentwicklung, Open Source Ansätzen und Vorgaben zur modell- und datenseitigen Kopplung, und damit auch dem Umgang mit Redundanzen. Der heute bereits praktizierte Kernaspekt der anwendungsorientierten Entwicklung zusammen mit der gleichzeitigen Demonstration in der Praxis erscheint hierfür ein richtiger

Ansatz. Diese Forderungen finden sich auch als Ergebnis der Expertenkonsultation im kommenden 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem deutschen Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die finanzielle Unterstützung des Projektes „BF2016: Wissenschaftliche Begleitforschung im Forschungsbereich 'Energie in Gebäuden und Quartieren'- Schwerpunkt: Koordination, Wissenschaftliche Beratung und Datenbank“ (FKZ 03ET1388A) im Rahmen des sechsten Energieforschungsprogrammes. Des Weiteren danken die Autoren allen Teilnehmern, die am ersten Durchlauf im Bearbeitungszeitraum des Fragebogens vom 9. Mai bis 7. August 2017 teilgenommen und durch Ihre Teilnahme eine querschnittsübergreifende Auswertung ermöglichen konnten.

LITERATUR

BF-EWB: Forschung energieeffizienter Sanierungsmaßnahmen: Dokumentation des 1. Projektleitertreffens: Aachen, 24.-25. November 2016. Schriftenreihe Energiewendebauen, Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen, RWTH Aachen University, 2016

BF-EWB: Integrales planen, bauen und betreiben: Dokumentation des 2. Projektleitertreffens Lüneburg, 22.-23. Mai 2017. Aachen: Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen, RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, 2017

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Bekanntmachung Forschungsförderung im 6. Energieforschungsprogramm ‚qForschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung‘: BAnz AT 30.12.2014 B1. 8.12.2014

IEEE: IEEE standard glossary of software engineering terminology: Approved September 28, 1990, IEEE Standards Board. New York, NY, 1990

J.A. Clarke, J.L.M. Hensen, Integrated building performance simulation: Progress, prospects and requirements, Building and Environment, Volume 91, 2015, Pages 294-306

van Treeck, Christoph, Florian Antretter, Ingo Heusler, Anton Maas, Andreas Nicolai, Stefan Plesser, Peter Tzschentschler, Karsten Voss und Andreas Wagner: „EnOB-geförderte internationale Forschungsaktivitäten und Software-Tools; Red.schluss: 28. Februar 2014“. Energieinnovationen in Neubau und Sanierung : Neues aus der Forschung für mehr Energieeffizienz, Raumkomfort, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit; 20.- 21. März 2014; Essen, Zeche Zollverein / Markus Kratz. Essen: EnOB, 2014

CONCEPTION AND ASSESSMENT OF TECHNICAL SOLUTIONS FOR THE APPLICATION OF VACUUM GLAZING IN CONTEMPORARY WINDOW CONSTRUCTIONS

U. Pont¹, M. Schuss¹, P. Schober² and A. Mahdavi¹

¹Department of Building Physics and Building Ecology, TU Wien, Austria

²Holzforschung Austria, Vienna, Austria

ABSTRACT

Vacuum glazing products have been seen for some time as a potential alternative to multi-layered insulation glass assemblies. Recently, industrialized production of vacuum glazing has become more common. It is thus likely that in the near future such products would be more frequently deployed in the building sector. While past research efforts mainly focused on the development of the vacuum glass itself, few studies have addressed the construction detailing aspects that need to be considered for windows equipped with vacuum glazing. The present contribution documents the workflow and findings of an ongoing research project, focusing on the design and construction of windows with vacuum glazing. Thereby, multiple aspects of the performance of different frame constructions were taken into consideration. To assess the thermal performance, a two-fold approach was followed: On the one hand, knowledge from previous studies of historic window constructions and their retrofit with vacuum glazing was utilized. On the other hand, numeric thermal bridge simulation was deployed to analyse different frame designs resulting in values of key performance indicators. The contribution reports on *i)* the challenges of information acquisition for generation of vacuum glazing models for thermal bridge simulation, *ii)* the behaviour of various frame design alternatives. The results support a systematic assessment of the advantages and disadvantages of vacuum glass window constructions.

INTRODUCTION

The concept of vacuum glazing was first suggested by Zoller (1913), resulting in a registered patent. Since then multiple attempts in research and development have been made to produce durable evacuated building products. Important milestones include the patent for laser

sealed evacuated glasses in 1987, the production of an evacuated double-layer glass with solder glass edges (Robins and Collins 1989), as well as the developments of evacuation vents and distance pillars by Tang and Collins (see Hohenstein 2017). Figure 1 shows the evacuation vent and pillars in a contemporary vacuum glass.

In recent years, several companies started with the industrial production of vacuum glazing. The term vacuum glazing is typically understood as a glass product consisting of two glass panes with a tight edge seal, and an evacuated interstitial space (pressure levels lower than 0.1 Pa). To maintain the parallelism of the two glass panes, arrays of distance holders (so called pillars) are integrated into the interstitial space. These pillars are constructed of stainless steel or comparable materials, and avoid that the surrounding atmospheric pressure pushes the glass panes against each other.

Such glass products feature a very good thermal performance. This is due to reduced conduction and convection processes as compared to regular insulation glass products. While much research is going on to improve vacuum glazing products, surprisingly few publications focus on the implications of integration vacuum glass in window constructions.



Figure 1: Evacuation vent and distance pillars in a vacuum glass (from the company Synergy/picture credit: Holzforschung Austria).

In a previous research project, the authors focussed on the integration of vacuum glass within existing, traditional casement windows. Such an application can be considered as promising, due to the small thickness of vacuum glazing products that corresponds with the relatively small frame constructions of such windows (Proskurnina et al. 2016, Pont et al. 2017). The application of vacuum glazing in existing windows is regularly approached with the properties of the existing windows (e.g., frame geometry and material) in mind. However, this is not necessarily optimal in view of new window constructions, whose constitutive elements could be tailored for the special properties and requirements of vacuum glass. This contribution thus describes the efforts conducted within a research project ("MOTIVE") focussing on new window constructions with vacuum glass application. This project focussed mainly on the following goals: (i) Development of glass/frame construction joints for timber and aluminium-timber windows that consider the requirements of vacuum glazing; (ii) Departure from the standard solution path for window details such as to conceive new window constructions; (iii) Iterative modelling and simulation of developed construction details via numeric thermal bridge simulation; (iv) SWOT-analysis (strengths-weaknesses-opportunities-threats) of the different developed window constructions.

METHODOLOGY

Window Construction Development

The first ideas and approaches toward new windows with vacuum glazing brought about a whole set of new ideas as well as incentives to revisit older ones. However, the framework of the project rendered it impossible to follow each of these ideas in detail. Thus, it was decided to perform a convergent approach: While the number of evaluated construction designs was reduced with each reduction step, the evaluation depth was increased. The first step in this approach was the generation of **conceptual drafts** to visualize all ideas. These ideas were inspired by contemporary and past window constructions, but also by the technologies for transparent components used in household appliances or in automobiles. The conceptual drafts did focus on the idea itself, rather than on realism or technical feasibility. The next step was the development of **design concepts** based on the most promising conceptual drafts. These included already basic aspects of construction, maintenance, and thermal performance. Subsequently, the most promising design concepts were built as **reduced models**. This step required the detailed consideration of material selection, water proofing, and usability. Based on the previous steps **prototypes** were constructed, which resembled typical windows. Up to this step, constructed models were equipped with regular VSG glass. One of the designs was finally build as a full-scale **mock-up** and equipped with vacuum glass. Figure 2 illustrates this convergent approach in window construction development.

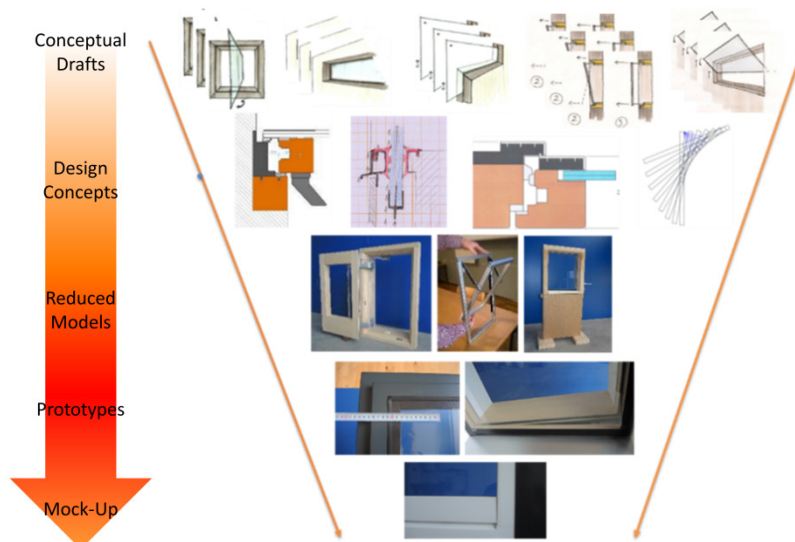


Figure 2: Illustration of the convergent approach (from conceptual drafts to mock-up).

All together 7 different concepts were developed. Table 1 illustrates corresponding window details of these types. Reduced models were made for the types A, B, C, D, E, and F.

Table 1: Developed concepts for new windows employing vacuum glass (illustrations by the authors)

Type	Illustration.
Type A: Side-hung Window opening to the inside	
Type B: Side-hung window opening to the outside	
Type C: Window with horizontal pivot	
Type D: Vertically sliding window	
Type E: Window with offset and slide opening ("bus door")	
Type F: Window with magnet-closing mechanism	
Type G: Offset window with pointwise mounting	

Detailed prototypes were constructed for the types A (in two slightly different designs regarding the positioning of the glass and the frame, denoted as A1 and A2), B, and C. The mock-up was constructed for type A1. The thermal performance was evaluated in detail for the types A, B, and C (under the assumption of a 4-0.15-4 mm vacuum glass). Regarding different prototypes, it should be noted that the frame/glass constructions were intended to feature a progressive architectural appearance and to be less thick than the frames of contemporary high-performance (i.e., triple-glazing insulation glass) windows. Types A and B both offer a "glass-only" optic, which currently cannot be realized with typical, operable high-performance windows.

Thermal bridge simulation

As not all prototypes could be constructed with vacuum glazing, numeric thermal simulation was utilized to assess the thermal performance of the constructions using the application AnTherm (2017). The critical points of the designs pertained to the construction joints between glass and wing, wing and frame, and frame and adjoining construction. There are a number of challenges in performing simulation of vacuum glass windows. An important question was if vacuum glass details always require a (more-complex) 3D-simulation, given that the distance pillars resemble small point thermal bridges, or if two-dimensional simulation would be adequate. Pont and Mahdavi (2017) explored the impact of 2D versus 3D simulation of different details. One of these details was a vacuum glass pane. The results of this study showed that the difference between a full-fledged 3D simulation and an approximated 2D simulation that does not consider the pillars is rather small: Minimum surface temperatures differences were less than 1 Kelvin (given an inside-outside difference of 30 K), and the f_{Rsi} -values, which provide a convenient indicator for condensation risk, showed differences of less than 0.02. Figure 3 and 4 illustrate the results of these considerations. Given the small difference between 2D and 3D results, the construction detail sections examined in this contribution were simulated as 2D details.

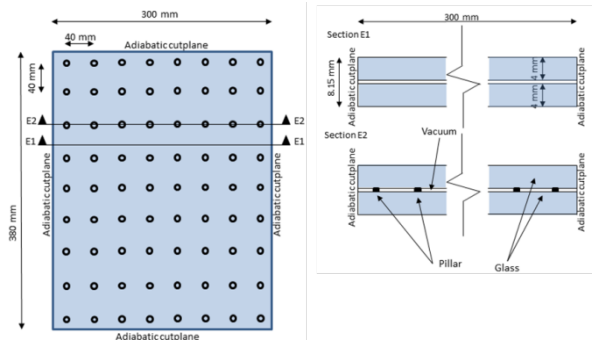


Figure 3: Vacuum glass simulation model (Pont and Mahdavi 2017)



Figure 4: Simulation results of a vacuum glass pane: f_{Rsi} -values (E1 – 2D simulation without pillars, E2 – 2D simulation with pillars, E – 3D – simulation) (Pont and Mahdavi 2017)

Another important issue is the selection of thermal conductivity values and boundary conditions for simulation. Regarding boundary conditions, steady state simulations with interior temperatures of 20°C and exterior temperatures of -10°C were targeted. These conditions resemble the extreme conditions concept as followed by corresponding standards (OENORM 2003, DIN 2014). Regarding surface resistance coefficients, 0.25 m².K.W⁻¹ was set for the inside surfaces, following typical conventions of the thermal bridge simulation literature (e.g. Ward and Sanders 2007). Thermal conductivity values were selected based on material property values from experience and literature. Thereby, the values of the vacuum gap and encapsulated air need to be understood as approximation, as thermal conductance is not the main heat transport energy in these cases. The setting for the vacuum gap was based on the description of the SYNERGY company (Synergy 2018). As every detail contains a number of air gaps (fitting groove, space between seals, etc.), the highest conductivity value of these gaps was determined using the methods suggested in EN ISO 6946 (ISO 2017a) and EN ISO 10077 (ISO 2017b). Table 2 entails an overview of the boundary conditions and thermal conductivity values used for simulation. The window design types A, B, and C were subjected to detailed thermal bridge assessment.

Table 2: Boundary conditions and thermal conductivity of materials

Material	Thermal conductivity λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Aluminium	15
Glass (including glass edge seal)	1.00
Rubber (Seals)	0.20
Wood / Timber	0.11
Silicone	0.35
Glues	0.50
plastic	0.20
vacuum	0.00000975
Encapsulated air	0.10
Material	Temperature [°C]
Interior space	20
Exterior Space	-10
Surface	Surface resistance coefficient [m ² .K.W ⁻¹]
Interior surfaces	0.25
Exterior surfaces	0.04

RESULTS

This section reports on the principle results of the types A (two versions, referred to as version A1 and A2) and B. The two versions of A differ in the positioning of the vacuum glazing in relation to the wings frame (A1 features vacuum glazing on the outer side of this frame, A2 on the inside of the frame). Figure 4 compares the two designs of A. All results are presented by the analysis of a horizontal section through the glass-wing-frame-detail.

Performance of Type A1

Figure 5 shows the prototype of Type A1. Figure 6 illustrates the performance of Type A1 via isotherms and temperature profile curve (of the inner surfaces). The construction shows an acceptable performance. The f_{Rsi} -value of the construction reaches 0.715, which is an acceptable value. The coldest surface point can be found in the area between wing and frame, while glass-timber connection shows a higher temperature. This good performance is related to the fact that the vacuum glass is well protected via a sufficiently deep rebate in the

construction. The window as such can reach a U-value of 0.80 to 0.82 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, depending on the glass edge-seal length (The U-value of the vacuum glass is around 0.57 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$).

In view of the architectural performance and SWOT-analysis, it can be stated that this construction typology features a typical window appearance, slim window frame profiles, a good protection of the glass edges, uncomplicated cleaning and maintenance access, and the possibility to realize an even fit between the fixed frame and the wing frame. Moreover, the window can be considered as rather simple in its principle construction. Compared to triple-glazing windows, the construction features a comparable thermal performance with by far smaller thickness and lower weight. However, the window requires an enamelling for aesthetic reasons in the frame area and is perhaps less innovative as compared to the other types.



Figure 4: A1 (left) and A2 (right).



Figure 5: Prototype of type A1.

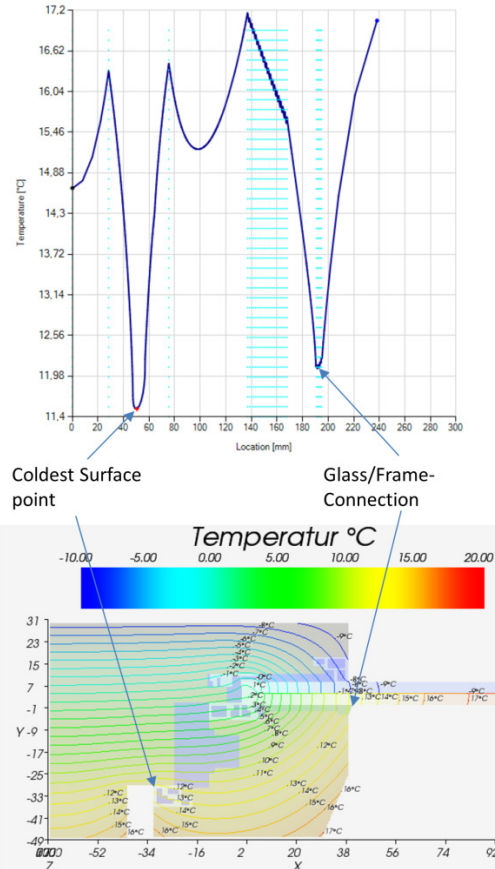


Figure 6: Thermal performance of type A1.

Performance of Type A2

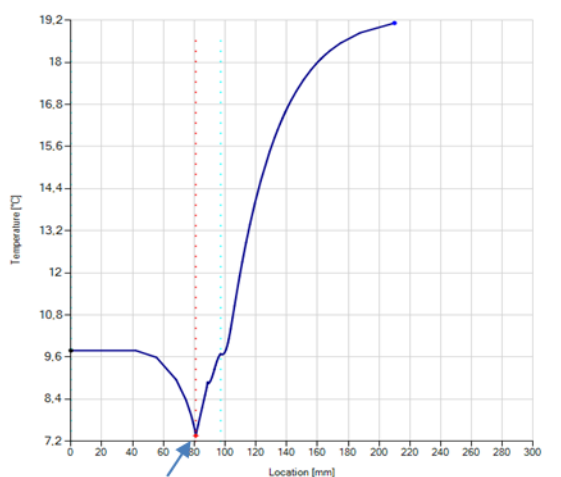
Figure 7 shows the prototype of Type A2. Figure 8 illustrates the performance of Type A2. The thermal performance of Type A2 locates the coldest surface point on the edge of the vacuum glass. This is due to the fact that between the outside air and this point only glass (with a relatively high thermal conductivity) is located, while the effect of the highly-insulating vacuum can be seen clearly in the middle of the glass. The f_{RSi} -value of this construction type is 0.58, which would be below the allowed standards of corresponding standards. However, many comparable contemporary windows show similar punctual weaknesses and buffer this via convective processes.

The strengths of this approach include the smooth “glass-only” appearance from an inside viewpoint, slim profiles, easy cleaning of the inner glass surface, the reliable construction technique, and the possibility to integrate external shading devices. However, the comparatively weaker performance in terms of thermal bridges and issues regarding the

mounting of a window handle can be considered as potential problems.



Figure 7: Prototype of type A2.



Coldest Surface point

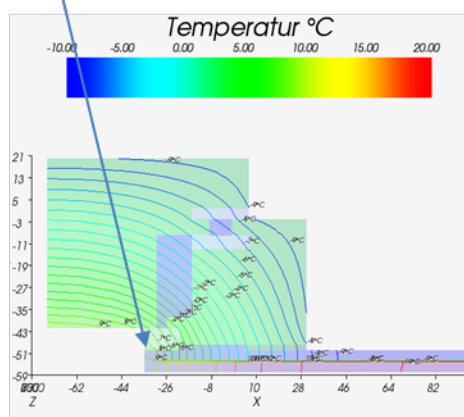


Figure 8: Thermal performance of type A2.

Performance of Type B

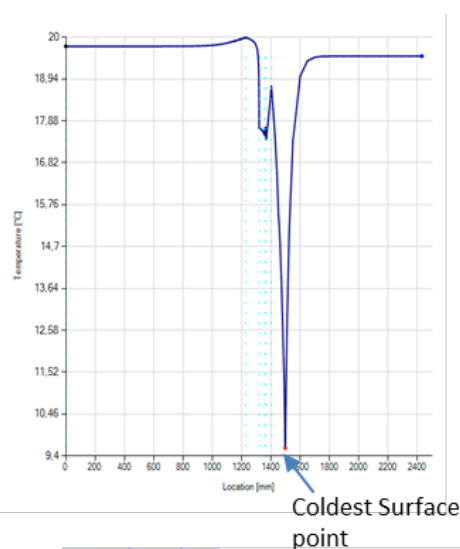
Figure 9 provides two views of the prototype of Type B (outside view and inside view). Figure 10 illustrates the performance of Type B.

The f_{Rsi} value of this construction detail is 0.65 and the lowest temperature is in this 9.59 °C at the connection point between glass and wooden

frame. Similar to Detail A2, this is due to the longitudinal and flanking heat transmission within the glass.



Figure 9: Prototype of type B.



Coldest Surface point

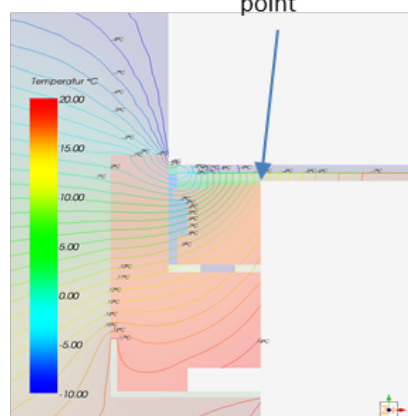


Figure 10: Thermal performance of type B.

The strengths of this design lie in its aesthetic performance (the architectural appearance is very smooth, different aperture dimensions in terms of glass, frame, and frame-construction seem equally dimensioned), the possible integration within the surrounding wall, the fact that fittings can be hidden in the construction, the additional usable space due to the fact that there is no sweep angle as it exists in hinged

windows. Downsides include the weak thermal performance at the glass edges, and potential handling issues of large windows, which presumably would require an electric drive. Moreover, windows that open to the outside suffer from a rather low user acceptance in central Europe.

