
Automatische Simulation von Wärmebedarf und -versorgung auf Quartiersebene

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Wirtschaftswissenschaften
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation

von
Verena Weiler, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung: 08.03.2022

Referent: Prof. Dr. Wolf Fichtner

Korreferentin: Prof. Dr. Ursula Eicker



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung -
Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz (CC BY-SA 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit am Zentrum für nachhaltige Energietechnik (zafh.net) der Hochschule für Technik Stuttgart. Im Rahmen des kooperativen Promotionskollegs ENRES kam ich dank eines Stipendiums der Landesgraduiertenförderung als externe Doktorandin an den Lehrstuhl für Energiewirtschaft zum Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) des Karlsruher Institutes für Technologie.

Ich möchte meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Wolf Fichtner, für wertvolle Diskussionen, das entgegengebrachte Vertrauen und die Freiheit in der Gestaltung meiner Arbeit bedanken. Besonders bedanken möchte ich mich bei meiner Korreferentin und ehemaligen Institutsleiterin des zafh.net, Frau Prof. Dr. Ursula Eicker, für die Einbindung in viele wissenschaftliche Projekte, die Unterstützung bei Publikationen und die vielen konstruktiven Diskussionen, in persona oder digital. Weiterhin danke ich meinem Prüfer, Herrn Prof. Dr. Thomas Lützkendorf, sowie Herrn Prof. Dr. Alexander Mädche für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Darüber hinaus möchte ich mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen am zafh.net bedanken, für die vielen fachlichen und persönlichen Gespräche auf dem Gang, in der Kaffeeküche, beim Mittagessen, im Schlesinger und in letzter Zeit via Zoom. Ich bin froh, in die zafh.net-Familie aufgenommen worden zu sein, diese tolle Atmosphäre hätte ich mir kaum anders wünschen können! Danke insbesondere auch an Eric, Kai, Jürgen, Pilar und Ruben für all die Hilfe mit Java, INSEL, Python und Fortran.

Viel Kraft und Unterstützung habe ich von meiner Familie und meinen Freunden erhalten, daher gebührt ihnen mein größter Dank. Besonders bedanken möchte ich mich bei meinen Eltern, die mich stets und bedingungslos unterstützt haben. Nicht zuletzt ein großes Danke an meinen Mann Marc, der mir oft Mut gemacht und an mich geglaubt hat.

Kurzfassung

Die Bedeutung von Klimaschutz und Nachhaltigkeit sowie die Forderung nach konkreten Umsetzungsmaßnahmen nimmt in den letzten Jahren in Deutschland stetig zu. In den zuständigen Gemeinden und Landkreisen fehlen allerdings oftmals geeignete Tools zur Berechnung und Bewertung von individuell angepassten Szenarien zur Umstellung der Wärmeversorgung der Gebäude. Viele Analysen finden bislang top-down auf nationaler Ebene statt oder betrachten bottom-up Einzelgebäude. Die allerdings für die Entscheidung und Umsetzung relevante Zwischenebene von Quartieren wird nur selten adressiert.

Daher wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Verfahren entwickelt, welches es ermöglicht, Energiebilanzen sowie verschiedene Szenarien für eine nachhaltige Wärmeversorgung der Gebäude für ein Quartier oder eine ganze Kommune zu berechnen, bewerten und vergleichen. Es basiert auf Tools zur Modellierung und Simulation, die unabhängig von dieser Arbeit bereits die Bestimmung der lokalen erneuerbaren Potenziale sowie bestimmte bedarfsseitige Analysen umfassen und an der HFT Stuttgart seit 2013 entwickelt werden. Darauf aufbauend kommen im Rahmen der vorliegenden Arbeit verschiedene Methoden unter anderem aus dem Bereich der Geoinformatik, der heuristischen Entscheidungsfindung, der objektorientierten Modellierung mit UML sowie der mathematischen Modellbildung in Form der physikalische Modellierung mit Python, Java und INSEL zum Einsatz. Fokus ist die Verknüpfung der einzelnen Methoden um eine automatisierte Berechnung von zentralen und dezentralen Wärmeversorgungssystemen zu ermöglichen.