CONCLUSION AND FUTURE RESEARCH

This contribution provided an overview about some of the efforts and results obtained from the research project MOTIVE, which focussed on the construction development of new windows with vacuum glazing. Thereby, a set of constructions were envisioned, in part constructed as functional prototypes or mock-ups, and assessed via numeric thermal bridge simulation. The presented results show that careful consideration of the specifications of vacuum glass – increased thermal transfer in the edge seal – in constructions can mitigate this weak spot. The threshold values of standards and guidelines pertaining to condensation risk assessment could be exceeded in some construction cases; in others they were not met. However, this is also true for many contemporary window products and their thermal weak spots. Many of these constructions show weak spots, but due to their small dimensions, they often do not cause condensation problems. Furthermore, some other aspects need to be considered in the analysis of the results of this study: On the one hand, it should not be forgotten that the shown simulation results were based on worst-case assumptions regarding surface convection (high R_{Si} -values). On the other hand, the evaluated details were based on horizontal sections through the window construction. Neither corner situations, which have additional 3D-thermal bridge effects, nor the more complex construction detail on the bottom side of the window were discussed.

Thus, the next steps in this research domain require

- the consideration of the bottom construction detail and the assessment of corner details of the window frames,
- the consideration of convective processes in the vicinity of critical spots of construction details,

- comparison of the simulation results to measured data, which can be derived from construction mock-ups in a hot-box-setup.

In addition, transient effects, for instance changes in the boundary conditions as well as the acoustical performance of vacuum glass windows were not considered in this contribution and must be addressed in future research.

A further necessity for future work in the field of new window constructions is the integration of industrial partners, who possess knowledge and experience in industrial manufacturing and market acceptance of windows.

It has to be mentioned that the results shown in this contribution rely on the durability of the vacuum state in the interstitial space of the glass. The producers of vacuum glass indicate a very long durability of the edge seals and thus a long functional life of the glass. Nonetheless, independent long time studies have yet to these stipulations.

ACKNOWLEDGEMENT

The Austrian Research Promotion Agency (FFG) funded, in part, the efforts and results presented in this contribution (in the framework of the project MOTIVE - grant No. 854690). In addition to the authors, C. Berger, N. Ghiassi, F. Herzog, H. Teufl, and D. Wolosiuk were part of the research team. Moreover, the research was based in part on the findings of the VIG-SYS-RENO Project, funded by the Austrian Research Promotion Agency (FFG), grant No. 845225.

REFERENCES

- Antherm. 2017. Numeric thermal bridge simulation engine. www.antherm.eu
- DIN 2014. DIN 4108-3:2014-11. Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung. DIN - Deutsches Institut für Normung DIN - Deutsches Institut für Normung
- Hohenstein H. 2017. Literatur-, Markt- und Hintergrundrecherche im Bereich Vakuumglasungen (VG). Internal scientific report within the project MOTIVE
- ISO. 2017a. Building components and building elements - Thermal resistance and thermal

- transmittance - Calculation methods (ISO 6946:2017).
- ISO. 2017b. Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 2: Numerical method for frames (ISO 10077-2:2017); German version EN ISO 10077-2:2017
- OENORM 2003. OENORM B8110-2: Wärmeschutz im Hochbau - Teil 2: Wasserdampfdiffusion und Kondensationsschutz. Austrian Standards
- Pont U., Heiduk E., Schober P., Pichler H., Dolezl F., Proskurnina O., Schuss M., Sustr C., Hohenstein H., Mahdavi A. 2017. "VIG-SYS-reno Sondierung von Fenstersystemen mit innovativen Gläsern, speziell Vakuum-Isoliergläsern, zur Gebäudesanierung - Berichte auf Energie- und Umweltforschung"; Bericht für FFG - Programm Stadt der Zukunft / BMVIT; Berichts-Nr. Endbericht (Veröffentlichbar), 2017; 218 S.
- Pont U., Mahdavi A., 2017. A comparison of the performance of two- and three-dimensional thermal bridge assessment for typical construction joints; in: "Building Simulation Applications Proceedings", M Baratieri, V. Corrado, A. Gasparella, F. Patuzzi (Ed.); bu.press (publisher of the Free University of Bozen-Bolzano), 3. (2017), ISSN: 2531-6702; Paper-Nr. 75, 8 S.
- Proskurnina O., Pont U., Mahdavi A. 2016. The performance of vacuum glazing in existing window constructions: A case study; in: "Proceedings of the 3rd Central European Symposium on Building Physics", J. Grunewald et al. (Ed.); Technische Universität Dresden / Scientific Committee of the CESBP, (2016), 978-3-8167-9798-2; S. 435 - 440.
- Robins S.J., Collins R.E. 1989. Evacuated windows – theory and practice, ISES Solar World Congress, Kobe, Japan.
- Synergy 2018. Beijing Synergy Vacuum Glazing Technology. <http://www.bjsng.com/> Last accessed 03.2018
- Ward T., Sanders C. 2007. Conventions for Calculating Linear Thermal Transmittance and Temperature Factors. BRE press, Watford, UK, ISBN: 978-1-86081-986-5
- Zoller A. 1913. Hohle Glassscheibe, German patent Application No. 387655.

VIII. VALIDIERUNGSSZENARIEN, QUALITÄTSSICHERUNG

FELDTTEST DER AUGMENTED REALITY LICHTMARKER-TECHNOLOGIE

I. Doll¹, S. Ritterbusch^{2,3}, P. von Both¹ und V. Koch¹

¹Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Germany,

²iXpoint Informationssysteme, Ettlingen, Germany, ³VWA Hochschule, Stuttgart, Germany

KURZFASSUNG

Augmented Reality (AR) eröffnet durch die Ergänzung der Realität um virtuelle Inhalte in Echtzeit auf handelsüblichen Smartphones im Bauwesen vielfältige Potenziale zur visuellen Unterstützung des digitalen Planungs- und Bauprozesses. Im Bauwesen besonders relevant sind passgenaue, realmaßstäbliche Abbildungen in Außenraumszenarien, die vor Ort anschaulich Planungsinhalte an Projektbeteiligte und Interessensgruppen vermitteln und frühzeitig Baumängel während des Bauprozesses sichtbar machen können. Eine Lichtmarker-Technologie, welche derzeit im Rahmen eines Forschungsprojektes entwickelt wird, soll die erforderliche Positionsgenauigkeit in sehr unterschiedlichen Lichtverhältnissen bei geringem Installationsaufwand unter Nutzung von handelsüblichen Smartphones erreichen und die AR-Technologie für das Bauwesen im Außenraum professionell einsetzbar machen. Dieser Beitrag gibt einen Einblick in die Hintergründe der AR Lichtmarker-Technologie und stellt den Versuchsablauf und die Ergebnisse des ersten Feldtests vor.

ABSTRACT

Augmented reality (AR) opens up a wealth of potential for visually supporting the digital design and construction process in the construction industry by adding real-time virtual content to camera recordings of commercial smartphones. Particularly relevant in the construction sector are accurate, true-to-scale figures in outdoor scenarios, which provide an easily interpreted graphic image of planning information to project participants and interest groups on-site and make construction faults visible at an early stage during the construction process. A light marker technology, which is currently being developed as part of a research project, should achieve the required positional accuracy in very different lighting conditions with low installation effort using commercially available smartphones and make professional use of the AR technology for outdoor construction. This article gives an insight

into the background of the AR light marker technology and introduces the test procedure and the results of the first field test.

EINLEITUNG

Problemstellung im Bauwesen

Das Bauen befindet sich in einem Spannungsfeld zwischen Projektabwicklung und öffentlichem Interesse. Stark in der öffentlichen Kritik stehende Bauprojekte, wie das prominente Beispiel Stuttgart 21, zeigen, dass sowohl formelle als auch informelle Öffentlichkeitsbeteiligungsverfahren ein bedeutender Bestandteil bei der Planung und Umsetzung von großen Baumaßnahmen sein müssen. Denn der Erfolg eines Bauprojektes ist maßgeblich abhängig von der öffentlichen Akzeptanz. Sie kann gesteigert werden, wenn durch die Beteiligung betroffener Interessensgruppen eine Identifikation mit dem Projekt herbeigeführt werden kann (Anders et al., 2013). Eine Studie im Auftrag des Zentralen Immobilien Ausschusses e.V. bekräftigt die Relevanz des Themas, nach welcher der Hauptteil der befragten Bürger wünschen, ihr eigenes Lebensumfeld mitzugestalten und auch bereit sind, sich einzubringen (Articus, 2013). Bestehende Verfahren haben jedoch häufig nur einen informierenden Charakter und versuchen Bauvorhaben, die für Laien oft schwer zu begreifende Inhalte bergen, über kleinmaßstäbliche Modelle und definierte Blickwinkel in Visualisierungen zu kommunizieren. Dadurch kann nur begrenzt der Eindruck vom wirklichen Objekt vermittelt werden. Für eine Verbesserung der Laien-Kommunikation werden daher zukünftig einfach zugängliche und wirksame Methoden der Visualisierung von geplanten Bauprojekten erforderlich.

Daneben nimmt die Expertenkommunikation während des Planungs- und Bauprozesses und die Überwachung des Bauprozesses eine wichtige Rolle ein. Fehler in der Bauplanung, welche sich auf die technische Umsetzbarkeit oder auf die Nutzbarkeit nach Fertigstellung auswirken

und hohe Folgekosten nach sich ziehen können, werden durch mangelhafte Kommunikationsweisen von Problemstellen in der Planung zwischen den Planungsbeteiligten begünstigt. Die gebräuchlichen zeichnerischen Darstellungsmittel im Bauwesen können komplexe Zusammenhänge nur begrenzt anschaulich vermitteln. Weiterhin bedarf es während der Durchführung von Baumaßnahmen einer regelmäßigen Überwachung des Baufortschritts und einen Soll-Ist-Abgleich des Bauzustandes unterschiedlicher Gewerke, um Fehlstellen frühzeitig zu erkennen. Bereits bei Neubauvorhaben von Ein- und Zweifamilienhäusern treten gemäß einer Studie des Institutes für Bauforschung e.V. (IFB) und dem Bauherren-Schutzbund e.V. (BSB) im Durchschnitt circa 20 Baumängel je Vorhaben auf (IFB et al., 2015). Die Kontrolle mittels gebräuchlichen Kontrollwerkzeugen, wie Laserentfernungsmessgeräte, nehmen viel Zeit in Anspruch, sodass bei der Vielzahl an potenziellen Mängeln Fehler häufig zu spät erkannt werden. Vor diesem Hintergrund wird in der Projektentwicklung eines Bauvorhabens ein Kommunikationsmittel zwischen den Planungsbeteiligten zur anschaulicheren Darstellung von anspruchsvollen Planungsinhalten benötigt und andererseits ein neues Kontrollinstrument, das die frühzeitige Erkennung von Fehlstellen bei der Bauausführung vereinfacht.

AR als Mittel der Problemlösung

Augmented Reality (AR) eignet sich dazu, die Defizite in der visuellen Darstellung und der Unterstützung der Bauüberwachung bei den einleitend beschriebenen Szenarien auszugleichen. AR ist eine Visualisierungsform aus der Ich-Perspektive, bei welcher in einem kontinuierlichen Prozess eine Erweiterung der Realität um virtuelle Inhalte in Echtzeit abhängig vom Standpunkt des Betrachters stattfindet (vgl. Broll, 2013). Durch Entwicklungen im Bereich der Video See-Through-AR, die eine Überlagerung der Realität und Virtualität über die Aufnahme des Videobildes auf handelsüblichen Smartphones oder Tablets ermöglicht, ist AR bereits für ein breites Publikum ortsunabhängig verfügbar. Die Darstellung in Echtzeit aus der Ich-Perspektive und die Mobilität der Technik ermöglichen es sowohl Visualisierungen physisch erlebbar und interaktiv zu machen als auch komplexe Zusammenhänge in Planungen visuell zu veranschaulichen und Modelle zukünftiger Gebäude individuell am realen Baugrundstück

zu erkunden. Das so ermöglichte Eintauchen des Betrachters in die Szene fördert das Verstehen und Begreifen und kann somit zur einer merklichen Verkürzung der Informationsaufnahme führen (vgl. Stankowski, 1994). Dadurch kann ein konstruktiverer Diskurs zwischen Laien und Experten angestoßen werden, der zu einer fundierteren Entscheidungsfindung führen kann. Weiterhin können Fehlstellen während der Bauausführung durch die Überlagerung von realem Bauzustand und geplantem Zustand in einem virtuellen Gebäudemodell schneller ersichtlich und erkannt werden.

Für die maßstäblich und perspektivisch korrekte Überlagerung virtueller Geometrien mit der Kameraaufnahme ist die Bestimmung der Position und Orientierung des Blickpunktes des Betrachters erforderlich (Tracking). Mobile AR-Systeme nutzen meist GPS-basierte, sensorbasierte (des mobilen Endgerätes) und kamerabasierte (optische Verfahren) Tracking-Lösungen (vgl. Broll, 2013). Durch die hohe Genauigkeit und Flexibilität von optischen Verfahren werden sie immer häufiger eingesetzt. Dabei helfen passive (nicht selbstleuchtende) oder aktive (selbstleuchtende) Marker, die Berechnungskomplexität und Fehleranfälligkeiten beim Tracking zu verringern. Passive Marker sind häufig auf Papier gedruckte Schwarzweißmarker und werden daher eher in kleinmaßstäblichen Szenarien eingesetzt. Aktive Marker können, insbesondere im Außenraum, zuverlässiger detektiert werden (Grimm et al., 2013). Derzeitige aktive Markersysteme sind jedoch bei Außenraumszenarien durch die natürlichen Einflüsse in ihrer Verwendbarkeit eingeschränkt. Deshalb bedarf es der Entwicklung einer robusten Lösung in Bezug auf die Umgebungsbedingungen.

Lichtmarker-Technologie als Lösungsansatz

Ein Lösungsansatz für den professionellen Einsatz von AR mit aktiven Markern in Außenraumszenarien der Öffentlichkeitsbeteiligung, der Planungskommunikation und der Bauüberwachung im Bauwesen auf handelsüblichen Smartphones wird derzeit mit der Lichtmarker-Technologie im Rahmen eines Kooperationsprojektes zwischen einem Industriepartner und einer Hochschuleinrichtung erarbeitet. Die wissenschaftliche Forschung erarbeitet mathematische Grundlagen für die AR und architektonische Grundlagen für die Visualisierung von Gebäuden und deren Verfolgung des Bauzustan-

des. Die technische Forschung umfasst die Entwicklung eines aktiven Markers (Lichtmarker) und der zugehörigen Bediensoftware, womit eine eindeutige Detektion charakteristischer Punkte von künftigen Gebäuden ermöglicht werden soll. Dabei werden Punkte (digitale Lichtmarker-Referenzpunkte) am virtuellen 3D-Modell definiert, die der Position der Lichtmarker in der realen Szene entsprechen. Durch die Zuordnung der digitalen Lichtmarker-Referenzpunkte zu den erfassten Lichtmarkern in der Kameraaufnahme eines Smartphones kann das virtuelle Modell positions- und orientierungsgenau nach dem Blickwinkel des Betrachters dargestellt werden. Für die professionelle Nutzbarkeit in den genannten Szenarien werden hohe Anforderungen an die Lichtmarker-Technologie in Bezug auf die Genauigkeit der geometrischen Einpassung des virtuellen Gebäudemodells in die Kameraaufnahme des Smartphones, die eindeutige Erfassbarkeit der Lichtmarker bei unterschiedlichen Belichtungssituationen und die Erkennbarkeit aus mehreren Metern Entfernung gestellt.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sollen die Lichtmarker folgende Eigenschaften erhalten. Bestehend aus einer definierten Menge von dynamisch angesteuerten Hochleistungs-LEDs, soll die Erkennung der Marker im Außenraum an das jahres- und tageszeitlich schwankende Umgebungslicht optimiert werden. Die Abstrahlung soll die Erkennbarkeit der Lichtmarker aus mehreren Richtungen begünstigen. Eine Unterscheidbarkeit der einzelnen Lichtmarker soll durch Lichtsequenzen erreicht werden. Dadurch wird eine gute Bestimmung der Raumkoordinaten ermöglicht.

Aus der Anforderung, Gebäude sinnvoll in ihrer Umgebung im Zusammenhang zu virtuellen architektonischen Geometrien darzustellen, zielt das Projekt zunächst auf eine sichere Detektion der Marker auf bis zu einem Abstand von 100 Metern mit handelsüblichen Smartphone-Kameras mit HD-Auflösung bei Lichtverhältnissen zwischen Dämmerung und Mittagssonne. Daraus soll ermöglicht werden, unabhängig von den bestehenden Verhältnissen das Ziel der unkomplizierten, lebensnahen und interaktiven Darstellung virtueller Objekte im Zusammenhang mit der Realität zu erreichen.

Es folgen die Ergebnisse eines ersten Feldtestes der Lichtmarker-Technologie.

FELDTEST

Grundlagen

Das noch bis November 2018 andauernde Kooperationsprojekt sieht die Entwicklung der AR Lichtmarker-Technologie in zwei Phasen vor. Die Phasen schließen jeweils mit einem Feldtest ab. Dieser Beitrag stellt die Ergebnisse des Feldtestes vom 23. November 2017 aus der abgeschlossenen Phase 1 vor. Testgegenstand waren die entwickelten Lichtmarker-Versuchsmuster, die mobile Software zur Erkennung und Verarbeitung der Lichtmarker und die Visualisierung von virtuellen Bauwerksmodellen auf einem handelsüblichen Smartphone. Der Feldtest aus Phase 1 zielte auf die Überprüfung der grundlegenden Funktionsfähigkeit der Lichtmarker-Technologie und auf die Erkennung von Optimierungspotenzialen. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für die Entwicklung eines Lichtmarker-Prototyps für Anwendungsfälle mit höchstem Genauigkeitsanspruch in Phase 2.

Der Feldtest verfolgte die Überprüfung der angestrebten technischen Leistungsfähigkeit der Lichtmarker-Versuchsmuster und der mobilen Software im Außenraum. In diesem Zusammenhang wurde die Erkennung der Lichtmarker-Versuchsmuster, die Dauer der Erfassung und die Unterscheidbarkeit einzelner Lichtmarker untersucht. Weiterhin sollte der Feldtest zur Überprüfung der Genauigkeit der Projektion virtueller Gebäudemodelle in der AR Szene dienen und den Einfluss des Standortes des Betrachters erfassen.

Als Versuchsort wurde ein Parkplatz nordöstlich eines größeren Hochschulgebäudes als fiktives Baugrundstück gewählt, der durch befestigte Flächen, Vegetationsflächen, Büsche und große Bäume gekennzeichnet ist. Der Feldtest fand am Nachmittag des 23. November 2017 von 13.00 Uhr bis 15.30 Uhr bei klarem Himmel und stellenweise Sonnenschein statt. Der Versuchsort befand sich im Schlagschattenbereich des südlich gelegenen Hochschulgebäudes.

Als virtuelle Testgebäudemodelle wurden das „FZK Haus“ des Institutes für Angewandte Information (IAI) am Karlsruher Institut für Technologie (IAI, 2017), einem einfachen Fantasiegebäudemodell eines Einfamilienhauses, und einer fiktiven Glasüberdachung über dem Nordzugang des Hochschulgebäudes gewählt. Für die Nutz-

barkeit in der AR Lichtmarker-Technologie müssen die Modelle, wie nachfolgend beschrieben, aufbereitet werden.

Zunächst ist anzuführen, dass zur Unterstützung eines BIM (Building Information Modeling) -basierten Planungsprozesses die Industry Foundation Classes (IFC) als Austauschformat der Gebäudemodelldaten zwischen der BIM-fähigen CAD-Software und der Lichtmarker-Software vorgesehen wurden. Als herstellernerutrales Datenformat stellen die ISO-zertifizierten IFC eine standardisierte Beschreibung sowohl geometrischer als auch semantischer Informationen bereit und ermöglichen die Integration der Gebäudeinformationen aus unterschiedlicher BIM-Software. Die im Projekt verwendete Software ist ARCHICAD 20. Der IFC-Export erfolgt hier über die Standardeinstellung des IFC-Übersetzers „Allgemeiner Übersetzer“, welcher das IFC-Schema Version 2x3 im Coordination View Version 2.0 ausgibt.

Für das Tracking und die Registrierung, dem korrekten geometrischen Einpassen, der virtuellen Testgebäudemodelle in der Kameraaufnahme des Smartphones müssen charakteristische Punkte am virtuellen Gebäudemodell definiert werden (digitale Lichtmarker-Referenzpunkte), welche der Position der Lichtmarker in der realen Szene entsprechen. Es werden mindestens vier nicht koplanare Punkte benötigt, um ein lokales Koordinatensystem zu definieren, welches die Position und Orientierung des Gebäudemodells im Raum verortet. Die digitalen Lichtmarker-Referenzpunkte müssen folgende Kriterien erfüllen, um sowohl zur Verwaltung in der CAD-Software als auch zur Übertragung und Weiterverarbeitung in der Lichtmarker-Software eingesetzt werden zu können: Verortung über einen kartesischen Punkt (X-, Y-, Z-Koordinaten), Vorhandensein einer geometrischen Repräsentation für die Verwaltung, optische Differenzierbarkeit durch Festlegung von Materialeigenschaften, Identifizierbarkeit durch ein alphanumerisches Namensattribut, Klassifizierbarkeit über die Zuweisung einer IFC-Entität und Export der geometrischen und semantischen Information nach IFC. Für den Test wurde das Objekt „GEPlatzmarkierung“ in ARCHICAD 20 verwendet, welches die obenstehenden Kriterien erfüllt. Die Zuordnung im IFC-Schema erfolgt zur Entität IFCFastener.