Die Anwendung der entwickelten Methoden wird anhand verschiedener Fallstudien gezeigt. Dabei werden die einfache Anwendbarkeit sowie die Übertragbarkeit des Verfahrens demonstriert. Der Abgleich der Simulationsergebnisse mit Messdaten zeigt dabei eine nur geringe Abweichung von 6 % im Jahresmittel.

Insgesamt steht mit den Erweiterungen dieser Arbeit ein Werkzeug zur Verfügung, welches den gesamten Bereich der urbanen Gebäudeenergiesimulation

abdeckt. Mit nur wenigen, flächendeckend verfügbaren Informationen und einer anschaulichen Nutzeroberfläche können damit Szenarien für die erneuerbare Wärmeversorgung abgebildet und verglichen werden. Diese können zur Entscheidungsfindung in Kommunen und Landkreisen genutzt werden, um so die Umsetzung von konkreten Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen zu beschleunigen.

In dieser Arbeit wurde der Stand der Entwicklung bis Januar 2022 berücksichtigt.

Abstract

The importance of climate protection and sustainability as well as the demand for concrete implementation measures has been steadily increasing in Germany in recent years. However, the responsible municipalities and districts often lack suitable tools for calculating and evaluating individually adapted scenarios for converting the heat supply of buildings. Many analyses are carried out top-down on a national level or look at individual buildings bottom-up. The intermediate level of neighbourhoods, which is relevant for decision-making and implementation, is rarely addressed.

Therefore, a process was developed in the context of the present work, which makes it possible to calculate, evaluate and compare energy balances as well as different scenarios for a sustainable heat supply of the buildings for a neighbourhood or a whole municipality. It is based on tools for modelling and simulation that, independently of this work, already include the determination of local renewable potentials as well as certain demand-side analyses and has been developed at HFT Stuttgart since 2013. Building on this, various methods from the fields of geoinformatics, heuristic decision-making, object-oriented modelling with UML and mathematical modelling in the form of physical modelling with Python, Java and INSEL are used in this thesis. The focus is on linking the individual methods to enable automated calculation of centralised and decentralised heat supply systems.

The application of the developed methods is demonstrated using various case studies. The simple applicability and the transferability of the method are demonstrated. The comparison of the simulation results with measured data shows only a small deviation of 6 % in the annual mean.

Overall, the extensions of this work provide a tool that covers the entire field of urban building energy simulation. With only a few, widely available information and a descriptive user interface, scenarios for renewable heat supply can be mapped and compared. These can be used for decision-making in municipalities

and districts to accelerate the implementation of concrete measures to reduce greenhouse gas emissions.

In this work, the status of development until January 2022 was taken into account.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iii
Kurzfassung	v
Abstract	vii
Inhaltsverzeichnis	ix
Abbildungsverzeichnis	xvi
Tabellenverzeichnis	xviii
Abkürzungsverzeichnis	xix
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen	4
1.3 Lösungsweg und Aufbau der Arbeit	5
2 Grundlagen der Gebäudeenergiemodellierung	9
2.1 Grundlagen der Modellierung	10
2.1.1 Top-down Modelle	11
2.1.2 Bottom-up Modelle	12
2.2 Einordnung und Vergleich der Modellierungstools	15
3 Kontext und verwendete Simulations-Werkzeuge	21
3.1 Wärmeversorgungszenarien für Deutschland in 2030 und 2050 . .	21
3.2 Betrachtungshorizont Quartier	25
3.3 3D Gebäudemodellierung im CityGML Format	27
3.4 Die Simulationsplattform SimStadt	31
3.4.1 Aufbau, Datenmodell und Bibliotheken	33
3.4.2 Wärmebedarfsberechnung	37