Im CAD-Programm wurde ein Vermesseralageplan zur Verortung und Ausrichtung der Modelle und der digitalen Lichtmarker-Referenzpunkte im realen Kontext hinterlegt. Der Vermesseralageplan enthält Höhenknoten des Geländes und Informationen über die geometrischen Abhängigkeiten des baulichen und vegetativen Bestands. Anhand dieser realen Orientierungsquellen können Maße entnommen werden, die zur Einmessung der Lichtmarker-Versuchsmuster am Versuchsort benötigt werden.



Abbildung 1: Vermesseralageplan mit Testgebäuden, Lichtmarkerpositionen (blau) und Teststandorten (rot: „FZK Haus“, grün: fiktive Glasüberdachung) (Planquelle: Vermögen und Bau Baden-Württemberg, Amt Karlsruhe)

Das „FZK Haus“ (IAI, 2017) misst eine Länge von 12.00 m, eine Breite von 10.00 m, eine Höhe von rund 6.50 m. Es hat ein Erdgeschoss, ein Obergeschoss und ein Satteldach. Das Gebäudemodell wurde am südöstlichen Rand des Parkplatzes auf einer mit Bäumen und Büschen versehenen Vegetationsfläche positioniert. Das Haus wurde giebelständig im rechten Winkel und mit einem Abstand von ca. 95 cm zu dem südwestlich verlaufenden Weg positioniert. Als weiterer Bezugspunkt dient eine Straßenlaterne am südlichen Gebäudeeck. Die Geländemarkierung der Straßenlaterne gibt eine Höhe von 115.36 m ü. NN. an, welche als Bezugshöhe für das Erdgeschoss des Testmodells und die digitalen Lichtmarker-Referenzpunkte festgelegt wurde. Die Referenzpunkte wurden jeweils am südlichen (Lichtmarker (LM) 1 und LM 2), am westlichen (LM 3) und am östlichen (LM 4) Eckpunkt des Testmodells etwa auf Augenhöhe (1.60 m ab Bezugshöhe 115.36 m ü. NN.) positioniert. Drei Punkte spannen eine Ebene auf (LM 2, 3 und 4), während der vierte Punkt (LM 1) am südlichen Ende außerhalb der Ebene in einer Höhe von 0.50 m ab Bezugshöhe liegt.



Abbildung 2: Screenshot Perspektive „FZK Haus“

Die fiktive Glasüberdachung über dem Nordzugang des Hochschulgebäudes besteht aus einem auskragenden, gefalteten Element als Glasdach und einer Stahltragkonstruktion, welches direkt an die Gebäudefassade anschließt. Es misst eine Länge von 22.50 m, eine Breite von 5.00 m und eine Konstruktionshöhe von insgesamt 0.58 m und überspannt den gesamten Eingangsbereich. Als realer Bezugspunkt wurde die südöstliche Ecke des Nordzugangs auf Niveau des davorliegenden Pflasterweges mit einer Höhe von 115.26 m ü. NN. gewählt. Der Abstand der Unterkante der Konstruktion zur Bezugshöhe beträgt 2.50 m. Die digitalen Lichtmarker-Referenzpunkte wurden jeweils am südöstlichen (Lichtmarker (LM) 1 und LM 2), am südlichen (LM 3) und am nordwestlichen (LM 4) Ende des Testmodells in Anhängigkeit von der Bestandsbebauung positioniert. LM 2, 3 und 4 spannen eine Ebene auf Augenhöhe auf (1.60 m ab Bezugshöhe 115.26 m ü. NN.); LM 1 liegt außerhalb der Ebene in einer Höhe von 0.50 m ab Bezugshöhe unterhalb LM 2.

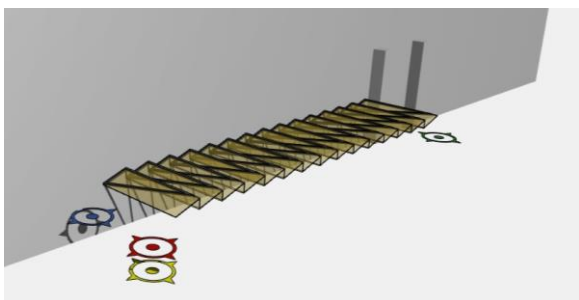


Abbildung 3: Screenshot Perspektive fiktive Glasüberdachung

Darüber hinaus wurden im Feldtest Lichtmarker-Versuchsmuster mit folgenden Eigenschaften eingesetzt. Die räumliche Dimensionierung der Versuchsmuster ist auf eine virtuelle Halbsphäre mit Radius von 6 cm ausgelegt, damit sie aus 110 m Entfernung mit einer Kamera mit Full-HD Auflösung und Field-of-View von 55° noch Pixeldimension erreichen. Da die Lichtmarker-Versuchsmuster für Lichtbedingungen im Außeneinsatz ausgelegt sind, muss eine äquivalen-

te Beleuchtungsstärke wie bei Mittagssonne von 100000 lux auf der Leuchtfläche erreicht werden können. Daher ist ein Lichtstrom von 2262 lm erforderlich. Es wurde angenommen, dass die nicht perfekte Reflektivität der Umgebung der Lichtmarker-Versuchsmuster, die entgegengesetzten Verluste durch den Diffusor der Versuchsmuster und die ungleichmäßige spektrale Verteilung des Sonnenlichts die Größenordnungen der Auslegung nicht grundsätzlich verändern. In der praktischen Umsetzung zeigte sich der abrufbare Lichtstrom von rechnerisch 2492 lm als ausreichend, um in der Mittagssonne sichtbar zu bleiben. Die kompakte LED-Technologie ermöglichte eine kleinere, quaderförmige Leuchtfläche innerhalb der virtuell als Halbsphäre angenommenen Leuchtfläche in der Auslegung. Die entstehende Abwärme bei Vollast kann vollständig durch passive Kühlung durch Kühlelemente abgeleitet werden. Die Spannungsversorgung wird mit Akkus im Lichtmarker realisiert.

Des Weiteren wurde folgendes Gerät für den Versuchsaufbau benötigt. Die Lichtmarker-Versuchsmuster wurden jeweils auf individuell einstellbaren Vermesserstativen aus Holz aufgestellt. Zur Befestigung der Versuchsmuster auf den Stativen wurde speziell eine Halterung aus MDF-Holzplatten konstruiert, die auf das Gewinde der Stative aufgeschraubt werden kann. Bandmaße und Meterstäbe wurden zur Einmessung der Versuchsmuster verwendet. Für die Erfassung der Versuchsmuster und Erzeugung der AR-Szene wurde ein iPhone 6s verwendet, welches auf einem Metall-Kamerastativ befestigt wurde. Die visuelle Dokumentation erfolgte zusätzlich mit der Kamera von weiteren iPhone 6s.

Durchführung und Ergebnis: FZK Haus

Nach Einmessen und Aufstellen der Lichtmarker-Versuchsmuster an ihrer geplanten Position am Versuchsort wurde der Test an vier verschiedenen Standorten (Abb. 1), welche die Testszene aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachten, durchgeführt. Dabei wurde versucht, das Testobjekt möglichst in Totalaufnahme, das bedeutet ohne Schwenkbereiche der Kamera, abzubilden. Die Lichtmarker-Versuchsmuster sollten jeweils gleichzeitig von der Kamera des Smartphones, auf welchem der Test ausgeführt wurde, erfasst werden.



Abbildung 4: AR-Szene „FZK Haus“ von Standort 1

Standort 1 befand sich in etwa 13.75 m Entfernung zum nächstgelegenen Punkt des Testgebäudes. Die Szene wurde aus der Normalperspektive aufgenommen. Das Testobjekt konnte in der Totalen projiziert werden. Dadurch war weder ein horizontaler noch ein vertikaler Schwenkbereich der Aufnahmekamera erforderlich. Zwischen der Positionierung des Testgebäudes in der Kameraaufnahme und der geplanten Position ist eine Abweichung von bis zu etwa 1.00 m in südwestliche Richtung festzustellen. Die geometrische Einpassung des Testobjektes in die Szene wirkt realistisch. Durch die Verwendung von strukturierten Lichtsignalen statt großer passiver Marker haben die Lichtmarker sowohl eine vergleichsweise kleine Bauform, eine rundum Sichtbarkeit und eine Unterscheidbarkeit der einzelnen Marker durch leicht unterschiedliche Lichtsequenzen. Trotz der aktiven Lichtkomponenten sind die Lichtsignale nicht sehr störend, da sie eher als beleuchtete Flächen als Lichtquellen aufgefasst werden. Die Lichtmarker konnten von der sich in der Entwicklung befindlichen Detektionssoftware innerhalb weniger Perioden erfasst werden, und im Folgenden erfolgreich an veränderte Sichtpositionen angepasst werden. Die Erfassung zeigte Verbesserungspotentiale in der perspektivischen Verzerrungskorrektur im Bereich der rückwärtigen Wand, die nur von einem Marker festgelegt wurde, im Gegensatz zu drei Markern, die die vordere Wand definierten. Damit können die Abweichungen gut erklärt werden und in Zukunft durch bessere Anpassung angegangen werden.



Abbildung 5: AR-Szene „FZK Haus“ von Standort 2

Standort 2 näherte sich mit etwa 9.50 m Entfernung zum nächstgelegenen Punkt stärker an das Testgebäude an. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit jenen an Standort 1; die geometrische Einpassung erscheint noch genauer. Die Lichtmarker wurden nach wenigen Perioden individuell erfasst und das Gebäude entsprechend in das Bild eingepasst. Da hier nun drei Lichtmarker die rückwärtige Wand definieren und der Abstand etwas größer ist, tritt die Verzerrung schwächer auf und es ergibt sich eine genauere Darstellung.



Abbildung 6: AR-Szene „FZK Haus“ von Standort 3

Standort 3 maß etwa 7.60 m zum nächstgelegenen Punkt des Testgebäudes. Die Szene wurde aus der Normalperspektive aufgenommen. Das Testobjekt wurde in der Totalen projiziert. Zwischen der Positionierung des Testgebäudes in der Kameraaufnahme und der geplanten Position bestand eine geringe Abweichung von etwa 0.30 m in südwestliche Richtung. Die südliche Gebäudeecke wirkte ebenfalls etwa 0.30 m horizontal verschoben. Die geometrische Einpassung des Testobjektes in die Szene wirkte sehr realistisch. Die Detektion der Lichtmarker war durch Nähe dreier Marker schnell und robust. Die Genauigkeit kann aus der Abdeckung der nächsten und versteckten entferntesten Ecke des Gebäudes erklärt werden.



Abbildung 7: AR-Szene „FZK Haus“ von Standort 4

Standort 4 befand sich in einem Raum des Hochschulgebäudes im ersten Obergeschoss. Die Distanz vom Testobjekt wird auf etwa 14.00 m geschätzt. Die Aufnahme erfolgte in der Vogelperspektive. Das Testgebäude wurde in der Totalen im Kamerabild projiziert. Eine Abweichung von bis zu etwa 0.50 m zwischen der Positionierung im Kamerabild zur geplanten Position ist erkennbar. Die geometrische Einpassung wirkt sehr realistisch. Die Erkennung der Lichtmarker war erwartungsgemäß sehr robust, da der Boden als Hintergrund homogener wirkt und daher Lichtsignale sich besser davon abheben. Die bessere geometrische Situation, die Hauptebene der Lichtmarker gekippt statt frontal erkennen, führt auf eine bessere Berechnungssituation und lässt die genauere Detektion erwarten.

Durchführung und Ergebnis: fiktive Glasüberdachung Zugang Hochschulgebäude

Der Versuch wurde von einem Standort in einem Abstand von etwa 9.00 m zum nächstgelegenen Punkt des Testobjektes in nordwestlicher Richtung durchgeführt. Die Lichtmarker-Versuchsmuster konnten gleichzeitig erfasst und das Testobjekt in der Totalen projiziert werden. Die Szene wurde aus der Normalperspektive aufgenommen. Aufgrund der Höhenlage des Testobjektes von etwa 2.50 m oberhalb der Geländeoberfläche wurde es in der Untersicht dargestellt. Während das Testobjekt in angemessener Höhe und vollständig an das Gebäude angebaut erschien, gab es in einer an der östlichen Ecke eine erhebliche Abweichung von etwa 4.50 m. Die geometrische Einpassung wirkte daher unrealistisch. Während die Erkennung der Marker schnell und genau erfolgte, so ist die Abweichung auf die zu geringe perspektivische Korrektur zurückzuführen: In diesem Fall ist das Verhältnis zwischen nächstem Punkt und entferntesten Punkt besonders groß und die Markerpositionen liegen außerhalb des Objekts.



Abbildung 8: AR-Szene fiktive Glasüberdachung

FAZIT UND AUSBLICK

Positionserfassung (Tracking)

Der Vergleich aller Testergebnisse zeigt eine inhomogene Genauigkeit der Positionserfassung. Während geringe bis mittlere Abweichungen der Positionierung der Testobjekte in den Planunterlagen von der Positionierung in der Kameraaufnahme beim „FZK Haus“ von maximal etwa 0.30 m bis etwa 1.00 m erzielt werden konnten, ist bei der fiktiven Glasüberdachung in einer Ecke eine erhebliche Abweichung von etwa 4.50 m erkennbar. Erwartungsgemäß erhöhen sich Abweichungen aus geometrischen Gründen von erkannten Positionen der Lichtmarker.

Ein Großteil der Abweichungen in diesem Testlauf sind aus Ungenauigkeiten der perspektivischen Korrektur zu erklären, die kleinere Abweichungen in den erkannten Positionen zu großen Positionsverschiebungen der Objektpositionen und Ausrichtungen führten. Die Abweichungen in den erkannten Positionen können durch Ungenauigkeiten in den Höhenkoten, in der Kennzeichnung der Außenanlagen und in der Lage der Straßenlaternen im vorliegenden Vermessungsplan in Bezug zum realen Bauzustand begünstigt worden sein. Weiterhin können Ungenauigkeiten beim Einmessen der Lichtmarker-Versuchsmuster von etwa 5 bis 10 cm in jeder Koordinatenachse entstanden sein.

Geometrische Einpassung (Registrierung)

Die Auswertung der Testergebnisse zeigt hier ebenfalls eine Inhomogenität der geometrischen Einpassung der virtuellen Inhalte in die Kameraaufnahme. Während allgemein die grundsätzliche Funktion und Leistung der Technologie gezeigt werden konnte, wurden in Abhängigkeit zur Positionserfassung sehr realistische bis unrealistische Darstellungen der Testobjekte erzielt. Mit dem Testlauf konnten Fehlerquellen in der per-

spektivischen Korrektur identifiziert und in weiterer Entwicklung zur besseren Anpassung an die Kameraperspektive angegangen werden.

Für die Nutzung der AR Lichtmarker-Technologie in Planungs-, Ausführungs- und Simulationsszenarien soll in der weiteren Entwicklung eine höhere Genauigkeit in der Positionserfassung und geometrischen Einpassung erzielt werden. Der Maßstab hierfür sind die erlaubten Maßtoleranzen einzelner Gewerke, die für eine Erkennung von Baumängeln durch den Abgleich des Gebäudemodells mit dem realen Bauzustand erforderlich sind.

Blickwinkel

Die Standorte wurden so gewählt, dass die Testmodelle in einer Totalaufnahme projiziert werden und die Kameraaufnahme möglichst aus der Normalperspektive heraus erfolgen konnte. Aufnahmen in der Totalen sind insbesondere für Anwendungsszenarien relevant, welche eine Erfassung der Gesamtzusammenhänge eines Bauwerkes und seiner Umgebung erfordern. Das können Augmented Reality-Szenarien der Öffentlichkeitsbeteiligung, wie die Beteiligung bei Projektinitiierung oder bei Baugesuchverfahren und des Stadtmarketings, wie die Darstellung des Historischen Bauzustandes oder von Kunst im städtischen Raum, sein. In Planungs-, Ausführungs- und Simulationsszenarien von baulichen Objekten sind jedoch insbesondere Teil- und Nahaufnahmen erforderlich, um Ausschnitte und Detailpunkte fokussieren zu können. Die AR Lichtmarker-Technologie wird daher im Laufe der weiteren Entwicklung eine Unterstützung für eine interaktive und explorative Nutzung erhalten.

Lichtmarker

Für einen besseren Einsatz im Bauwesen werden sowohl weitere Befestigungsoptionen entwickelt als auch weitere Bauformen für Innenraumnutzung untersucht. Weiterhin werden Möglichkeiten für einen Betrieb vom Stromnetz evaluiert.

Ausblick

Zukünftige Entwicklungen der Lichtmarker-Technologie im Bereich der Darstellung von statischen und dynamischen Daten aus Simulationsszenarien, wie energetische Gebäude- und Strömungssimulationen, Brandsimulationen oder

Tragwerksanalyse, könnten das Spektrum der anschaulichen Vermittlung an fachlichen Laien im Planungsprozess um die Kommunikation gebäudetechnischer, bauphysikalischer und tragkonstruktiver Planungsinhalte erweitern.

DANKSAGUNG

Ein großer Dank geht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Unterstützung des Lichtmarker-Projektes im Rahmen des ZIM.



LITERATUR

- Anders, S. et al. 2013. Werkzeuge. Visualisierung. In: Bott, H. et al. (Hrsg.). Nachhaltige Stadtplanung: Konzepte für nachhaltige Quartiere, München.
- Articus, S. 2013. Bürgerbeteiligung in der Stadtentwicklung. In: ZIA. Bürgerbeteiligung in der Projektentwicklung, Köln.
- Broll, W. 2013. Augmented Reality. In: Dörner, R. et al. (Hrsg.). Virtual und Augmented Reality, Heidelberg.
- Grimm, P. et al. 2013. VR-Eingabegeräte. In: Dörner, R. et al. (Hrsg.). Virtual und Augmented Reality, Heidelberg.
- Institut für Angewandte Information (IAI), Karlsruher Institut für Technologie 2017. FZK Haus – IFC4-Datei. In: http://www.ifcwiki.org/index.php?title=KIT_IFI_Examples. Aufgerufen am 08.03.2017.
- Institut für Bauforschung e.V. (IFB) 2015. Bauqualität beim Neubau von Ein- und Zweifamilienhäusern, Hannover.
- Stankowski, A. 1994. Visualisierung. In: Stankowski, A. et al. Visuelle Kommunikation. Ein Design-Handbuch, Berlin.

COMPUTATIONAL PREDICTION OF SOUND PROPAGATION IN URBAN CANYONS

A. E. Engedy¹, J. Lechleitner¹ and A. Mahdavi¹

¹Department of Building Physics and Building Ecology, TU Wien, Vienna, Austria

ABSTRACT

Problems associated with increased urban noise exposure – especially due to road traffic – are well known. However, the acoustic planning of urban areas and the potential of simulation still does not receive sufficient attention. In this context, the present contribution focuses on urban canyons via comparison of measured and simulated sound levels. Toward this end, a room acoustic simulation tool was deployed to model two areas in the city of Vienna. Simulation results generally agree with the measurements. The contribution includes also a sensitivity analysis to explore the impact of variations in model assumptions on simulation results.

Keywords: urban acoustics, room acoustic simulation, urban canyon, traffic noise prediction, surface absorption, scattering, sound level

MOTIVATION

Due to urbanization process, the growth rate of cities has increased significantly over the last century. This is reflected also in the increase in road traffic volume and related noise levels. The increased external sound pressure levels (SPLs) and the need for the acoustical protection motivated the formulation of regulations regarding minimal sound reduction properties of external building components. Information on external SPLs can be obtained from in situ measurements, land use zones, or noise maps. Measurements can reliably capture the actual noise situation. However, their implementation is cost and time consuming, and thus feasible only in special cases. On the other hand, land use

zones with typical SPLs provide a rather coarse representation of acoustical circumstances and fall thus short of accounting for specific characteristics of the urban settings and sound sources. Finally, noise maps of selected urban areas represent a compromise between precision and cost. Although the computational expense for generating noise maps of extended areas can be high, they can include traffic flows and building stock properties in a simplified way.

The benefits of computational prediction of SPLs in urban canyons are diverse. A validated method to establish models would allow to deploy simulation tools both for design and retrofit purposes. Hence, SPLs in an urban canyon could be efficiently reduced by targeted measures influencing boundary surfaces and sound sources, i.e. facades and road traffic respectively.

Although the implications of elevated urban noise levels are evident and quantified by the number of healthy years lost (WHO-JRC 2011), the topic of urban noise and noise mitigation is still underrepresented in the design practice. Road traffic is often controlled by means of speed limits, and the effect of the built environment on sound propagation is left out of consideration.

METHOD

Overview

The research presented in this paper was conducted following a three step approach. The first step included in situ observations and literature review focusing on input data derivation (geometry, materials, sound sources), and simulation tool settings. In the second phase, a

baseline model was generated using best guess input parameter assumptions. The third step involved the comparison of the simulation results obtained from the baseline model with the measurements results. Measurement data for both locations are based on an earlier effort by our Department. The present contribution also entails a sensitivity analysis to explore the relative influence of various input parameters on simulation results.

The assignment of input values for the baseline model were not affected by the measurement results. Rather, they were solely based on assumptions derived from literature research and in situ observations. Simulations were conducted using the commercially available room acoustics simulation application ODEON (Odeon A/S 2017), which can provide information on SPLs in the frequency range from 63 Hz to 8 kHz.

Locations

This contribution focuses on two inner-city locations in Vienna, Austria, namely Paulanergasse (PA) and Koppstrasse (KO). Figure 1 and 2 provide schematic plans of these locations. PA and KO have rather different height to width ratios (see Figure 3) with a strong variation in the width in PA. Note that KO, as opposed to PA, accommodates rows of trees on both sides of the street. These were not considered in the model.

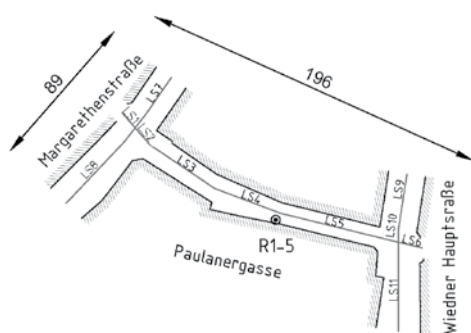


Figure 1: Schematic plan of the location Paulanergasse (PA) with sound sources and receiver positions.