3.4.3	Primärenergie- und CO ₂ -Emissionsberechnung	39
3.4.4	Ermittlung der grauen Energie der Baukonstruktion der Gebäude	40
3.4.5	Weitere Bedarfs- und Potenzialberechnungen	42
3.5	Warmwasserbedarfsermittlung mit DHWcalc	43
4	Methoden zur Modellierung von urbanem Wärmebedarf und Versor- gungsoptionen	47
4.1	Simulation des Wärmebedarfs von Gebäuden in Quartieren	50
4.1.1	Methoden zur Attributierung von fehlenden Gebäude- und Nutzungsparametern	50
4.1.2	Ergänzung und Veränderung der CityGML Datei	59
4.1.3	Stündliche Warmwasserprofile für Wohngebäude mit DHW- calc und SimStadt	62
4.2	Datenmodelle und Entwicklung von Bibliotheken für die automati- sierte Simulation	70
4.2.1	Energiesystemkomponenten-Bibliothek	70
4.2.2	Internationale Gebäudephysik-Bibliotheken	83
4.3	Simulation von Energiesystemen zur Wärmeversorgung in Quartieren	88
4.3.1	Einschränkung des Lösungsraums bei der Wahl der Versor- gungsvarianten	91
4.3.2	Simulationsmodelle für Energiesysteme	94
4.3.3	Erstellung von Templates aus den Modellen	109
4.3.4	Dimensionierung und Parametrisierung der Simulations- modelle	113
4.3.5	Kostenberechnung	119
5	Anwendung der entwickelten Methoden	121
5.1	Wärmebedarfssimulation mit zusätzlichen Datenquellen	121
5.2	SimStadt Workflow zur Berechnung von Wärmeversorgungssystemen	127
5.3	Fallstudien zur Simulation von Versorgungssystemen	130
5.3.1	Simulation und Validierung Biomassekessel und Gaskessel mit Nahwärmenetz in Mainz	131

5.3.2	Dimensionierung und Simulation dezentraler Wärmepumpen in Wüstenrot	139
5.3.3	Systemauswahl und Simulation zentraler Versorgung mit BHKWs und Gaskesseln im Rosensteinviertel	150
6	Diskussion und kritische Würdigung	157
6.1	Bewertung der Übertragbarkeit	157
6.2	Kritische Würdigung und Ausblick	158
6.2.1	Inhaltliche Aspekte	159
6.2.2	Methodische Aspekte	160
7	Zusammenfassung	165
	Literaturverzeichnis	170

Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematischer Aufbau der Arbeit.	6
2.1	Anzahl der Artikel pro Jahr von 1997 bis 2020 bei ScienceDirect mit den Wörtern „urban“, „energy“ und „model“ in Titel, Abstract oder Keywords	9
2.2	Methoden der urbanen Gebäudeenergiesimulation	11
3.1	Roadmap Wärmebedarf und -versorgung Haushalte [71]	23
3.2	Entwicklung Absatzmarkt und Gesamtstruktur der Wärmeerzeuger für Neubau (oben) und Bestandsgebäude (unten) im Szenario zur Reduktion der Treibhausgasemissionen um 83 % [70]	24
3.3	Energetische Stadtraumtypen (EST) nach [149]	26
3.4	Verschiedene <i>Levels of Detail</i> des CityGML Formats [21]	28
3.5	Möglichkeiten zur Modellierung von Gebäudeteilen in CityGML [140]	30
3.6	Struktur der EnergyADE Version 1.0., eigene Darstellung nach [17]	30
3.7	SimStadt Workflow Schema	32
3.8	SimStadt Simulations-Plattform, <i>Heat Demand Analysis</i> Workflow	33
3.9	Übersicht der Baualters- und Größenklassen nach IWU [105]	35
3.10	Methode zur Abbildung von grauer Energie und Emissionen in SimStadt	41
3.11	Wahrscheinlichkeitsverteilungen der vier TWW-Lasten im Tagesverlauf [86]	44
4.1	Schematischer Überblick über angewandte und entwickelte Methoden (grün:im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelt, blau:in SimStadt bereits vorhanden).	49
4.2	Abstufungen bei Qualität und Verfügbarkeit der Daten zu den benötigten Attributen	51
4.3	Zuordnung wenn der Punkt innerhalb oder außerhalb des Polygons liegt	53