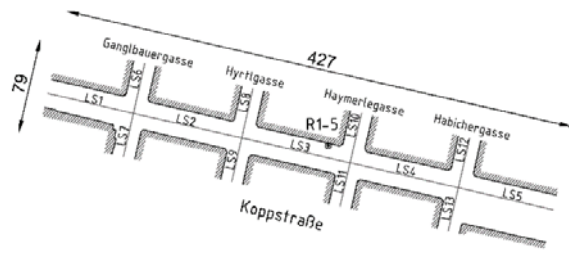


Figure 2: Schematic plan of the location Koppstraße (KO) with sound sources and receiver positions.

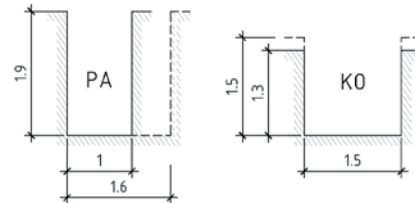


Figure 3: Height to width ratio of PA and KO.

Geometric models

The three dimensional model of the two locations were retrieved from the repository of Geodatenviewer der Stadtvermessung Wien (Stadt Wien 2018) (see Figure 4). The raw 3d model included a rather detailed articulation of the buildings. Therefore, it had to be simplified to avoid unnecessarily high simulation times. To this end, only the street fronts were kept and the number of surfaces was reduced via further adjustments. The applied methods included vertex removal, face removal, and edge collapsing (Siltanen et al. 2008). The missing ground surfaces were added manually to the model. Similarly, the cross sections of the street ends were closed by the boundary 1 and 2 surfaces (see Figure 5). Two different approaches were followed to represent the sky. One closed the model directly at the upper edge of the facades, resulting in a number of sky surfaces (see Figure 5). As this approach can lead to errors due to potential gaps or surface overlapping, a second method was applied. This included the placement of different sizes of sky boxes above the model (see Figure 6). Experience with parametric deployment of variously sized sky boxes suggest that the related choice has a rather small impact on the simulation output. Specifically, if the surfaces of the sky box are sufficiently far from the street model, the results stay stable.

The final number of the model surfaces (while using the sky box approach) was 103 in PA and 176 in KO.

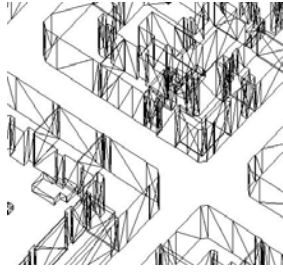


Figure 4: An example of a 3d city segment model from the repository of Geodatenviewer der Stadtvermessung Wien.

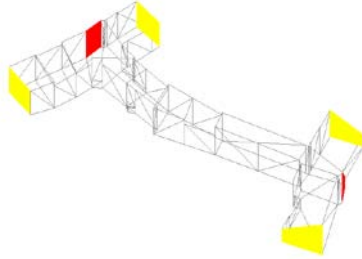


Figure 5: Boundary 1 (yellow) and 2 (red) surfaces and sky attached to the facades.

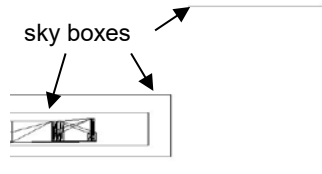


Figure 6: Small, medium and big sky box placed above a model.

Surface properties

With regard to model surfaces, the room acoustic application requires frequency based absorption data and a characteristic scattering value at 707 Hz. Previous research suggests that if the absorption coefficients of large surfaces are well estimated, neither small variations in these values nor the absorption of small surfaces have a notable effect on simulated indices (Naylor and Rindel 1992). Therefore, only a limited number of surface types with distinct characteristics were used in order to keep a track of their impact. That said, the wide variety of available materials and a limited knowledge on the real surfaces can be a common source of error (Aspöck et al. 2016; Christensen, et al. 2014). In our study, information on the sound absorption coefficients was obtained from the material library of Odeon and from other research-based sources regarding ground surfaces (Knabben et al. 2016; Raimundo et al. 2010; Paje et al. 2008; Mun, 2010). Facades display rather diverse types of articulation (see Figure 7 and 8). This, however, had little influence on mean area-weighted

absorption values. Therefore, one absorption data set was assigned to all buildings. Furthermore, sky surfaces were considered to absorb all incident sound energy. Similarly, boundary 1 and 2 surfaces were assumed to be highly absorbing, as they are not expected to provide any noteworthy energy contributions to the receiver positions from their direction. An overview on the absorption coefficients of all surface types is provided in Figure 9.



Figure 7: Photomontage of Paulanergasse.

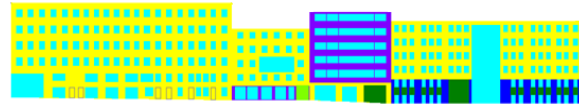


Figure 8: Material map of Paulanergasse.

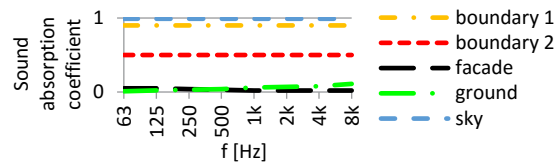


Figure 9: Sound absorption coefficient of model surfaces.

As to the scattering coefficients, those entailed in the Odeon manual (Christensen 2011) were followed. The assigned values were assumed to include scattering effects both due to the material quality and the size of the surfaces. Therefore, values of 0.20, 0.30, and 0.50 were assigned to the façade, the ground, and the boundary surfaces respectively.

Sound sources

The sound sources were represented by line sources in the simulation tool (see Figure 1 and 2). In order to account for SPLs due to road traffic, predictive noise models were developed (Quartieri et al. 2009). Relevant information regarding the road traffic was gathered from in situ observations, which served as input data to the CNOSSOS predictive traffic noise model (Kephelopoulos et al. 2012). The standard takes into account traffic flows by vehicle categories and speed. It also accounts – via correction factors – for the temperature, the road gradient, the road surface, and the change of speed. In multiple calculation steps, the rolling and the propulsion noise, the sound emission of a single vehicle and, finally, the sound power level of the

traffic flow is obtained by each line source. The results of this step are shown in Figure 10.

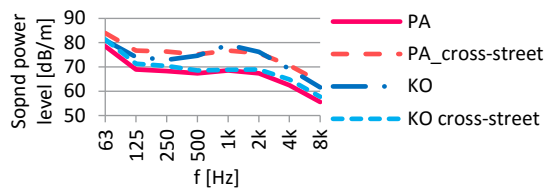


Figure 10: Derivation of sound power levels of line sources based on CNOSSOS. PA, PA cross-street, KO and KO cross-street.

Receivers

The receivers were placed in accordance to their position during the original measurement campaign. Vertically, microphones were arranged at five different levels above ground, namely: 1.5, 4, 7, 10 and 13 m in PA, and 1.5, 4, 7.5, 11 and 14.5 m in KO. The minimum distance of the microphones from walls and sound sources followed standard-based recommendations (ISO 2009).

Simulation tool settings

Previous research contributions on the impact of simulation tool settings revealed that the number of rays should be at least 25 to 100 times larger than those of surfaces (Naylor and Rindel 1992). In this study, the number of late rays was set to 10000. The assignment of the impulse response length was based on the quick estimate of the reverberation time and amounted to 2500 ms. Surface scattering followed material assignment and the distribution of the scattered rays followed oblique Lambert directivity.

Weather conditions

The weather conditions were taken into account by the room acoustic application and responsible for the proper simulation of sound propagation through the medium. The in situ measurements took place during spring between 5 to 6 pm both in PA and KO. Regarding weather conditions, the baseline model used the default input parameters of the software, i.e. 20°C for air temperature and 50% for relative humidity (RH).

RESULTS

Overview

Simulation results (initial model) were compared with corresponding measured values. The degree of the agreement can be expressed in terms of SPL differences (Δ SPL) or root mean

square deviations (RMSD). To this end, Δ SPL values were cumulated over frequencies between 63 Hz and 8 kHz or by receiver positions to obtain a single value indicator. Subsequently, a number of model input modifications were explored, which could improve the predictive performance of the simulation model in the present case. Finally, a general sensitivity analysis explored the impact of different input assumptions (e.g., surface absorption, traffic noise, weather, simulation settings, receiver positions) on simulation output. Thereby, the baseline simulation results were used as reference.

The predictive performance of the initial model (baseline)

As mentioned before, the initial simulation model of the two locations was generated without any reference to the measurement results. Figure 11 shows a comparison of simulated and measured frequency-dependent SPLs for both locations (receiver height 4 m). Figure 12 shows measured and simulated A-weighted SPLs as a function of the height of the receiver points above the street level.

Figure 13 shows the simulation errors (in terms of RMSDs) for the two locations (all heights) as a function of frequency. Figure 14 shows RMSDs for the two locations (all frequencies) as a function of the height of the receiver points above the street level.

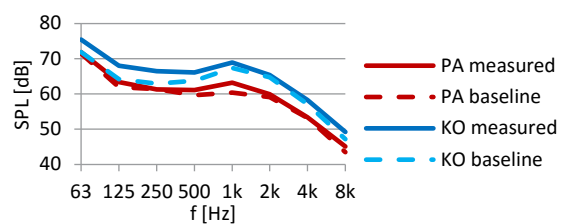


Figure 11: SPLs of measurements and baseline simulation models at 4m, PA and KO.

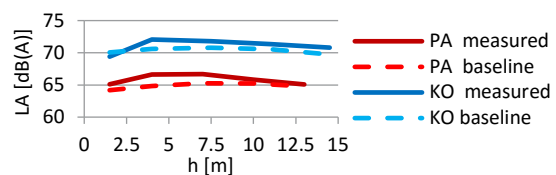


Figure 12: SPL(A) from measurements and baseline simulation by receiver positions, PA and KO.

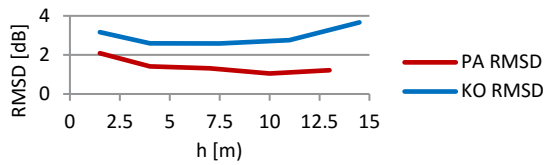


Figure 13: RMSD from measurements by receiver positions, PA and KO.

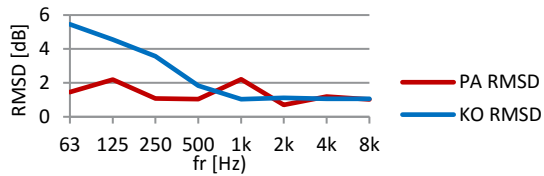


Figure 14: RMSD from measurements by frequencies, PA and KO.

Improvement potential of the baseline model

Surface absorption and scattering

Figure 15 and 16 show the deviation of simulation results from measurements for model variations with altered absorption coefficients (0.01, 0.10 and 0.90) in terms of boundary 1 and 2 surfaces, and increased scattering of all surfaces, namely +50% and a scattering coefficient value of 1.00.

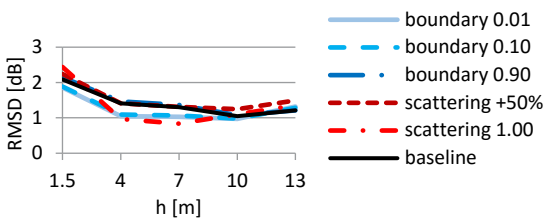


Figure 15: Deviation of simulation results from measurements (expressed in terms of RMSD) for alternative boundary absorption and surface scattering assumptions (PA).

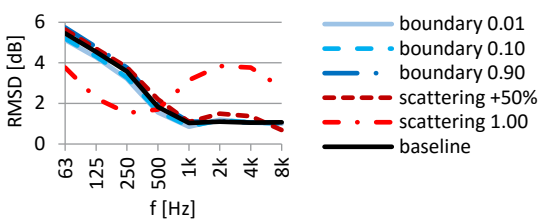


Figure 16: Deviation of simulation results from measurements (expressed in terms of RMSD) for alternative boundary absorption and surface scattering assumptions (KO).

Sound absorption of façades

Figure 17 shows the influence of the variation of façade absorption (-50%, +50%, +100% and 0.5).

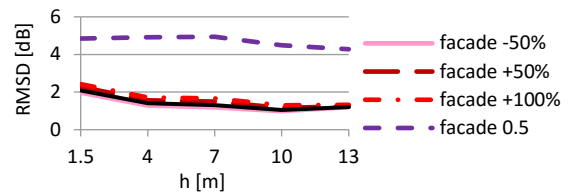


Figure 17: Deviation of simulation results from the measurements (expressed in terms of RMSD) for alternative facade absorption assumptions (PA).

Road surface absorption and road traffic

The impact of a porous surface (10 month old semi dense asphalt with 12% void content) was contrasted to the surface used in the initial model (dense graded asphalt) (see Figure 18). Moreover, a change of the number of vehicles by +50% and -50%, as well as the alteration of the speed limit (± 10 km/h) were considered. The deviation of the resulting model predictions from the measurements are shown in terms of RMSD by receiver positions in Figure 19. As Figure 14 and 16 suggest, simulation errors increase with lower frequencies in case of KO. The potential role of the traffic flow data is shown via more pronounced changes in the corresponding assumptions (see Figure 20).

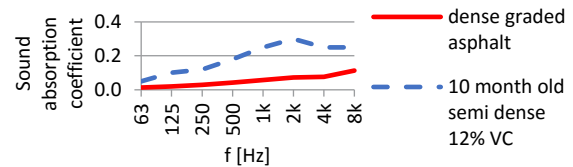


Figure 18: Sound absorption of road surfaces (Knabben et al. 2016; Raimundo et al. 2010; Paje et al. 2008; Mun, 2010).

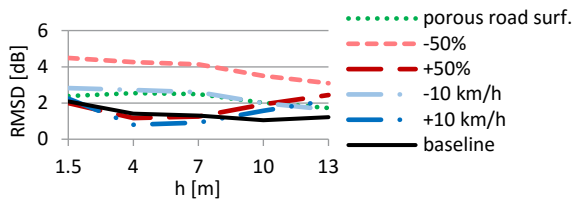


Figure 19: Deviation of simulation results from the measurements (expressed in terms of RMSD) for alternative road surface and traffic assumptions (PA).

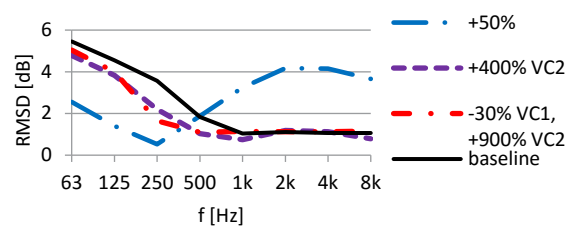


Figure 20: Deviation of simulation results from the measurements (expressed in terms of RMSD) for alternative traffic composition assumptions (VC1 – passenger cars, VC2 – medium heavy vehicles) (KO).

Simulation settings

With regard to simulation settings the impact of variation in impulse response length (± 1000 ms) and number of late rays (factor 10) were tested (see Figure 21).

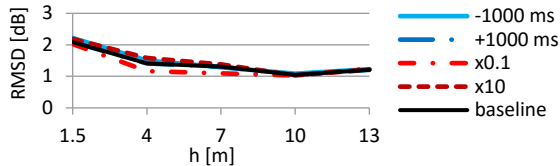


Figure 21: Impact of impulse response length and number of rays on RMSD (PA).

Receiver position

The impact analysis regarding receiver positions tested two options, including either a shift by 1.5 m towards the center of the street or by 8 m parallel to the façade (see Figure 22).

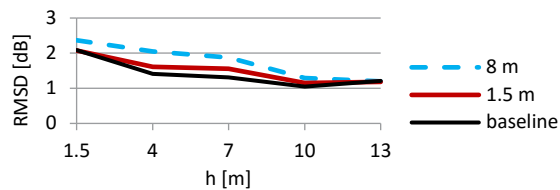


Figure 22: Impact of alternative assumptions regarding receiver position in terms of RMSD (PA).

Weather conditions

To assess the impact of the weather conditions, alternative temperature (3° , 13° , 33°C) and relative humidity (30 and 85%) assumptions were examined. The resulting RMSD values are shown by receiver position in Figure 23.

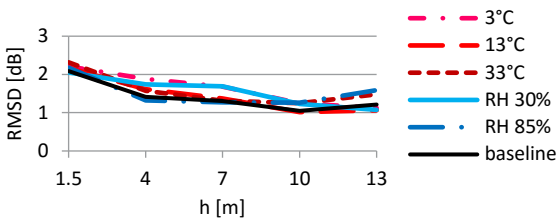


Figure 23: Impact of alternative weather condition assumptions in terms of RMSD by receiver positions (PA).

Sensitivity of simulation results to model input assumptions

The same set of model input variations were considered to explore the relative importance of different model input assumptions. Toward this end, we compared the baseline model results

with those obtained due to aforementioned variations (see Figure 24 to 30).

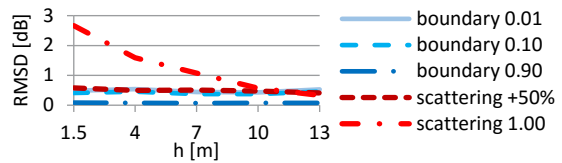


Figure 24: Deviation of simulation results from the baseline model (expressed in terms of RMSD) for alternative boundary absorption and surface scattering assumptions (PA).

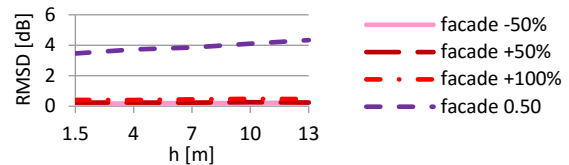


Figure 25: Deviation of simulation results from the baseline model results (expressed in terms of RMSD) for alternative facade absorption assumptions (PA).

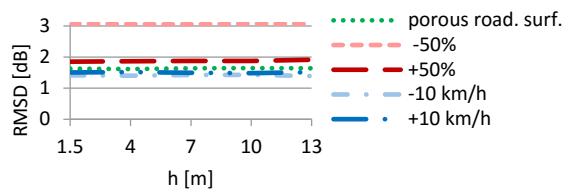


Figure 26: Deviation of simulation results from the baseline model results (expressed in terms of RMSD) for alternative road surface and traffic assumptions (PA).

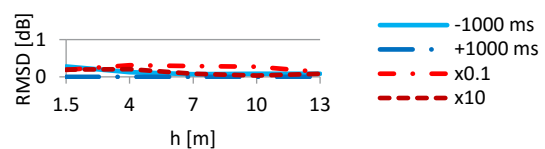


Figure 27: Deviation of simulation results from the baseline model results (expressed in terms of RMSD) for alternative simulation settings assumptions (PA).

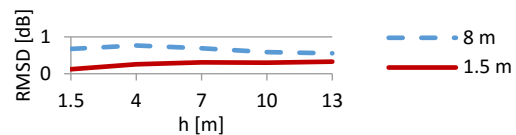


Figure 28: Deviation of simulation results from the baseline model results (expressed in terms of RMSD) for alternative receiver position assumptions (PA).

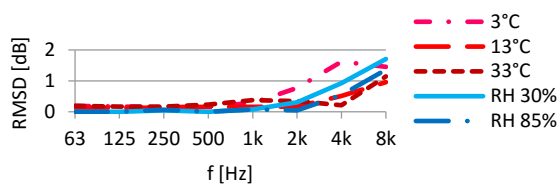


Figure 29: Deviation of simulation results from the baseline model results (expressed in terms of RMSD) for alternative weather conditions assumptions (PA).

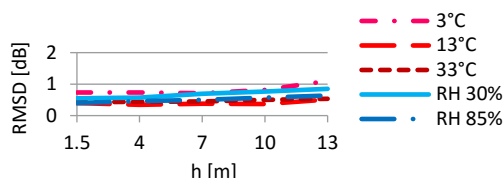


Figure 30: Deviation of simulation results from the baseline model results (expressed in terms of RMSD) for alternative weather conditions assumptions (PA).

DISCUSSION

As it can be seen in Figure 11, baseline simulation errors in PA case are less than 1 dB for most frequency bands. In case of KO, errors are higher for frequencies under 500 Hz. The results also suggest that the height of the receiver position has a rather limited influence on SPLs, namely less than 1.5 dB (simulations) and 2 dB (measurements) (see Figure 12). Furthermore, the findings suggest that the predictive potential of the model is independent from receiver position, however, strongly depends on frequency in KO case (see Figure 13 and 14).

While analyzing baseline model's results, we noticed that a higher level of reflectance of boundaries 1 and 2 as well as the façade surfaces could improve predictions (see Figure 15, 16 and Figure 17). Assuming 100% scattering for all model surfaces improves SPL predictions for low frequencies, but at the cost of higher octave bands. Alternative assumptions regarding sound power level did not improve the results of the baseline model (Figure 19). Nevertheless, looking at the impact of traffic composition revealed that more medium heavy vehicles (VC2) in KO could help to reduce prediction errors at low frequencies (see Figure 20).

None of the assumptions regarding simulation settings, receiver positions, and weather conditions yielded better results (see Figure 21, 22 and 23). Overall, the findings suggest that most input parameter assumptions in the baseline model were already fairly well made. Figure 31 gives an overview of the frequency-

dependent simulation errors (Δ SPL) for a number of model input variations and a receiver position height of 4 m. The graph suggests that higher scattering coefficients result in a somewhat better predictive performance than the baseline.