4.4	Nutzung einer PostgreSQL Datenbank zur Zusammenführung von Daten aus OSM und CityGML Quellen	55
4.5	Vorgehen zur Zuordnung der Gebäudealtersklassen in der CityGML Datei bei verschiedenen Datenquellen	56
4.6	Verteilung der beheizten Wohnfläche nach Gebäudetyp und Baualtersklassen in Deutschland nach IWU-Typologie [105]	59
4.7	Darstellung von Reihenhäusern im verwendeten CityGML Modell (oben) und in der online Karte von gis6.stuttgart.de/maps (unten)	61
4.8	Spezifischer Endenergieverbrauch in Deutschland, getrennt nach Anwendung [170]	63
4.9	Vergleich des Verlaufs des Warmwasserbedarfs bei Annahme eines konstanten Bedarfs sowie einem Bedarfsverlauf aus den DHWcalc Profilen für Werktag und Wochenende für ein Mehrfamilienhaus .	65
4.10	365 stündlich aufgelöste Warmwasserprofile für ein Jahr	66
4.11	Vergleich des Gesamtwärmebedarfs eines MFHs bei konstantem WW-Bedarf (orange) und WW-Bedarf aus den DHWcalc Profilen (blau für Werktage und grün für Wochenendtage)	67
4.12	Jahresverlauf des Gesamtwärmebedarfs bei Verwendung eines konstanten TWW-Bedarfs sowie bei Verwendung eines mit DHWcalc generierten TWW-Profiles	69
4.13	Übersicht der verschiedenen Typen von UML-Diagrammen (eigene Darstellung nach [136])	72
4.14	Allgemeines Beispiel eines Klassendiagramms	72
4.15	Ausschnitt der Energiesystemkomponenten-Bibliothek: Systemkomponenten	75
4.16	Beispiel temperaturabhängige COP-Kurve einer Wärmepumpe . .	78
4.17	Ausschnitt der Energiesystemkomponenten-Bibliothek: Funktionen	79
4.18	Ausschnitt der Energiesystemkomponenten-Bibliothek: Energieträger	79
4.19	Viewmodel der Energiesystemkomponenten-Bibliothek	80
4.20	User-Interface der Energiesystemkomponenten-Bibliothek	81
4.21	Funktion der spezifischen Investitionen für einen Holzpellet-Kessel	83
4.22	Gebäudetypen der Gebäudephysik-Bibliothek für New York City nach [147] inkl. zugeordneten PLUTO <i>building class codes</i>	85

4.23	Schematische Darstellung des Workflow-Schritts in SimStadt zur Energiesystemsimulation	89
4.24	Flussdiagramm zur Auswahl von Versorgungssystemen	93
4.25	Berechnung der Verluste des thermischen Speichers in INSEL	97
4.26	Schema des zentralen Versorgungssystems BHKW, Gaskessel und Speicher	99
4.27	Ausschnitt aus dem INSEL Modell des zentralen Versorgungssys- tems BHKW, Gaskessel und Speicher	101
4.28	Output des zentralen Versorgungssystems BHKW, Gaskessel und Speicher für Stunde 6880 bis Stunde 6930	102
4.29	Output des Systems mit drei BHKWs in Kaskade und Gaskessel für zwei Simulationsdurchgänge mit 15-minütiger (oben) bzw. stündli- cher (unten) Auflösung	106
4.30	Schema des dezentralen Versorgungssystems mit Wärmepumpe, Gaskessel und Speicher	108
4.31	Drei Ausschnitte aus einem in Text konvertierten INSEL Modell	110
4.32	Drei Ausschnitte aus dem Template eines INSEL Modells	111
5.1	Ergebnisse für Fallstudie Rainau: Anzahl Gebäude je Altersklasse laut Gemeindedaten, laut Zuordnung nach IWU-Datenbank sowie zwei Durchgängen mit Zensus-Daten	122
5.2	Ergebnisse für Fallstudie Rainau: spezifischer Heizwärmebedarf je Altersklasse laut Gemeindedaten, Zuordnung nach IWU-Datenbank sowie zwei Durchgängen mit Zensus-Daten	123
5.3	Vergleich der Gebäudenutzung aus verschiedenen Quellen: Google Earth bzw. Google Street View (links), CityGML inkl. ALKIS Codes sowie POIs aus OSM (rechts)	125
5.4	Vergleich der angegebenen Nutzungen in OSM und ALKIS für die Fallstudie Stuttgart-Stöckach	127
5.5	SimStadt Workflow-Schritt zur Berechnung eines Wärmeversor- gungssystems	129
5.6	CityGML Modell der Fallstudie Mainz, Repräsentation im FZK Viewer	132

5.7	Erzeugung gemessen (Biomasse: dunkelgrün, fossil: braun) und simuliert (Biomasse: hellgrün, fossil: orange) sowie gemessener Verbrauch (blau) für das Biomassensystem in der Fallstudie Mainz .	137
5.8	Schematische Darstellung des Neubaugebiets „Vordere Viehweide“ in Wüstenrot [121]	140
5.9	3D Modell der Gebäude der Fallstudie Wüstenrot in SketchUp . . .	141
5.10	Überfluggperspektive des Siegerentwurfs für das neue Rosensteinquartier (www.asp-stuttgart.de/portfolio-items/internationaler-wettbewerb-rosenstein-stuttgart)	151
5.11	3D Visualisierung des CityGML Modells, basierend auf dem Siegerentwurf für das Rosensteinviertel	152
5.12	Simulation des Heizwärme- und Trinkwarmwasserbedarfs für die Fallstudie Rosensteinviertel	154
5.13	Jahresdauerlinien für Gesamtwärmebedarf (blau), Wärmeerzeugung der BHKWs (grün) und Wärmeerzeugung der Gaskessel (orange) für die Fallstudie Rosensteinviertel	156
5.14	Wärmebedarf (blau) und -erzeugung (BHKWs (grün) und Gaskessel (orange)) für einen Tag Ende November für die Fallstudie Rosensteinviertel	156

Tabellenverzeichnis

1.1	Ziele der Energiewende in Deutschland bis 2050 und Stand ihrer Erreichung für die Berichtsjahre 2018 und 2019 [34]	2
2.1	Vergleich verschiedener Tools und Methoden zur urbanen Gebäudeenergiemodellierung	18
3.1	Zusammensetzung der Wärmebereitstellung im auf Gesamtkosten optimierten System in 2050 [69]	22
4.1	Vergleich der Altersklassen im Mikrozensus und in der IWU-Datenbank	58
4.2	Gebäudeinformationen und Simulationsergebnisse für zehn Gebäude eines Gebäudeblocks	68
4.3	Attribute der Klasse <i>CombinedHeatPower</i> und deren Charakterisierung	76
4.4	Vergleich der Simulationsergebnisse bei Zeitschritten von 1 Stunde sowie 15 Minuten und Abweichungen zwischen den beiden Simulationsdurchgängen	105
5.1	Jährlicher Vergleich der gemessenen und simulierten Werte für Bedarf und Erzeugung in MWh für das Jahr 2017 für die Fallstudie Mainz	134
5.2	Monatlicher Vergleich der gemessenen und simulierten Werte für Bedarf und Erzeugung in MWh für das Jahr 2017 für die Fallstudie Mainz	135
5.3	Monatlicher Vergleich der gemessenen und simulierten Werte für Bedarf und Erzeugung in MWh für das Jahr 2017 für die Fallstudie Mainz, bei Verwendung der gemessenen Verbrauchsdaten als Input ins Systemsimulationsmodell	136
5.4	Ergebnisse des jährlichen gebäudespezifischen Bedarfs für Heizwärme, Warmwasser und Strom sowie PV-Stromerzeugung und installierte PV-Leistung für die Fallstudie Wüstenrot	141