While the changes in the absorption of the boundary 1 and 2 surfaces had a negligible impact on SPLs, increased scattering affected receivers close to the ground considerably (see Figure 24). With regard to façade absorption, only large changes to the assumed values can influence the calculated SPLs (see Figure 25). Input assumptions pertaining to the sound power levels have significant consequences independently from receiver positions and frequencies (see Figure 26). On the other hand, SPL results were found to be fairly stable in the face of alterations to simulation settings and receiver positions (see Figure 27 and 28). Regarding weather, higher frequencies are more sensitive to changes (Figure 29). Likewise, the dependency appears to slightly grow with receiver position elevation (see Figure 30).

Finally, Figure 32 gives an overview of the impact of various input assumptions (in terms of Δ SPLs with reference to the baseline results) at 4 m elevation. Thereby, 100% scattering, a value of 0.5 for façade absorption, and the reduction of the traffic flow by 50% were identified as the most influential input variables.

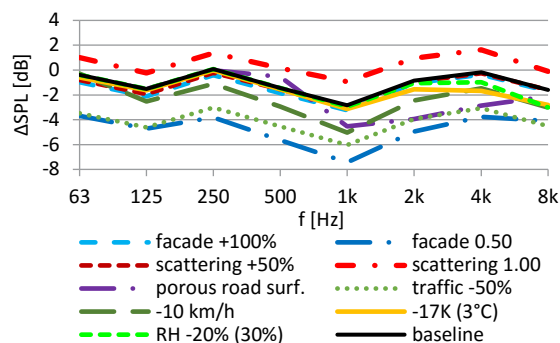


Figure 31: Comparison of baseline Δ SPL with those with alternative input assumptions (PA).

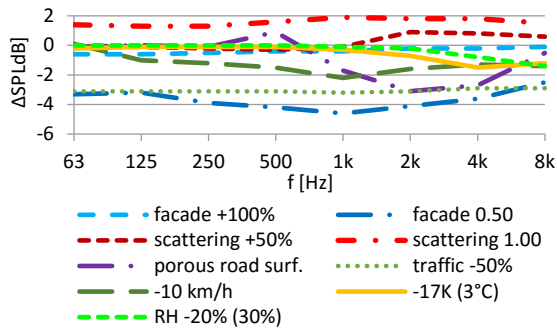


Figure 32: Comparison of different input assumptions with the baseline case in terms of frequency-dependent Δ SPL (PA).

CONCLUSION

The results of this contribution are manifold. On the one hand, we outlined an approach toward input data derivation with regard to urban canyon model generation. On the other hand, we illustrated the potential for the deployment of a room acoustic simulation tool to an outdoor sound propagation problem (urban canyons). Overall, the findings suggest that a fairly reasonable agreement between simulation results and measurements can be achieved at a relatively low computational cost. However, the level of congruence between simulated and measured results is smaller at lower frequencies, for receivers close to the ground. The findings also suggest that, in the present case, the simplification of the models' geometry did not detrimentally influence simulation's predictive performance. Nevertheless, a more complex urban situation, as it was the case for KO, can introduce additional uncertainty to the input parameters, and consequently, to the results.

Further research could explore the potential of highly absorbing façades as well as the effects of obstructions, vegetation (trees), and traffic composition. Additionally, real time simulation of traffic flow emissions could capture the dynamics of SPL fluctuations. Thus, a basis would be provided for advanced human response related research (De Coensel, et al. 2016). Further studies of the kind presented here have the potential to virtually explore the potential of multiple noise abatement scenarios, thus providing an effective decision support platform for urban planners.

REFERENCES

Aspöck, L., Opdam, R., Behler, G. and Vorländer, M., 2016. Acquisition of boundary conditions for a room acoustics simulation comparison.

In: International Symposium on Musical and Room Acoustics (ISMRA2016), 11-13 September 2016, La Plata, Argentina.

Christensen, C. L., 2011. Odeon User Manual. Lyngby: Industrial, Auditorium and Combined Editions.

Christensen, C. L., Koutsouris, G. and Rindel, J. H., 2014. Estimating absorption of materials to match room model against existing room using a genetic algorithm. In: Forum Acusticum, 7-12 September 2014, Krakow. DOI: 10.13140/2.1.1588.8647.

De Coensel, B., Brow, A. L. and Tomerini, D., 2016. A road traffic noise pattern simulation model that includes distributions of vehicle sound power levels. Applied Acoustics 111, pp. 170-178. DOI: 10.1016/j.apacoust.2016.04.010.

Hornikx, M., 2009. Numerical modeling of sound propagation to closed urban courtyards. Thesis for the degree of doctor of philosophy: Chalmers University of Technology.

Hornikx, M., 2016. Ten questions concerning computational urban acoustics. Building and Environment 106 (6), pp. 409-421. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.06.028

ISO, 2009. International Standard ISO-3382-1: Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces.

Kephalopoulos, S., Paviotti, M., Anfosso Lédée, F., 2012. Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS EU), EUR 25379 EN. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012. Available from http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC72550/cnossos-eu%20jrc%20reference%20report_final_on%20line%20version_10%20august%202012.pdf, accessed 15 January 2018.

Knabben, R. M., Trichês, G., Gerges, S. N.Y. and Vergara, E. F., 2016. Evaluation of sound absorption capacity of asphalt mixtures. Applied Acoustics 114, pp. 266-274. DOI:10.1016/j.apacoust.2016.08.008

Mun, S., 2010. Sound absorption characteristics of porous asphalt concrete pavements. Canadian Journal of Civil Engineering 37(2), pp. 273-278. DOI: 10.1139/L09-142.

Naylor, G., 1992. Treatment of Early and Late Reflections in a Hybrid Computer Model for Room Acoustics. In: 124th ASA meeting, November 1992, New Orleans.

Naylor, G. and Rindel, J.H., 1992. Predicting Room Acoustical Behaviour with the Odeon

Computer Model. In: 124th ASA meeting, November 1992, New Orleans.

Odeon A/S, 2017. Odeon.

Paje, S. E., Bueno, M., Terán, F., Viñuela, U. and Luong, J., 2008. Assessment of asphalt concrete acoustic performance in urban streets. *The Journal of the Acoustical Society of America* 123(1439). DOI: 10.1121/1.2828068.

Quartieri, J., Mastorakis, N. E., Iannone, G., Guarnaccia, C., D'Ambrosio, S., Troisi, A. and Lenza, T.L.L., 2009. A review of traffic noise predictive noise models. In: 5th WSEAS Int. Conf. on Applied and Theoretical Mechanics" (MECHANICS'09), 14-16 December 2009, Puerto De La Cruz, Tenerife, Spain.

Raimundo, I., Freitas, E., Inácio, O. and Pereira, P., 2010. Sound absorption coefficient of wet gap graded asphalt mixtures. In: 39th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (INTER-NOISE 2010), 13-16 June 2010, Lisbon.

Savioja, L., 1999. Modeling techniques for virtual acoustics. Ph.D. dissertation: Helsinki University of Technology, Espoo, Finland.

Stadt Wien, 2018. Geodatenviewer der Stadtvermessung Wien. Available from: <https://www.wien.gv.at/ma41datenviewer/public/>, accessed 15 March 2018.

WHO-JRC, 2011. Burden of disease from environmental noise - Quantification of healthy life years lost in Europe. Available from http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/136466/e94888.pdf; accessed 15 January 2018.

TRANSIENTE MODELLIERUNG EINES VERDICHTERS ZUM VERGLEICH VON NIEDRIG-GWP KÄLTEMITTELN FÜR KOMPRESSIOWÄRMEPUMPEN

C. Vering^{1,*}, T. Storek¹, M. Engelpracht¹, M. Lauster¹ und D. Müller¹

¹ RWTH Aachen, E.ON Energieforschungszentrum, Lehrstuhl für Gebäude und Raumklimotechnik, Aachen, Germany

Korrespondenzautor*: cvering@eonerc.rwth-aachen.de

KURZFASSUNG

Die Verkaufsmenge halogenerter Kältemittel wird zukünftig durch die F-Gas-Verordnung zum Schutz der Erdatmosphäre reguliert. Damit wird ein Preisanstieg dieser Kältemittel erwartet, sodass Alternativen gefunden werden müssen. Die Wärmepumpe gilt für die Energiewende als Schlüsseltechnologie, die durch den Austausch des Kältemittels angepasst entwickelt werden muss. Die Untersuchung alternativer Kältemittel ist in Simulationsmodellen notwendig, um experimentellen Aufwand zu reduzieren und effiziente Wärmepumpen zu entwickeln.

Eine entscheidende Komponente zur Sicherstellung hoher Effizienz stellt der Verdichter dar. Das entwickelte Modell basiert auf einem literaturgestützten, modular, skalierbaren Effizienzmodell, das gegen R134a kalibriert wurde. Die Anwendung des Buckingham-Theorems erlaubt es, den physikalischen Zustand anderer Kältemittel in Relation zu setzen und Effizienzen alternativer Kältemittel abzuschätzen.

Durch ein zweistufiges Verfahren kann die Anzahl potentieller Kältemittel reduziert und bewertet werden. Die Untersuchung günstiger Kältemittel zeigt, dass nicht halogenierte Kältemittel ein großes Potential für den Einsatz in Wärmepumpen aufweisen.

ABSTRACT

The F-Gas Regulation for the protection of the Earth's Atmosphere will regulate the halogenated refrigerants' sales volume. This leads to an increase in the price of these refrigerants. Hence, alternatives have to be found. The heat pump is

regarded as key technology for the energy policy, which must be redeveloped. In simulation, the investigation of non-halogenated refrigerants is necessary in order to reduce investigation costs and to develop heat pumps efficiently.

The compressor is a decisive component to ensure high efficiencies. The applied model is a literature-based, modular and scalable efficiency model, which is calibrated for R134a use case.

The application of the Buckingham theorem allows the physical state estimation of new refrigerants and thereby, the efficiency of alternative refrigerants is estimated.

A two-stage evaluation process reduces the number of potential refrigerants. The investigation of favourable refrigerants shows that non-halogenated ones have a great potential for application in heat pumps.

EINLEITUNG

Der Primärenergieverbrauch (PEV) soll im Rahmen der „20-20-20-Ziele“ der Europäischen Union bis 2020 um 20 % gegenüber dem Jahr 1990 reduziert werden (European Environment Agency, 2016). Etwa 26 % des deutschen thermischen Endenergieverbrauchs wird von privaten Haushalten verursacht. Die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser der privaten Haushalte geschieht überwiegend durch die Verbrennung fossiler Energieträger und besitzt somit direkten Einfluss auf den PEV (Kelly et al., 2016). Zur Senkung des PEVs ist daher die Integration der Wärmepumpe notwendig, die einen Großteil thermischen Endenergie aus Umweltwärme bezieht. Typische Kältemittel sind

hierbei Flurkohlenwasserstoffe (FCKW), die zum Teil hohe Treibhauspotentiale (GWP) aufweisen können. Die Verkaufsmenge von Kältemitteln mit hohem GWP reguliert die in 2015 in Kraft getretene F-Gas Verordnung, sodass alternative Kältemittel eingesetzt werden müssen.

Zur Reduktion der Entwicklungskosten werden simulative Potentialabschätzungen durchgeführt. Die Potentialabschätzungen sind nach (Domancki, 2017 und Dai, 2015) statisch und geben erste Indizien auf günstige alternative Kältemittel. Jedoch unterliegen insbesondere Luft-zu-Wasser-Wärmepumpen, die einfach im Gebäudebestand nachgerüstet werden können, starken dynamischen Schwankungen am Verdampfer und Kondensator, sodass statische Kennzahlen das Potential von Wärmepumpen überschätzen. Huchtemann (Huchtemann, 2012) bestätigt, dass statisch kalkulierte Jahresarbeitszahlen nach DIN 14825 generell größer als im Feld gemessene Jahresarbeitszahlen ausfallen. Aus diesen Gründen sind dynamische Auslegungssimulationen für Wärmepumpen notwendig, um beispielsweise zuverlässige energetische Prognosen ermitteln zu können.

Es gibt bereits verfügbare Simulationsmodelle für Wärmepumpen in mehreren öffentlichen und kommerziellen Bibliotheken (Müller, 2016, Cimmino und Wetter, 2017, Quoilin, 2014 und Gräber 2010). Die Simulationsmodelle basieren zum Teil auf datenbasierten Polynomialansätzen, mit denen Kältemittel relativ zueinander verglichen werden können. Diese Vergleiche sind innerhalb des Betriebsbereichs der Wärmepumpen unter vereinfachenden Annahmen gültig. Unter dynamischen Randbedingungen und außerhalb gemessener Datenbereiche sind belastbare Aussagen zu den absoluten energetischen Prognosen jedoch nicht immer zuverlässig. Folglich ist die physikalische Modellierung der Wärmepumpenkomponenten erforderlich, um Potentiale korrekt abschätzen zu können. Für die physikalische Modellierung zeigt die Modellierungssprache Modelica viele Vorteile, um sowohl eine hohe Transparenz sowie eine gezielte Wiederverwendbarkeit der Simulationsmodelle sicherzustellen.

Zur physikalisch korrekten Abbildung des Kältemittelverhaltens in mechanischen Wärmepumpen müssen sowohl die Bilanzgleichungen als auch die Effizienzmodelle implementiert werden. Die Implementierung erfordert zur Parametrierung und Validierung detaillierte

experimentelle Datensätze, die nicht immer verfügbar sind.

Diese Arbeit stellt einen auf Kältekreise angewandten modularen und skalierbaren Architekturansatz vor, mit dem ein Wärmepumpenmodell auf unterschiedlichen Detailebenen verwendet und angepasst werden kann. Abschließend dient das entwickelte Modell in einem zweistufigen Auswahlverfahren zur Potentialabschätzung günstiger Kältemittel.

MODELLIERUNGSANSATZ

Die Modellierungssprache Modelica erlaubt eine objektorientierte Abbildung ingenieurtechnischer Systeme (Tummescheit, 2002). Die objektorientierte Modellierungsweise unterstützt in Kombination mit einer akasalen Formulierung eines Differential-algebraischen Gleichungssystems physikalische Systemmodellierungen. Die einfache und schnelle Handhabung komplexer Simulationsmodelle gestaltet sich aber häufig schwierig. Zur Senkung der Komplexität und damit verbundenen Einstiegshemmnissen sowie zur Erhöhung der Anwenderakzeptanz in die Modellierung dient das in Abbildung 1 dargestellte modulare und skalierbare Architekturkonzept nach Tiller (Tiller, 2017).

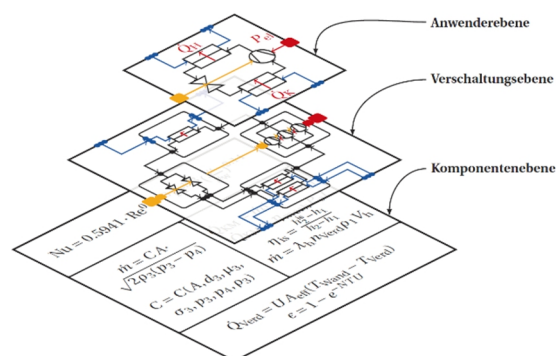


Abbildung 1: Entwickelte Modellarchitektur zur Umsetzung der Modularität und Skalierbarkeit der entwickelten Simulationsmodelle.

Die Modellentwicklung wird strukturell in drei Ebenen unterteilt, deren Detaillierungsgrad mit zunehmender Modelltiefe ansteigt. Die erste Ebene ist die Anwenderebene und ermöglicht die Parametrierung des Gesamtmodells. Somit müssen die Einzelmodelle nicht im Detail vom Anwender betrachtet oder verschaltet werden. Hingegen stellt die zweite Ebene die Verschaltungsebene dar, in der die Submodelle miteinander verbunden werden. Hier können unterschiedliche Schaltschemata untersucht werden. Eine vektorielle Notation der Sub-

modelle erlaubt zudem eine Anordnung paralleler Submodellinstanzen. Die detaillierteste Ebene des vorgestellten Ansatzes ist die Komponentenebene. Diese Ebene wird von Komponentenentwicklern genutzt, die Simulationsmodelle der jeweiligen Systemkomponenten in unterschiedlichen Detaillierungsgraden bereitstellen.

Diese systematische Strukturierung erlaubt sowohl eine einfache Handhabung des Modells auf oberster Ebene für Anwender als auch eine entwicklerorientierte Formulierung auf unterster Ebene. Zudem ist ein derart implementiertes Modell einfach erweiterbar und Anpassungen des Detaillierungsgrades je nach Anwendung und Anforderung sind integrierbar. Diese Umsetzung unterstreicht die modulare und skalierbare Modellierungsweise.

In Abbildung 2 ist das vollständig modulare, skalierbare Wärmepumpenmodell gemäß dem Architekturansatz auf Verschaltungsebene dargestellt.

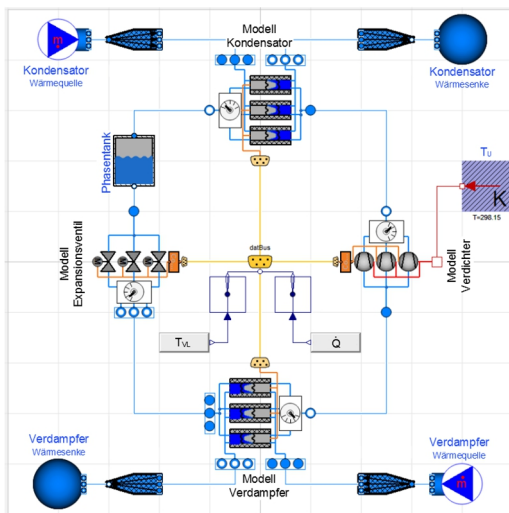


Abbildung 2: Schaltbild des modularen und skalierbaren Wärmepumpenmodells in Modelica.

Es sind die vier Hauptkomponenten Verdampfer, Verdichter, Kondensator sowie Expansionsventil abgebildet. Zudem ist ein Phasentrenner nach dem Kondensator vorgesehen, der die Stabilität des numerischen Lösers (Dassel, Lsodar) bei der Lösungsiteration erhöht.

In einem BUS-Koppler erfolgt die strikte Separation regelungstechnischer Signale vom physikalischen Modell, um neue Regelungskonzepte auf jeder Verschaltungsebene einfach implementieren zu können. Die Abbildung des physikalischen Systemverhaltens wird durch die Verwendung von Erhaltungsgleichungen umgesetzt.

Je nach Anwendungsfall und Anforderung an das Modell können Detaillierungsgrade für Submodelle festgelegt werden, die immer einem Kompromiss aus Abbildungsgenauigkeit und erforderlicher Berechnungsdauer unterliegen. Sowohl für den Einsatz des Modells in Jahressimulationen als auch für die Verwendung als digitalen Prüfstandszwilling sind beide Faktoren enorm wichtig.

Einerseits sind Jahressimulationen in der Vorauslegung zur energetischen sowie zur ökonomischen Bewertung von Wärmepumpen essentiell und müssen in einem annehmbaren zeitlichen Umfang durchgeführt werden können. Das erfordert kurze Simulationszeiten. Andererseits müssen die berechneten Ergebnisse zuverlässig sein, wodurch die Genauigkeit entsprechend hoch sein muss.

Die Verwendung als digitalen Zwilling erfordert neben der Echtzeitfähigkeit des Modells die Abbildung thermischer Trägheiten, um eine Beurteilung neuer Regelungskonzepte zu erlauben. Alle verwendeten Ansätze sind daher auf Basis aktueller Ansätze aus der Literatur ausgewählt und implementiert worden, was im Rahmen dieser Arbeit am Beispiel des Verdichters detailliert dargestellt wird.

Eine entscheidende Rolle zur Bereitstellung thermischer Energie wird in Wärmepumpen dem Verdichter zugesprochen, da er als aktive, regelbare Komponente für die effiziente Bereitstellung der Anforderungen verantwortlich ist. Ein Maß für die Güte der bereitgestellten Wärme ist der Coefficient of Performance (COP), der als Quotient aus bereitgestellter Heizwärme am Kondensator \dot{Q} zu elektrischer Leistung P_{el} am Verdichter definiert ist:

$$COP = \frac{\dot{Q}}{P_{el}} \quad (1)$$

Eine Reduktion der aufgenommenen elektrischen Leistung bei konstanter Heizwärme erhöht den COP . Für die energetische Bewertung einer Wärmepumpe ist damit die zuverlässige Bestimmung von P_{el} entscheidend, um Effizienzen nicht zu über- oder unterschätzen. Insbesondere der Vergleich unterschiedlicher Arbeitsmittel kann erst durchgeführt werden, wenn die Berechnung von P_{el} gültige Aussagen zulässt. Statische Berechnungsverfahren verwenden zur Abschätzung von P_{el} die Beschreibung der Kompression mit Hilfe des isentropen Wirkungsgrads (Dai, 2015). Dieser

wird typischerweise konstant angenommen und nimmt Werte zwischen 0,52...0,7 an (Cuevas, 2009, Mardorf, 2011, Winandy, 2002). Unter statischen Randbedingungen ist dieses Verfahren für relative Vergleiche von unterschiedlichen Kältemitteln gültig. In dynamischen Simulationen ist die Annahme des konstanten Wirkungsgrads aber nicht zulässig. Zudem müssen bei der transienten Abbildung der Kompression weitere Verluste betrachtet werden. Die Verlustketten sind auf Basis der Publikationen in Abbildung 3 dargestellt.

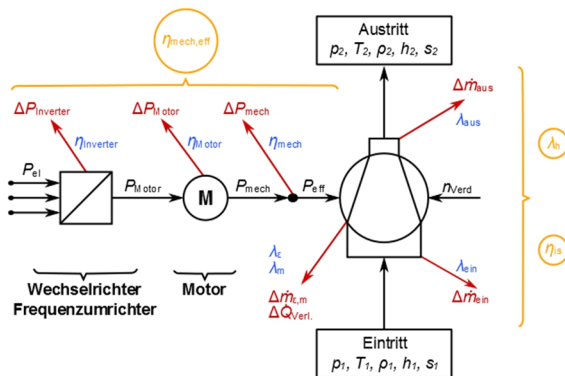


Abbildung 3: Schematische Darstellung möglicher Verlustmechanismen von Verdichtern der Familie der Drehkolbenverdichter. Wirkungsgrade sind mit einem η , zugehörige Verluste mit einem Δ und effektive Wirkungsgrade mit einem Kreis gekennzeichnet.

Der effektive mechanische Wirkungsgrad $\eta_{\text{mech,eff}}$ fasst die Inverterverluste ΔP_{inv} , die Motorverluste ΔP_{Motor} und mechanischen Verluste ΔP_{mech} zusammen. Der volumetrische Wirkungsgrad λ_h berücksichtigt die Schadraumverluste λ_e , Ein- und Auslassverluste $\lambda_{h,\text{ein,aus}}$ sowie Undichtigkeitsverluste λ_m . Der isentrope Wirkungsgrad η_{is} beinhaltet keine weiteren Verluste, jedoch ist der Verdichter allgemein nicht als adiabat anzusehen und Wärmeverluste $\Delta \dot{Q}_{\text{verl}}$ sind zu beachten.

Die notwendigen Wirkungsgrade ($\eta_{\text{mech,eff}}$, λ_h , η_{is}) werden literaturbasiert ermittelt und für die Verdichtfamilie der Drehkolbenverdichter als generische Kennfelder aufgespannt.

Der Wirkungsgrad wird damit als Funktion von Drehzahl und Druckverhältnis für jeden Arbeitspunkt beschrieben. Die explizite Formulierung in Form von Kennfeldern erlaubt dabei eine schnelle Berechnung der elektrischen Leistung P_{el} als Austrittsgröße des Modells bei hoher Genauigkeit mit der Drehzahl n als vorgegebener Regelgröße. Das Druckverhältnis $\Pi(\dot{Q}, \tau)$ wird iterativ ermittelt,

Die Berechnung der elektrischen Leistung basiert auf den Erhaltungsgrößen für die Masse m und Arbeit W abgeleitet nach der Zeit τ . Die Kopplungsbedingung der beiden Größen wird durch den isentropen Wirkungsgrad hergestellt. Daraus ergibt sich folgendes Gleichungssystem:

$$\dot{m}(n, \Pi, \tau) = \frac{dm(\tau)}{d\tau} = \lambda_h(n, \Pi) * \rho_1 * V_C * n(\tau) \quad (2)$$

$$P_{\text{el}}(n, \Pi, \tau) = \frac{dW}{d\tau} = \frac{\dot{m}(\tau)(h_2 - h_1)}{\eta_{\text{mech,eff}}(n, \Pi)} \quad (3)$$

$$\eta_{\text{is}}(n, \Pi) = \frac{v dp}{v dp + T ds} = \frac{h_{2,\text{is}} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (4)$$

Eingeführte Variablen sind die Dichte ρ , das Hubvolumen des Verdichters V_C , die Enthalpie h , das spezifische Volumen v , der Druck p , die Temperatur T und die spezifische Entropie s .

Zur Kalibrierung werden Literaturdaten für das Kältemittel R134a herangezogen (Cuevas, 2009). Es kann gezeigt werden, dass der Ansatz der generischen Wirkungsgrade generell eine gute Möglichkeit zur Vorhersage des Massenstroms und der elektrischen Leistung bieten. Die relative gemittelte Abweichung der aufgenommenen elektrischen Leistung unterschätzt ohne Kalibrierung den experimentellen Wert um etwa 30 % und dient daher nur als relativer Richtwert. Der Massenstrom wird im Mittel um etwa 5 % unterschätzt. Die qualitativen Verläufe sind jedoch physikalisch korrekt, was die Richtigkeit des Ansatzes stützt. Eine Kalibrierung anhand von Messdaten reduziert die mittlere Abweichung auf unter 5 % für beide Größen (Cuevas, 2009, Storek 2018). Damit ist die Anwendbarkeit für dynamische Simulationen sichergestellt.

Eine Abschätzung anderer Kältemittel ist bisher jedoch nicht zulässig, sofern diese dem Kältemittel R134a nicht thermodynamisch ähnlich sind. Damit berechnet das Verdichtermode mit alternativen Kältemitteln keine abschätzbaren Zustandsänderungen. Zur Erhöhung der Zuverlässigkeit wird deshalb die physikalische Ähnlichkeitstheorie mittels PI-Theorem auf Basis von Mendoza-Miranda [16] in die Berechnungen integriert.

Mendoza-Miranda schlägt in (Mendoza-Miranda, 2016) sieben Ähnlichkeitskennzahlen π_i für die Kompression vor, welche in Tabelle 1 dargestellt sind. Entscheidenden Einfluss für den zuvor vorgestellten Ansatz nehmen π_3 und π_6 .

Das Verhältnis unterschiedlicher Molmassen (π_3) nimmt direkten Einfluss auf die Beladungsmasse des ausgefüllten Hubvolumens. Die Masse des zu fördernden Hubes erhöht sich bei steigender Molmasse. Damit steigt gleichzeitig die aufzunehmende elektrische Leistung, was den COP reduziert. Eine weitere direkte Beeinflussung wird durch die isentrope Zustandsänderung (π_6) berücksichtigt. Dieser Einfluss ist bereits aus der statischen Modellierung bekannt (Domanski, 2017 und Dai, 2015).

Tabelle 1: Ähnlichkeitskennzahlen zur Verwendung des Buckingham-Theorems angewandt für die Kompression eines Wärmepumpenprozesses. Zustandsänderung wird mit ZÄ abgekürzt.

Faktor	Berechnungsvorschrift	Einflussgröße
π_1	p_2/p_1	Druckverhältnis
π_2	n^0/n	Drehzahl
π_3	M^0/M	Molgewicht
π_4	$(p_1/p_2)^{1.5} n^3 V_c$	Hubvolumen
π_5	$(1/\Delta h_{is}^{1.5}) * n^3 V_c$	Hubvolumen
π_6	$\rho/\rho_1 \Delta h_{is}$	Isentrope ZÄ
π_7	$\frac{1}{2} * (T_2 - T_1 - T_u)^{-1}$	Isentrope ZÄ

Durch den Bezug der Ähnlichkeitskennzahlen auf das kalibrierte Simulationsmodell von R134a wird eine Abschätzung neuer Kältemittel ermöglicht, ohne diese zuvor experimentell vermessen zu müssen. Es ist jedoch zu beachten, dass dem Verdichter unterstellt wird, für neue Kältemittel gleiche Effizienzen wie mit R134a erreichen zu können.

Die weiteren Hauptkomponenten werden ebenfalls mittels Grey-Box-Ansätzen in das Modell implementiert. Für das Expansionsventil wird auf Basis des aktuellen Stands der Technik die Bernoulli'sche Energiegleichung zu Grunde gelegt. Ein Durchflusskoeffizient C bildet die Expansion des Kältemittels ab.

Die Wärmeübertrager werden durch den Moving-Boundary-Ansatz nach Bonilla (Bonilla, 2015) beschrieben, der in Abhängigkeit vorkommender Zustandsgebiete des Kältemittels verschiedene Konfigurationen des Wärmeübertragers abbildet. Die Kontrollvolumina werden dynamisch über die

Kopplung von Massen- und Energiebilanzen erfasst. Der Moving-Boundary-Wärmeübertrager ein guter Kompromiss zwischen den Anforderungen an die Genauigkeit und an die Geschwindigkeit. Diese führen jedoch im geschlossenen Kreisprozess aufgrund von algebraischen Schleifen zu numerischen Instabilitäten, sodass eine numerische Verbesserung erforderlich ist. Aktuelle Ergebnisse werden deshalb mit einem geschnittenen Kreislauf berechnet.

Nach McLinden (McLinden, 2017) können potentiell viele Kältemittel in mechanischen Wärmepumpen (> 1000) eingesetzt werden. Eine Berechnung für alle Möglichkeiten ist nicht effizient, sodass diese Anzahl systematisch reduziert werden muss.

POTENTIALABSCHÄTZUNG VON KÄLTEMITTELN

Zur systematischen Reduktion der möglichen Kältemittelanzahl müssen allgemeine Zielkonflikte, thermodynamische Anforderungen, strömungsmechanische Randbedingungen und Sicherheits- sowie Umweltaspekte berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit ein zweistufiges Auswahlverfahren vorgestellt, mit dem die Anzahl günstiger Kältemittel so weit reduziert wird, dass die übrigen Kältemittel mittels dynamischer Simulation verglichen und bewertet werden können. In einem ersten Schritt werden nun Zielkonflikte diskutiert und ungünstige Kältemittel für simulative Untersuchungen ausgeschlossen.

Abbildung 4 zeigt Kriterien, die bei neuen Systemen oder beim Austausch in bestehenden Systemen typische Zielkonflikte darstellen.

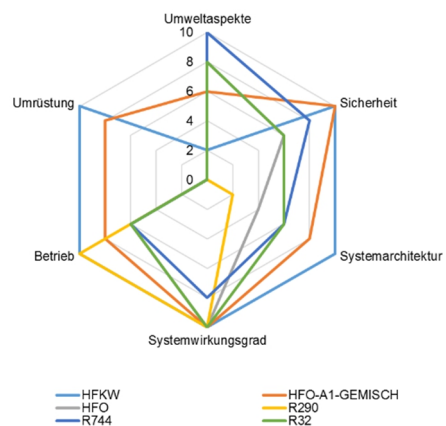


Abbildung 4: Zielkonflikte relevanter Kategorien für die Auswahl alternativer Kältemittel (Emerson Climate Technologies, 2016).

Neben der Systemauslegung und dem Betrieb werden im Gebäudebereich Sicherheit, Systemwirkungsgrad und Umrüstung genannt (Emerson Climate Technologies, 2016). Für den Einsatz eines Kältemittels müssen weitere Kriterien wie hohe Temperaturen ($> 100\text{ °C}$) vermieden werden, um siedendes Wasser im Heizkreis auszuschließen.

Kältemittelseitig muss im Betrieb außerdem die Interaktion mit dem Schmierstoff überprüft werden und die Verträglichkeit der Komponenten mit dem Kältemittel muss gegeben sein.

Bezüglich der Sicherheitsaspekte ist die Einordnung des Kältemittels in Sicherheitsklassen maßgebend. Diese werden in die Kategorien A (ungiftig) und B (giftig) eingeteilt. Außerdem wird dieser Kategorie eine Entflammbarkeitskala zugeordnet:

- 1 (keine Entflammbarkeit),
- 2 (geringe Entflammbarkeit, langsame Brenngeschwindigkeit mit Zusatz „L“),
- 3 (starke Brennbarkeit) zugeordnet.

Ein giftiges Kältemittel sollte im Gebäudebereich ausgeschlossen werden, um Nutzern nicht zu schaden. Das vielversprechende Kältemittel Ammoniak (R717) entfällt somit für die Anwendung in Wärmepumpen. Entflammbarkeit ist kein Ausschlusskriterium. Eine abweichende Sicherheitsklasse kann zwar Umrüstungen am System notwendig machen. Diese haben aber ökonomisch keinen großen Einfluss auf das Gesamtsystem.

Ein weiteres Ausschlusskriterium ist der Phasenwechsel zum Feststoff innerhalb der Betriebsgrenzen. Hier kann beispielsweise Wasser (R718) als Kältemittel ausgeschlossen werden, das unterhalb von 0 °C bei Atmosphärendruck erstarrt. Mischungen mit Glykol sind innerhalb dieser Studie auch nicht vorgesehen, da es durch Entmischungseffekte trotzdem zur Eisbildung kommen kann.

Ein transkritischer oder überkritischer Betrieb von Wärmepumpen im Kondensator wird ebenfalls ausgeschlossen. Hier sollen sicherheitstechnisch hohe Drücke vermieden werden, die sich oberhalb des kritischen Punktes einstellen. Somit dient Kohlendioxid (R744) nicht als verfügbares Kältemittel in den Simulationen.

Als letztes Kriterium dienen die umwelttechnische Größen Ozonabbaupotential (Ozon Depletion Potential: ODP) sowie das Erderwärmungspotential (Global Warming Potential: GWP). Das ODP für günstige Kältemittel muss einen Wert von Null aufweisen. Das GWP wird nach der F-Gas-Verordnung in unterschiedliche Bereiche unterteilt. Regulatorisch führt ein GWP > 750 zum direkten Ausschluss.

Zusammenfassend zeigt Abbildung 4, inwieweit die betrachteten Kältemittel diese Kriterien erfüllen. Dabei zählen beispielhaft R407A und R134a zu den HFKW's, R290 zu Kohlenwasserstoffen und R449A sowie R450A zu den HFO-A1- Gemischen. Es ist zu erkennen, dass keines der Kältemittel die dargestellten Kriterien gleichermaßen erfüllen kann, sodass es bei jedem der betrachteten Kältemittel zu Zielkonflikten zwischen den Kriterien kommt. Diese Betrachtungsweise kann sehr subjektiv sein, sodass eine Bewertung mittels dynamischer Simulationen erfolgen muss.

Durch die systematische Anwendung der Kriterien auf den von McLinden vorgestellten Kältemittelsatz wird die Anzahl günstiger Kältemittel von über 1000 auf 33 reduziert. Diese werden in einem nächsten Schritt anhand dynamischer Simulationen bewertet.

ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Für die dynamischen Simulationen sind im vorherigen Kapitel generische Kennfelder auf Basis von Literaturdaten für den Kompressor vorgestellt worden. Diese liefern explizit formuliert schnelle und genaue Ergebnisse für die Bestimmung erforderlicher Wirkungsgrade.

In Abbildung 5 ist das generische Kennfeld für den isentropen Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Drehzahl und des Druckverhältnisses der Kompression dargestellt. Auf Basis der Messdaten wird das generische Kennfeld mittels Regressionsanalyse gewonnen und explizit formuliert in das Modell implementiert.

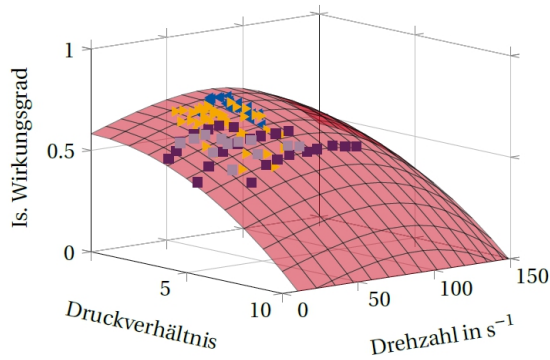


Abbildung 5: Darstellung des isentropen Wirkungsgrad für die Familie der Drehkolbenverdichter basierend auf experimentellen Literaturdaten.

Es handelt sich um 129 verwendete Datenpunkte. Als statistische Bewertungsmaße können der $R - \text{Square} = 0.93$ und der $\text{RMSE} = 0.03$ angegeben werden. Es ist zu erkennen, dass der isentrope Wirkungsgrad nicht konstant angenommen werden kann, wie es in statischen Berechnungen oft der Fall ist. Daher sieht der verwendete Ansatz unter dynamischen Randbedingungen eine bessere Abbildung des Prozesses vor. Die Kenngrößen zeigen aber auch, dass die generischen Wirkungsgrade einen nicht vernachlässigbaren Fehler in die Simulation eintragen, der die Aussagekraft absoluter Werte mindert. Für relative Vergleiche und Untersuchungen unter dynamischen Randbedingungen ist dieser Ansatz jedoch geeignet. Sobald fundierte Messdaten vorhanden sind, sollte auf diese in der Modellierung zurückgegriffen werden.

Unter dynamischen Randbedingungen sind nun erste Untersuchungen durchgeführt worden. Anwendungsfälle sind Niedertemperatur- und Hochtemperaturheizsysteme bei bis zu $35\text{ }^\circ\text{C}$ in Fußbodenheizungssystemen und bis zu $65\text{ }^\circ\text{C}$ für die Bereitstellung von Trinkwarmwasser und Raumwärme für Radiatorheizungen. Für diese Anwendungsfälle wird der über das Jahr integrierte Saisonale-COP (SCOP) bestimmt. Das GWP und die Sicherheitsklasse lassen Rückschlüsse auf Umweltaspekte und Sicherheit zu. Die Ergebnisse der Simulationen sind zusammengefasst in Tabelle 2 dargestellt.

In Bezug auf die Sicherheitsklasse werden A1-Kältemittel wie R32 und R1234yf den übrigen Kältemitteln bevorzugt, da sie keine Brennbarkeit und Giftigkeit aufweisen. Das GWP von Dimethylether (RE170) weist wie CO_2 einen Wert von 1 auf und wird daher empfohlen. R32 hat mit einem Wert von 675 das höchste GWP.

Tabelle 2: Ergebnisse der dynamischen Simulationen in Bezug auf eingeführte Anwendungskriterien.

Anwendung	Empfehlung
Sicherheitsklasse	R32/R1234yf
GWP	RE170
Heizwärme (NT)	R32
Heizwärme (HT)	R290
SCOP	R152a

Für den Anwendungsfall Heizwärme zeigt auf dem Niedertemperaturbereich R32 das energetisch günstigste Verhalten auf und die geringste elektrische Leistung wird mit diesem Kältemittel aufgebracht. Bei sehr geringen Außentemperaturen und um Anwendungsfall HT können Zieltemperaturen mit diesem Kältemittel jedoch im Modell nicht mehr sichergestellt werden, sodass die HT-Empfehlung aus energetischer Sicht R290 ist.

Der höchste SCOP wird mit R152a erzielt. Der SCOP ist in der Jahresenergiebilanz aber kein eindeutiges Bewertungskriterium. Aufgrund einer wenig steilen Dampfdruckkurve arbeitet die Wärmepumpe mit R152a über einen deutlich längeren Zeitraum, um den Gesamtenergiebedarf zu decken. Der SCOP ist damit höher, weil die Wärmepumpe bei günstigeren Temperaturen länger betrieben wird. Insgesamt muss aber auch mehr elektrische Leistung aufgenommen werden, was durch den SCOP nicht ausgedrückt werden kann. Neben der energetischen Bewertung müssen eine ökonomische oder ökologische Bewertung hinzugefügt werden, um ganzheitlichere Aussagen hinsichtlich des Kältemittelinflusses treffen zu können.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dieser Arbeit ist ein Architekturkonzept zur Modellierung von Wärmepumpen entwickelt worden, das die Modularität und Skalierbarkeit fokussiert. Das entwickelte Architekturkonzept ermöglicht den flexiblen Aufbau von unterschiedlichen Systemen und erlaubt die einfache Anpassung des Wärmepumpenmodells an die zu untersuchende Fragestellung.

Zur Umsetzung des Konzepts werden geeignete Komponentenmodelle des Verdichters, des Expansionsventils und der Wärmeübertrager entwickelt. Zudem wird Rerop 9.1 vom NIST zur

Abbildung des Kältemittelverhaltens verwendet. Die Entwicklung eines Ähnlichkeitsansatzes zur Abschätzung der Potentiale unterschiedlicher Kältemittel konnte erfolgreich in das Modell integriert werden.

Das Verdichtermmodell basiert literaturgestützt auf einem Effizienzmodell für die Familie der Drehkolbenverdichter. Das Expansionsventil wird auf der Bernoulli'schen Energiegleichung abgebildet. Beide Modelle werden über das Buckingham-Theorem der Ähnlichkeitstheorie implementiert, sodass diese Modelle erste Potentiale neuer Kältemittel abschätzen können. Die Wärmeübertrager basieren auf dem Moving-Boundary-Ansatz, der den Kompromiss aus Geschwindigkeit und Genauigkeit erfüllt. Zur Verwendung in geschlossenen Kreisprozessen sind erforderliche Übergangsmechanismen zwischen den einzelnen Konfigurationen vorbereitet.

In den dynamischen Simulationen konnte gezeigt werden, dass neben den Kohlenwasserstoffen wie Propan (R290) weitere Kältemittel ein günstiges Verhalten aufzeigen. Insbesondere energetisch zeigt R32 eine hohe Leistungsfähigkeit für geringe Temperaturniveaus, wie sie beispielsweise in der Anwendung der Fußbodenheizung zum Tragen kommen. Auf höheren Temperaturniveaus zeigen R152a und RE170 ebenfalls ein günstiges transientes Verhalten. Es ist allerdings zu beachten, dass diese Kältemittel bei niedrigen Außentemperaturen einen Dampfdruck unter Atmosphärendruck aufweisen und dadurch im Verdampfer ein Unterdruck vorliegen kann.

Im Hinblick auf den Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechengeschwindigkeit konnte gezeigt werden, dass eine explizite Formulierung des Stoffmodells notwendig ist, um Jahressimulationen performant durchführen zu können. Hier scheint ein Ansatz von Sangi (Sangi, 2015) äußerst vielversprechend.

LITERATUR

European Environment Agency. Trends and projections in Europe 2016, 2016.

J. A. Kelly, M. Fu und J. P. Clinch. Residential home heating: The potential for air source heat pump technologies as an alternative to solid and liquid fuels. *Energy Policy*, 98:431–442, 2016.

P. A. Domanski et al. Low-GWP refrigerants for medium and high-pressure applications. *International Journal of Refrigeration*, 84: 198-209, 2017.

B. Dai et al. Thermodynamic performance assessment of carbon dioxide blends with low-global warming potential (GWP) working fluids for heat pump water heaters. *International Journal of Refrigeration*, 56: 1-14, 2015.

K. Huchtemann und D. Müller. Evaluation of a field test with retrofit heat pumps. *Building and Environment*, 53: 100-106, 2012.

D. Müller, et al. AixLib – An open-source Modelica library within the IEA-EBC Annex 60. In *BauSIM 2016*: 3-9, 2016.

M. Cimmino und M. Wetter. Modelling of heat pumps with calibrated parameters based on manufacturer data. In *Proceedings of the 12th International Modelica Conference*: 219-226, 2017.

S. Quoilin et al. Thermocycle: A library for the simulation of thermodynamic systems. In *Proceedings of the 10th International Modelica Conference*: 683-692, 2014.

M. Gräber et al. Modelling of heat pumps with an object-oriented model library for thermodynamic systems. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 16(3): 195-209, 2010.

H. Tummescheit. Design and Implementation of object-oriented model libraries using Modelica. Dissertation, Lund, Schweden, 2002.

M. Tiller. Modelica by Example: A free interactive HTML book for learning Modelica, 2017.

C. Cuevas und J. Lebrun. Testing and modelling of a variable speed rotary compressor. *Applied Thermal Engineering*, 29(2): 469-478, 2009.

L. Mardorf und P. Menger. PKW-Klimaanlage mit Wärmepumpenmodus für Elektrofahrzeuge, 2011.

E. Winandy et al. Experimental analysis and simplified modelling of a hermetic scroll refrigeration compressor. *Applied Thermal Engineering*, 22(2):107-120, 2002.

T. Storek et al. A modular modelling approach for thermodynamic systems applied to heat pumps. In *31st ECOS Conference*, 2018.

J. M. Mendoza-Miranda et al. Comparative evaluation of R1234yf, R1234ze(E) and R450A as alternatives to R134a in a variable speed reciprocating compressor. *Energy*, 114:753-766, 2016.

J. Bonilla et al. Switching moving boundary models for two-phase flow evaporators and condensers. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 20(3): 743-768, 2015.

- M. O. McLinden et al. Limited options for low-global-warming-potential refrigerants. *Nature Communications*, 8: 1-9, 2017.
- Emersion Climate Technologies. Wechsel des Kältemittels im Zuge der F-Gas-Verordnung 517/2014: Praktische Optionen für zukunftssichere HLKK-Systeme, 2016.
- R. Sangi et al. Dynamic modeling and simulation of geothermal heat pump systems based on a combined moving boundary and discretized approach. In *14th International Conference of IBPSA*, 2015

IX. PRODUKTDATEN, DATENBANKEN

PRÜFUNG VON OPENBIM GEBÄUDEMODELLEN FÜR DIE THERMISCHE GEBÄUDESIMULATION

A. Geiger¹ und V. Hagenmeyer¹

¹ Institut für Automatisierungstechnik und Angewandte Informatik, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Deutschland

KURZFASSUNG

Der Einsatz von Softwarewerkzeugen für die thermische Simulation von Gebäuden spielt eine wesentliche Rolle bei der Einhaltung gesetzlicher Vorgaben für deren Energieeffizienz. Mit dem Datenmodell Industry Foundation Classes (IFC) stellt buildingSMART ein allgemeines Building Information Model (BIM) bereit, das alle Voraussetzungen zur Unterstützung von thermischen Gebäudesimulationen erfüllt. Um in der Praxis einen verlässlichen Austausch zu gewährleisten, müssen bestimmte Anforderungen - sogenannte Model View Definitions (MVD) - definiert und eingehalten werden. Die Formalisierung dieser Anforderungen erfolgt mit dem von buildingSMART entwickelten Format mvdXML. Der vorliegende Beitrag beschreibt die prototypische Entwicklung spezifischer MVD Regeln, die technische Umsetzung dieser Regeln in der Anwendung IFCExplorer und zeigt deren Einsatz an einem realen Gebäudemodell.

ABSTRACT

The use of software tools for thermal simulation of buildings is an essential part of compliance with legal requirements for their energy efficiency. With the Industry Foundation Classes (IFC), buildingSMART provides a general Building Information Model (BIM) that satisfies all requirements for supporting thermal building simulations. In order to ensure a reliable exchange of information in practice, specific requirements - so-called Model View Definitions (MVD) - must be defined and observed. These requirements are formalized in the mvdXML format also developed by buildingSMART. The

present paper describes the prototypical development of MVD rule sets, their implementation in the application IFCExplorer and demonstrates their usage by a real building model.

EINLEITUNG

Die gesetzlichen Anforderungen zur Energieeffizienz von Gebäuden, sowohl beim Neubau wie auch bei umfangreichen Sanierungsmaßnahmen, sind in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Daher spielt der Einsatz von Softwarewerkzeugen zur thermischen Simulation von Gebäuden eine wichtige Rolle bei der Einhaltung dieser Vorgaben. In der Baupraxis setzt sich zunehmend die BIM-Methode (Building Information Modelling) für einen digitalisierten Bauprozess durch (Borrmann et al., 2015). Die internationale Organisation buildingSMART entwickelt unter dem Leitwort openBIM dafür offene Standards und Spezifikationen. Die zentrale Rolle spielt dabei das Datenmodell IFC (Industry Foundation Classes) für Bauwerke, das seit der Version IFC4 ein offizieller ISO Standard (ISO 16739:2013) ist. Um spezielle Anforderungen eines Datenaustauschprozesses zu spezifizieren wurde darüber hinaus das Information Delivery Manual (IDM) entwickelt, das ebenfalls als ISO Norm (ISO 29481-1:2010) verfügbar ist. Das IDM beschreibt grundlegend den Umfang und die Detailtiefe der Informationen. Hiermit lassen sich die Prozessverantwortung, die Rollen der Beteiligten und die technischen Bedingungen im Rahmen der Prozessplanung definieren. Es handelt sich um standardisierte Template Dokumente, die in

einem weiteren Schritt mit konkreten Klassen, Attributen und Eigenschaften aus dem IFC Datenmodell ergänzt werden. Diese konkreten Formulierungen werden als Modellansichten oder Model View Definitions (MVD) bezeichnet (Hietanen, 2006). Sie stellen eine Teilmenge des IFC Datenmodells dar, das für einen bestimmten Anwendungsbereich - wie beispielsweise die thermische Gebäudesimulation - notwendig ist und von Softwareprodukten unterstützt werden muss.

Seit der Version IFC4 entwickelt die buildingSMART darüber hinaus das Datenformat mvdXML (Liebich et al., 2011). Es wurde als neutrales Format zur vollständigen formalen Beschreibung von MVDs entwickelt, und unterstützt seit der Version mvdXML 1.1 (Liebich et al., 2014, Chipman et al., 2016) auch eine Regelsyntax. Damit erlaubt das Format mvdXML die Definition und Beschreibung von Regeln, um die Datenqualität im Austauschprozess zu gewährleisten. Ausgehend von der Teilmenge des IFC Datenmodells, das durch eine MVD beschrieben wird, lassen sich die verwendeten Klassen und Attribute festlegen oder einschränken, Eigenschaftssets definieren, und Gültigkeitsbereiche von Attributen festlegen. Es existieren bereits einige Softwarewerkzeuge mit Unterstützung des mvdXML Datenformates. In diesem Zusammenhang ist insbesondere das von der buildingSMART bereitgestellte Werkzeug ifcDoc (buildingSMART, 2012) zu erwähnen. Es ist das zentrale Werkzeug zur Entwicklung von MVDs, der Definition von Prüfregele, sowie zur Prüfung der Regeln gegen IFC Instanz Dokumente. Zusätzlich wird mvdXML im Rahmen der IFC4 Zertifizierung von buildingSMART eingesetzt. Dabei werden die Anforderungen der einzelnen Test Cases auf Basis von mvdXML definiert und mit Hilfe des IFC Framework der Firma apstex validiert (buildingSMART, 2018). Weiterhin existieren aktuell zwei IFC Analysewerkzeuge mit mvdXML Unterstützung. Dies ist zum einen das von der Northumbria Universität, Newcastle als Open-Source bereitgestellte Werkzeug Xbim Xplorer (Lockley et al., 2017, Weise et al., 2016), sowie Simplebim (Hietanen, 2014). Beide Werkzeuge stellen ein Plug-In für die mvdXML basierte Regelprüfung bereit. Im akademischen Umfeld entstand zudem im Rahmen der Open BIM Plattform Services, der TU-Dresden ein Modul zur Konvertierung von mvdXML Dateien in die

selbst entwickelte Abfragesprache ifcQL (Baumgärtel, 2016) und für das Open BIMserver Projekt wurde die prototypische Implementierung eines Regelprüfungsmoduls realisiert (Zhang, 2014).

Im Rahmen des vorliegenden Beitrags werden die Möglichkeiten und der Umfang der von mvdXML bereitgestellten Regelsyntax für den Anwendungsfall der thermischen Gebäudesimulation analysiert. Dazu werden geeignete Prüfregele definiert, um zu gewährleisten, dass der Informationsgehalt eines IFC Datensatzes die minimalen Anforderungen an eine Gebäudesimulation erfüllt.

MVDXML METHODIK UND GRUNDLAGEN

Das Datenformat mvdXML bildet die Anforderungen und Definitionen einer MVD ab. Abbildung 1 stellt stark vereinfacht die Struktur und die Beziehungen der zentralen Elemente von mvdXML dar, die im weiteren näher erläutert werden.

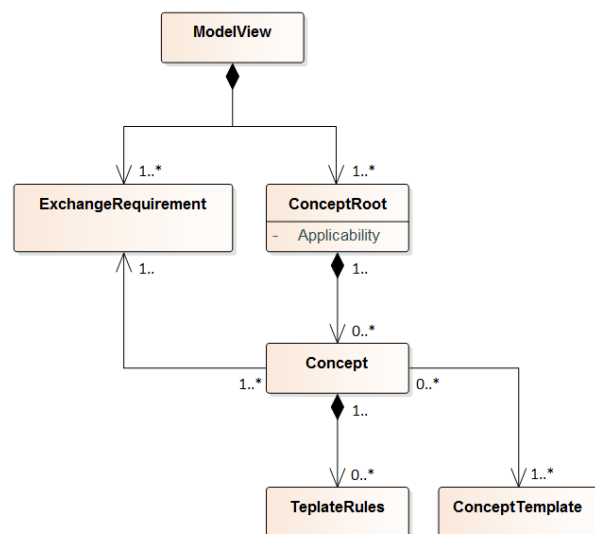


Abbildung 1: Vereinfachte schematische Darstellung des mvdXML Datenformates

Das Element *ModelView* beschreibt eine MVD. Es enthält alle Definitionen und bezieht sich auf eine spezifische Version des IFC Datenmodells. Zusätzlich enthält es Elemente vom Typ *ExchangeRequirement* und *ConceptRoot*. Bei der Abbildung einer MVD ist zu beachten, dass die enthaltenen Klassen und Typen einer MVD nicht explizit abgebildet werden. Vielmehr werden diese indirekt über die *TemplateRules* des jeweiligen *Concept* in *ConceptRoot* abgebildet und beschreiben dadurch alle Elemente im Kontext einer MVD.

Ein *ExchangeRequirement* beschreibt die für ein konkretes Austauschscenario notwendigen Daten. Dies bezieht sich entweder auf den Import oder den Export. Zusätzlich lassen sich weitere Bedingungen für die verwendeten *Concepts* angeben.

Ein *ConceptRoot* fasst verschiedene *Concepts* einer spezifische IFC Klasse, die dieselben Bedingungen erfüllen sollen, zusammen. In den meisten Fällen bezieht sich ein *ConceptRoot* auf IFC Klassen, die von der Basisklasse *IfcRoot* abgeleitet sind (z. B. Projektstruktur, Bauteile, Relationen, ...). Darüber hinaus lassen sich mit Hilfe des Elements *Applicability* zusätzliche Bedingungen definieren, die von einer solchen Klasse erfüllt werden müssen. Erst wenn eine Instanz diese Bedingungen erfüllt, müssen die zugeordneten *Concepts* und *TemplateRules* eingehalten werden.

Ein *Concept* beschreibt die Verwendung von Attributen und Beziehungen einzelner Klassen und wird in der Regel so definiert, dass es wiederverwendbar und auf möglichst viele MVDs anwendbar ist. Sind für ein *Concept* Regeln - sogenannte *TemplateRules* - definiert, so enthält es zusätzlich eine Referenz auf das entsprechende *ConceptTemplate*. Die Beziehung zwischen einer *TemplateRule* und den in den *ConceptTemplates* definierten Attributen und Klassen erfolgt über eine sogenannte *RuleID*. Zusätzlich stehen Schlüsselwörter zur Verfügung, die den Typ einer Bedingung festlegen:

- *Value*: Prüft den Wert eines Attributes
- *Size*: Prüft die Anzahl der Elemente einer Aggregation
- *Type*: Prüft den Typ eines Attributes
- *Unique*: Prüft, ob ein Wert innerhalb eines Dokumentes eindeutig ist
- *Exists*: Prüft ob ein Attribut oder eine Klasse vorhanden ist

Die einzelnen Bedingungen der *TemplateRules* benutzen die Konzepte der Aussagenlogik, wobei jede Bedingung (*TemplateRule*) immer einen Wahrheitswert – richtig oder falsch – repräsentiert. Die *TemplateRules* sind zusätzlich durch logische Operatoren (and, or, not, nand, nor, xor und nxor) miteinander verknüpft und bilden einen Regelbaum.

Ein *ConceptTemplate* bildet die Attribute und Beziehungen entsprechend des verwendeten Datenschemas für eine spezifische Klasse ab.

Dabei ist es nicht zwingend erforderlich, die vollständige Definition des Datenschemas anzugeben. Es werden nur die Attribute und Relationen angegeben, die innerhalb eines *Concepts* erforderlich sind. Im Unterschied zu den Definitionen ist es hier auch möglich, Attribute und Relationen in der Definition einer Basisklasse anzugeben, die erst in abgeleiteten Klassen zu Verfügung stehen. Beispielsweise ist dies ein *ConceptTemplate* zur Prüfung aller Bauteile (*IfcBuildingElement*), mit dem ein spezifisches Attribut der Klasse Wand (z. B. *PredefinedType*) überprüft wird. Damit ist die korrekte Interpretation der Prüfregeln in den *TemplateRules* nur in Verbindung mit dem entsprechenden IFC Schema möglich.

MVD PRÜFREGELN FÜR DIE THERMISCHE GEBÄUDESIMULATION

Das vorrangige Ziel des vorliegenden Beitrags ist nicht die Entwicklung einer neuen MVD. Dazu existieren im BLIS MVD Katalog bereits eine Reihe von informellen Definitionen von Projektgruppen, die sich ausführlich mit den unterschiedlichen Aspekten der thermischen Gebäudesimulation befassen (BLIS, 2018). Diese Definitionen liegen in Form von formalisierten Dokumenten vor und sind somit nur bedingt für eine automatisierte Datenverarbeitung verwendbar. Für keine dieser MVDs existiert aktuell eine mvdXML. Der Ansatz des vorliegenden Beitrags besteht deshalb darin zu analysieren, inwieweit es möglich ist, auf Basis von mvdXML sinnvolle Regeln zu definieren, um IFC Daten als Eingabedatum für die thermische Gebäudesimulation zu nutzen. Diese Regeln werden primär auf Grundlage der offiziellen MVDs für IFC2x3 (*CoordinationView* 2.0) und IFC4 (*ReferenceView*, *DesignTransferView*) entwickelt. In einem zweiten Schritt ist geplant, im Rahmen der Arbeit innerhalb eines sogenannten „buildingSMART BuildingRooms“, diese Erkenntnisse und Erfahrungen in die Definitionen einer offiziellen Model View einzubringen.

Definition von Prüfregel

Das IFC Datenmodell ist prinzipiell in der Lage, Eingabedaten für eine thermische Gebäudesimulation zu repräsentieren. Gerade mit der Version IFC4 sind eine Reihe von Überarbeitungen und Erweiterungen eingeflossen, die speziell für die energetische

Betrachtung von Gebäuden relevant sind. Dazu gehören die Erweiterungen zur Unterstützung beliebiger geographischer Bezugssysteme, um die genaue Lage eines Gebäudemodells zu beschreiben, die Überarbeitung der Materialeigenschaften, sowie Erweiterungen bei der Verwendung von Raumbegrenzungselementen (Geiger et al., 2016).

Abbildung 2 stellt den Umfang der für eine thermische Gebäudesimulation notwendigen Informationen dar. Dieser Umfang lässt sich prinzipiell auch im IFC Datenmodell bilden. Die offiziellen buildingSMART MVDs für die Versionen IFC2x3 (CoordinationView 2.0) und IFC4 (ReferenceView bzw. DesignTransferView) decken dabei primär den linken Teil ab, der sich auf die Abbildung der Gebäudestruktur, der Bauteilgeometrien und der Definition von Räumen konzentriert.

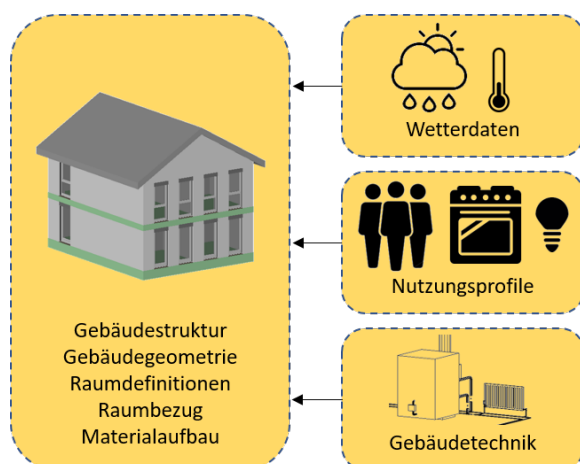


Abbildung 2: Informationsumfang für eine thermische Gebäudesimulation

Zu den Bauteilen kommen zusätzlich noch Angaben über die zugeordneten Material- und Schichtinformationen. Darüber hinaus kann ein Gebäudemodell noch über eine geographische Lage und eine Ausrichtung verfügen. Im Gegensatz dazu werden die ebenfalls für die thermische Gebäudesimulation notwendigen Informationen zu den klimatischen Bedingungen, den Nutzungsbedingungen der Räume bzw. thermischen Zonen und der umfassenden Beschreibung der Gebäudetechnik nicht im erforderlichen Umfang von den bestehenden Implementierungen unterstützt. Der vorliegende Beitrag konzentriert sich deshalb auf den linken Teil, der gegenwärtig von den gängigen Werkzeugen unterstützt wird. Der Umfang an Regeln soll sicherstellen, dass die minimalen Anforderungen für die Datenübergabe von der

Architektur zu einem Simulationswerkzeug erfüllt werden, und prüft hierzu die Existenz von Attributen und Werten, sowie teilweise deren Wertebereich.

Tabelle 1: Formale Definition von Prüfregelein

Mindestens ein Gebäude muss vorhanden sein
Mindestens ein Raum muss vorhanden sein und der Raum muss einem Gebäude zugeordnet sein
Jeder Raum muss eine Raumgeometrie enthalten
Die räumliche Lage und Ausrichtung muss definiert sein
Raumbegrenzungselemente müssen vorhanden sein
Mindestens ein Bauteil muss vorhanden sein
Alle Bauteile müssen eine Volumengeometrie besitzen
Bauteile müssen Materialinformationen enthalten
Materialien müssen physikalische Parameter enthalten: - Wärmeleitfähigkeit (ThermalConductivity) - Dichte (Density) - Wärmekapazität (SpecificHeatCapacity)

Ausgehend von diesen Randbedingungen lassen sich die in Tabelle 1 aufgelisteten minimalen Anforderungen an den Informationsgehalt des IFC Modells formulieren. Im Rahmen des vorliegenden Beitrags wird beispielhaft eine Regel zur Überprüfung der physikalischen Parameter eines Materials näher betrachtet.

Tabelle 2: Auszug einer mvdXML Regel zum Prüfen der physikalischen Parameter eines Materials

```
<TemplateRules operator="and">
  <TemplateRule Parameters="Material[Exists]=TRUE"/>
  <TemplateRules operator="and">
    <TemplateRule Parameters="MaterialProperties[Size]>=3"/>
    <TemplateRule Parameters="MaterialName[Exists]=TRUE"/>
  </TemplateRules operator="and">
  <TemplateRule Parameters="PropertySetName[Value]=
'Pset_MaterialThermal' and SimplePropertyName[Value]=
'ThermalConductivity' and NominalValue[Value] > 0.0"/>
  <TemplateRule Parameters="PropertySetName[Value]=
'Pset_MaterialThermal' and SimplePropertyName[Value]=
'SpecificHeatCapacity' and NominalValue[Value] > 0.0"/>
  <TemplateRule Parameters="PropertySetName[Value]=
'Pset_MaterialCommon' and SimplePropertyName[Value]=
'MassDensity' and NominalValue[Value] > 0.0"/>
</TemplateRule>
</TemplateRules>
</TemplateRules>
```

Der in Tabelle 2 dargestellte Auszug einer Prüfregelein soll sicherstellen, dass an jedem Material die physikalischen Parameter gesetzt und ihre Werte größer 0.0 sind. Dabei wird zunächst mit „Material[Exists]=TRUE“ geprüft, ob ein Material vorhanden ist. Anschließend wird mit „MaterialProperties[Size]>=3“ sichergestellt, dass mindestens drei Eigenschaftssätze einem

Material zugeordnet sind. Die nachfolgende Regel „MaterialName[Exists]=TRUE“ kontrolliert, dass für jedes Material ein Name vergeben wurde. Die eigentliche Prüfung der physikalischen Parameter erfolgt mit den darauffolgenden drei Regeln. Dabei wird jeweils der Name des Eigenschaftssets z.B. „Pset_MaterialThermal“, der Name der Eigenschaft z.B. „ThermalConductivity“ und der geforderte Wert, in diesem Fall „> 0.0“ überprüft.

Technische Umsetzung der mvdXML Regeln

Die Anwendung IFCEXplorer ist ein allgemeines Werkzeug zur Analyse, Visualisierung, Prüfung und Integration semantischer Datenmodelle aus den Bereichen BIM und GIS (Benner et al., 2013). Für das Datenmodell IFC stehen neben einer Schemaprüfung eine Reihe weiterer Modellprüfungen zur Verfügung. Diese Prüfmechanismen sind bislang fest implementiert. Mit der Regelsyntax von mvdXML steht nun ein standardisiertes Format zur flexiblen Spezifikation solcher Prüfungen zur Verfügung. Daher und auch um die zuvor definierten mvdXML-Regeln für die thermische Gebäudesimulation anzuwenden zu können, wird ein entsprechendes Modul zur Regelprüfung implementiert (siehe Abbildung 3).

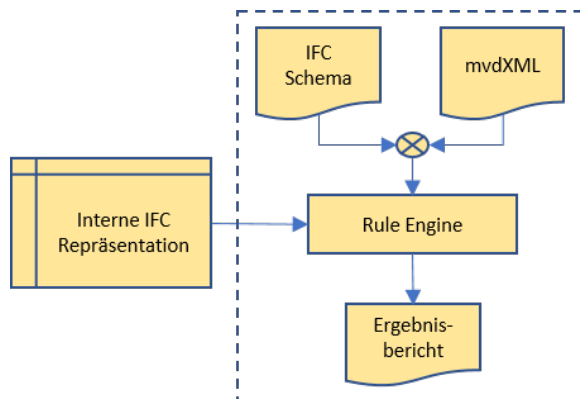


Abbildung 3: Schematische Darstellung des entwickelten Moduls zur Regelprüfung

Dieses Modul beinhaltet neben einer Reihe von Dialogen zur Steuerung des Prüfvorgangs, der Analyse von mvdXML Dokumenten und zur Präsentation der Prüfergebnisse, insbesondere eine Komponente für die Regelprüfung. Diese Komponente erlaubt sowohl eine Konsistenzprüfung der mvdXML Regeln, als auch die Prüfung eines IFC Instanz Dokumentes gegen diese Regeln. In einem separat steuerbaren Validierungsprozess wird die Konsistenz der Regeln in den *ConceptTemplates* gegen das

entsprechende IFC Schema sichergestellt. Dabei müssen die in den *ConceptTemplates* verwendeten Klassen und Attribute dem verwendeten Datenschema entsprechen, sowie die im Datenschema vorgegebene Reihenfolge einhalten. Zusätzlich werden die in den *ConceptTemplates* verwendeten Bezeichner (*RuleID*) auf ihre Eindeutigkeit überprüft. Dies ist notwendig, da über eine *RuleID* die Zuordnung zwischen einer Regel aus einem *Concept* mit einem Attribut oder einer Klasse in einem *ConceptTemplate* erfolgt. Nur so kann sichergestellt werden, dass während des eigentlichen Prüfvorganges die Bedingungen pro *Concept* korrekt interpretiert und verarbeitet werden können.

Ein zentraler Dialog steuert sowohl die Analyse wie auch die Prüffunktionalitäten (siehe Abbildung 4).

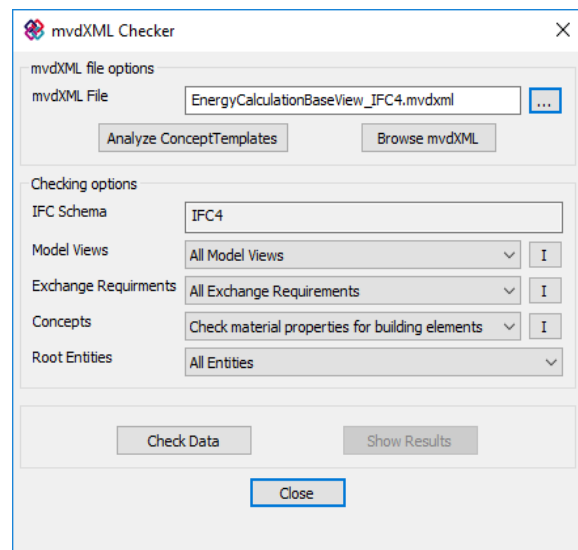


Abbildung 4: Benutzerdialog zur Steuerung der Regelprüfung

Dazu zählt insbesondere der zu wählende Kontext einer Prüfung. Wahlweise lassen sich die in einer mvdXML Datei enthaltenen *ModelViews*, *ExchangeRequirements* und *Concepts* nach Bedarf auswählen. Ein weiteres Dialogfenster präsentiert - entsprechend der für den Prüfkontext ausgewählten Konzepte - das Ergebnisprotokoll eines Prüflaufes (siehe Abbildung 6).

Prüfergebnisse

Als Praxisbeispiel dient ein in dem Architektur CAD System ArchiCAD modelliertes Gebäude. Dabei handelt es sich um ein konkretes Gebäude, das im Rahmen eines

Forschungsprojektes auf dem KIT Campus Nord errichtet wird (siehe Abbildung 5).

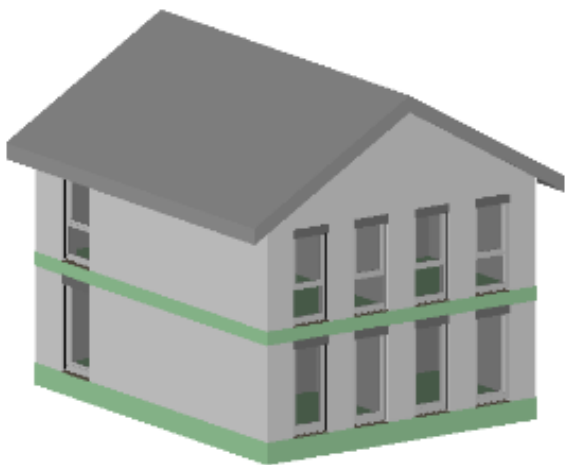


Abbildung 5: Praxisbeispiel KIT Musterhaus

Bei der Erstellung dieses Gebäudemodells wurde besonders Wert auf die korrekte Modellierung und die vollständige Definition der

bauteilspezifischen Parameter in ArchiCAD gelegt. Den Bauteilen wurden entsprechende Schichtaufbauten zugewiesen, und pro Schicht die physikalischen Parameter für Wärmeleitfähigkeit λ , Dichte ρ und die Wärmekapazität C angegeben. Weiterhin wurde Wert auf den korrekten Raumbezug, wie die Lage und die Ausrichtung des Gebäudes, gelegt.

Um die Vollständigkeit der erforderlichen Parameter zu kontrollieren, wird das Gebäude aus ArchiCAD im Format IFC4 (DesignTransferView) exportiert und gegen die definierten Regeln geprüft. In Abbildung 6 ist das detaillierte Prüfprotokoll der Bodenplatte zur Überprüfung der physikalischen Parameter dargestellt. Dieses Beispiel zeigt, dass bei der Eingabe der Materialparameter in ArchiCAD vergessen wurde, für die Bodenplatte dem Parameter „SpecificHeatCapacity“ einen Wert zuzuweisen.

Message Type	Message Description
MvdXML	Checking concept: Check material properties for building elements Applicable for: IfcBuildingElement Checked entities total: 40 Successful checked entities: 2 Failed entities: 38
Failed	Result concept: "Check material properties for building elements" for IfcSlab[Floor] Type: IfcSlab[Floor] Name: Decke-001 OID: #217
MvdXML Conditions	
Successful	Check condition: MaterialRelation [Size] == 1 (IfcRelAssociatesMaterial)
Successful	Check condition: RelatingMaterialLayerSetUsage [Type] == IfcMaterialLayerSetUsage (IfcMaterialLayerSetUsage)
Successful	Check condition: LayerSetName [Exists] == TRUE (IfcMaterialLayerSet.LayerSetName)
Successful	Check condition: MaterialLayers [Size] >= 1 (IfcMaterialLayerSet.MaterialLayers)
Successful	Check condition: Material [Exists] == TRUE (IfcMaterialLayer.Material)
Successful	Check condition: MaterialProperties [Size] >= 3 (IfcMaterial.HasProperties)
Successful	Check condition: MaterialName [Exists] == TRUE (IfcMaterial.Name)
Successful	Check condition: PropertySetName [Value] == Pset_MaterialThermal (IfcMaterialProperties.Name)
Successful	Check condition: SimplePropertyName [Value] == ThermalConductivity (IfcSimpleProperty.Name)
Successful	Check condition: NominalValue [Value] > 0.0 (IfcSimpleProperty.NominalValue)
Successful	Check condition: PropertySetName [Value] == Pset_MaterialThermal (IfcMaterialProperties.Name)
Failed	Check condition: SimplePropertyName [Value] == SpecificHeatCapacity (IfcSimpleProperty.Name)
Successful	Check condition: NominalValue [Value] > 0.0 (IfcSimpleProperty.NominalValue)
Successful	Check condition: PropertySetName [Value] == Pset_MaterialCommon (IfcMaterialProperties.Name)
Successful	Check condition: SimplePropertyName [Value] == MassDensity (IfcSimpleProperty.Name)
Successful	Check condition: NominalValue [Value] > 0.0 (IfcSimpleProperty.NominalValue)

Abbildung 6: Ergebnisprotokoll der Regelprüfung eines Bauteils

Dabei handelt es sich um einen typischen Fehler, wie er im Projektalltag auftritt. Mit Hilfe entsprechend definierter Regeln in mvdXML und einem entsprechenden Prüfwerkzeug lassen sich solche Fehler sehr einfach identifizieren und sicherstellen, dass IFC Gebäudemodelle im Datenaustausch die Anforderungen an vordefinierte Prozesse erfüllen.

Erfahrungen

Die Testergebnisse zeigen, dass mit den Regeldefinitionen der Version mvdXML 1.1 die Qualität des Datenaustausches deutlich verbessert werden kann. In dem beschriebenen Gebäudemodell konnten sehr schnell vergessene Parameter identifiziert und ein IFC

Gebäudemodell mit den für eine thermische Gebäudesimulation erforderlichen Eingabedaten erstellt werden. Es hat sich aber auch gezeigt, dass es eine Reihe von Prüfaufgaben gibt, die mit dieser Version mvdXML 1.1 nicht oder nur über Umwege realisiert werden können.

So ist es aktuell nicht möglich, mit einer einfachen Regel zu prüfen, ob eine Instanz eines spezifischen Typs in einem IFC Instanz Dokument enthalten ist. Ein Beispiel ist die Prüfung, ob der zu prüfende IFC Datensatz über Gebäude (*IfcBuilding*) verfügt. Dies lässt sich mit der aktuellen Version von mvdXML nur über Umwege prüfen, zum Beispiel mit Hilfe eines *ConceptRoot* für *IfcProject*, in dem die entsprechenden Relationen der Projektstruktur analysiert werden und geprüft wird, ob innerhalb dieser Projektstruktur Gebäude enthalten sind.

Ein weiter Schwachpunkt der aktuellen Version ist die Unterscheidung der Prüftiefe innerhalb einer Liste von Elementen. Es gibt Prüfaufgaben, in denen alle Elemente einer Liste eine Bedingung erfüllen müssen, und es gibt den Fall, dass nur eine Teilmenge der Elemente diese Bedingung erfüllen muss. Dies lässt sich mit der aktuellen Definition von mvdXML nicht unterscheiden. Um das in einem Beispiel zu veranschaulichen, wird erneut ein Schichtaufbau betrachtet. Im ersten Fall müssen alle Materialien des Schichtaufbaus die physikalische Parameter enthalten (siehe Tabelle 3, oben). Im zweiten Fall soll im selben Schichtaufbau mindestens ein Material mit dem Namen „Beton enthalten“ (siehe Tabelle 3, unten).

Tabelle 3: Beispiel für den unterschiedlichen Prüfkontext von Regeln

<pre><TemplateRule Parameters="PropertySetName[Value]= 'Pset_MaterialThermal' and SimplePropertyName[Value]= 'ThermalConductivity' and NominalValue[Value] > 0.0"/></pre>
<pre><TemplateRule Parameters="MaterialName[Value]= 'Beton'"/></pre>

ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden Beitrag wird gezeigt, wie sich auf Basis des buildingSMART Standards mvdXML spezifische Regeln für die thermische Gebäudesimulation definieren lassen. Diese Regeln können verwendet werden um Klassen und Attribute festzulegen oder einzuschränken, Eigenschaftssets zu definieren, und Gültigkeitsbereiche von Attributen festzulegen.

Das Ziel dieser Regeln ist sicherzustellen, dass IFC Instanz Dokumente die für eine thermische Gebäudesimulation erforderlichen Parameter enthalten. An einem konkreten Gebäudemodell, erstellt mit ArchiCAD im Format IFC4 (Design TransferView), wird die Anwendung der Regeln demonstriert. Während des Modellierungsprozesses des Gebäudemodells zeigt sich sehr schnell, dass sich mit Hilfe der ersten definierten Regeln Fehler, insbesondere bei den Attributen und Eigenschaftssätzen, leicht identifizieren lassen.

Mit der Version 1.1 von mvdXML steht ein Format zur Verfügung, das die Qualität des Datenaustausches im Alltag deutlich verbessern könnte. Voraussetzung ist, dass die benötigten Regeln auf Basis einer offiziellen MVD definiert werden. Leider verfügen die gängigen Modellierungswerkzeuge bislang nicht über die entsprechende Unterstützung des mvdXML Formats, und die Anzahl der verfügbaren Werkzeuge mit mvdXML Unterstützung ist noch überschaubar.

Der vorliegende Beitrag zeigt aber auch, dass die Prüfmöglichkeiten von mvdXML noch erweitert werden müssen. Entsprechende Vorschläge werden innerhalb der Arbeitsgruppe MSG (Modelling Support Group) von buildingSMART diskutiert und erarbeitet.

LITERATUR

- Baumgärtel, J., Pirnbaum, S., 2016, „Automatische Prüfung und Filterung in BIM mit Model View Definitions“, 28. Forum Bauinformatik 2016, Hannover, 19. – 21.9.2016
- Benner, J., Geiger, A., Häfele, K.-H., Knüppel, H., 2013, „IFCExplorer – Ein Werkzeug für die Integration unterschiedlicher raumbezogener semantischer Daten“, GEOINFORMATIK, UNIVERSITÄT HEIDELBERG
- BLIS-Project, Website: <http://www.blis-project.org/IAI-MVD/MVDs/>
- Borrmann, A., König, M., Koch, C., Beetz, J., 2015, „Building Information Modeling - Technologische Grundlagen und industrielle Praxis“, Springer Verlag, VDI-Buch, ISBN 978-3-658-05605-6
- buildingSMART, 2018, IFC4 Certification, Website: <http://www.buildingsmart-tech.org/certification>
- buildingSMART IFC Documentation Generator Tool, 2012, OpenSource project buildingSMART, Website: <http://www.buildingsmart-tech.org/downloads/accompanying-tools/ifcdoc/application>
- Chipman, T., Liebich, T., Weise, M., 2016, „Specification of a standardized format to define and exchange“, buildingSMART International Ltd., 15.02.2016
- Geiger, A., Reichenbach, I., Häfele, K.-H., 2016, „IFC-Daten für die thermische Gebäudesimulation“, 28. Forum Bauinformatik 2016, Hannover, 19. – 21.9.2016
- Hausknecht, K., Liebich, T., 2018, „BIM-Kompodium, Building Information Modeling als neue Planungsmethode“, Fraunhofer IRB Verlag, ISBN 978-3-8167-9948-1
- Hietanen, J., 2006, „IFC model view definition format“, buildingSMART International
- Hietanen, J., 2014, „MVD and Simplebim“, Datacubist, Website:
- ISO 16739. 2013. ISO 16739:2013 Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries. 2013
- Liebich, T., Geiger, A., Katranuschkov, P., Linhard, K., Steinmann, R., Weise, M., 2011, „mvdXML specification, mvdXML Schema“, buildingSMART International
- Lockley, S., Benghi, C., Černý, M., 2017, „Xbim.Essentials: a library for interoperable building information applications“, JOSS, Journal of Open Source Software
- Liebich T., Weise M., Scherer R.J., 2014, „Prüfung und Erweiterung von Fachmodellen am Beispiel von IFC“, In: Scherer R., Schapke SE. (eds) Informationssysteme im Bauwesen 1. VDI-Buch. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg
- Weise, M., Nisbet, N., Liebich, T., Benghi, C., 2016, „IFC model checking based on mvdXML 1.1“
- Zhang, C., Beetz, J., Weise, M., 2014, „Model view checking: automated validation for IFC building models“, European Conference on Process and Product Modelling; Wien, 17 – 19.20.2014

A

Aien, S. 157
 Akeret, D. 392
 Alfonso, P. 20
 Altgeld, H. 336
 Andriamamonjy, A. 28
 Ardone, A. 164
 Auer, T. 407, 447

B

Bachmann, M. 269
 Bachseitz, M. 399
 Becker, R. 516
 Benndorf, G. 20
 Benner, J. 52, 295
 Benz, A. 93
 Berg, S. 533
 Betzold, C. 415
 Bittner, T. 36
 Blankenbach, J. 516
 Blatt, Ch. 116
 Bonnet, C. 407
 Bordin, S. 415
 Boudhaim, M. 44
 Boudier, K. 195
 Brandt, S. 269, 439
 Bratoev, I. 407
 Braun, R. 374
 Brüggemann, T. 423
 Buderus, J. 415

C

Calabrese, T. 486
 Carbonare, N. 187
 Caspari, C. 278
 Chokhachian, A. 407
 Coors, V. 374
 Cowie, A. 223

D

Dentel, A. 415
 Dermentzis, G. 486
 Dietz, S. 124
 Doll, I. 552
 Dombois, M. 36
 Dragic, M. 139

E

Ebertshäuser, S. 423
 Eicker, U. 374
 Eisenlohr, J. 44
 Elfner, J. 132
 Eller, C. 36, 44
 Engedy, A. E. 560

Engelpracht, M. 569

F

Fichtner, W. 471
 Franz, M. 431
 Franz, V. 455
 Frechen, M. 303
 Frenzel, C. 366
 Frey, M. 392
 Frijns, A. J. H. 262
 Frisch, J. 423, 516, 533
 Fürst, Y. 439

G

Ganji Kheybari, A. 195, 286
 Gantner, J. 76
 Gärtner, J. 447
 Geiger, A. 52, 295, 579
 Gnerlich, R. 455
 Groß, B. 336
 Grunewald, J. 107

H

Haase, W. 147
 Hafellner, H. 139
 Hagenmeyer, V. 295, 579
 Hansel, F. 525
 Haskell, J. 303
 Häfele, K.-H. 52, 295
 Hempel, S. 52
 Herle, S. 516
 Hirth, S. 107
 Hoch, R. 107
 Hoffmann, S. 195, 286, 344
 Hofmann, S. 508
 Husser, M. 147

J

Joost, J.-N. 533

K

Kalaydzhieva, V. A. 60
 Kandasamy, K. 415
 Kaul, W. 311, 478
 Kautsch, P. 139
 Keilmann, L. 431
 Kelly, N. 223
 Kharraz, S. 311
 Kingma, B. R. M. 262
 Kirnats, L. 533
 Klein, R. 28
 Kleinebrahm, M. 164
 Klinker, F. 375
 Koch, V. 552

Koenigsdorff, R. 399, 508
Kreulitsch, D. 478
Kriegel, M. 269, 439
Krutzsch, S. 358
Kuhn, T. E. 44

L

Lauster, M. 68, 423, 463, 569
Lechleitner, J. 560
Leifgen, C. 44
Loux, J. 392

M

Maas, A. 319
Maas, S. 336
Mahdavi, A. 11, 60, 157, 180, 204, 216, 246, 254, 492, 500, 543, 560
Mainzer, K. 471
Malakhova, A. 525
Malhotra, A. 423
Massa Gray, F. 447
Maurer, C. 44
McKenna, R. 164, 471
Mehrfeld P. 68
Morgenthal, G. 93
Müller, D. 68, 423, 463, 569

N

Nicolai, A. 172
Nytsch-Geusen, C. 311, 478

O

Ochs, F. 238, 486
Ochse, S. 423

P

Paepcke, A. 107, 172
Pahn, M. 270
Petzold, F. 407
Pflug, T. 187
Pinich, S. 180
Pont, U. 60, 543

R

Radermacher, A. 319
Remmen, P. 423
Rexroth, K. 76
Réhault, N. 20
Rida, M. 223
Rist, T. 20
Ritter, V. 327
Ritterbusch, S. 552
Rüppel, U. 36, 44

S

Saeb Gilani, B. 269
Saelens, D. 28
Schade, A. 431
Scheidemantel, E. 383
Schmid, Ch. 76
Schmidt, C. 336
Schmidt, D. 344
Schmidt, P. 99
Schmidt, W. 352
Schmitt, A. 374
Schober, P. 543
Scholzen, F. 336
Schubert, G. 407
Schuss, M. 157, 543
Schuß, M. 500
Schweiker, M. 231
Sengewald, T. 303
Shirdel, H. 492
Sick, F. 124, 358
Siegele, D. 238
Siwiecki, J. 99
Smarsly, K. 85
Sobek, W. 147
Söbke, H. 85
Sprenger, W. 44
Stave, J. 374
Steinbüchel, J. 68
Stephan, W. 431
Sterl, N. 500
Stetter, C. 366
Stopp, H. 352, 525
Storek, T. 569
Strangfeld, P. 362, 525

T

Taheri, M. 157, 180, 216, 246
Tahmasebi, F. 216, 246, 254, 492
Taraben, J. 93
Tauscher, E. 85
Tiesler, A. 455

V

Van de Ven, A. 508
van Marken Lichtenbelt, W.D. 262
van Treeck, C. 11, 99, 423, 533
Vering, C. 569
Veselá, St. 262
von Both, P. 8, 76, 423, 552
Völker, C. 93
Völker, E. 352

W

Wagner, A. 8, 187, 231
Wallner, S. 423

Weck-Ponten, S. 516
Weiler, V. 374
Weinand, J. 164
Weinläder, H. 383
Weiß, D. 107, 172
Werder, F. 124
Wirtz, M. 423
Würstle, P. 374

Y

Yasin, M. 383

Z

Zeisberger, J. 132
Zeppenfeldt, U. 99
Ziegler, F.J. 132
Zirak, M. 374
Zwahlen, M. 392

DOI 10.5445/IR/1000085743



bausim2018.kit.edu