5.5	Annahmen zu Energieträgerkosten, CO ₂ -Emissionsfaktoren und Einspeisevergütung für 2020 und 2050	142
5.6	Annahmen zu Investitionen, Lebensdauer und Wartungskosten der Komponenten für 2020 und 2050	143
5.7	Ergebnisse der regelbasierten Dimensionierung für das Wärmepumpensystem inkl. jährlichen Gesamtkosten f_{ges} für die Szenarien 2020 und 2050 für die Fallstudie Wüstenrot	145
5.8	Ergebnisse der Dimensionierung mit genetischem Algorithmus für das Wärmepumpensystem inkl. jährlichen Gesamtkosten $f_{ges,2020}$ für das Szenario 2020 für die Fallstudie Wüstenrot	146
5.9	Ergebnisse der Dimensionierung mit genetischem Algorithmus für das Wärmepumpensystem inkl. jährlichen Gesamtkosten für das Szenario 2050 für die Fallstudie Wüstenrot	148
5.10	Kennzahlen des Siegerentwurfs Rosensteinviertel (Anzahl Haushalte basierend auf einer Annahme von 70 m ² und 2 Personen pro Haushalt)	152
5.11	Erzeuger-Dimensionierung BHKW und Gaskessel für Fallstudie Rosensteinviertel	155

Abkürzungsverzeichnis

- ACO** Ant Colony Optimization
- ADE** Application Domain Extension
- AdV** Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland
- ALKIS** Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem
- BAFA** Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
- BHKW** Blockheizkraftwerk
- BMWi** Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
- CC** Creative Commons
- COP** Coefficient of Performance
- DGNB** Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen
- EE** Erneuerbare Energien
- EFH** Einfamilienhaus
- EMF** Eclipse Modeling Framework
- EnEV** Energieeinsparverordnung
- EST** Energetische Stadtraumtypen
- ESKB** Energiesystemkomponenten-Bibliothek
- IFEU** Institut für Energie- und Umweltforschung
- FME** File Manipulation Engine
- GA** Genetische Algorithmen
- GEG** Gebäudeenergiegesetz
- GIS** Geoinformationssystem
- GMH** Großes Mehrfamilienhaus

- GML** Geography Markup Language
- GUI** Graphical User Interface
- HaH** Haushalte
- HH** Hochhaus
- HFT Stuttgart** Hochschule für Technik Stuttgart
- HW** Heizwärme
- IEA** International Energy Agency
- IPCC** Intergovernmental Panel on Climate Change
- IWU** Institut Wohnen und Umwelt
- KWK** Kraft-Wärme-Kopplung
- KfW** Kreditanstalt für Wiederaufbau
- LUBW** Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
- Lidar** Light detection and ranging
- LCA** Lebenszyklusanalyse
- LOD** Level of Detail
- MFH** Mehrfamilienhaus
- NRMSE** Normalized Root Mean Square Error
- OGC** Open Geospatial Consortium
- OSM** Open Street Map
- PSO** Particle Swarm Optimization
- POI** Point Of Interest
- PV** Photovoltaik
- RH** Reihenhaus
- SIG3D** Special Interest Group 3D
- SHC** Solar Heating and Cooling Programme
- SRA** Simplified Radiosity Algorithm

TIC Terrain Intersection Curve

TMY Typical Meteorological Year

TWW Trinkwarmwasser

UBEM Urban Building Energy Modelling

UML Unified Modeling Language

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Der anthropogene Klimawandel und der damit verbundene Anstieg der weltweiten Temperatur wird inzwischen von den meisten Regierungen weltweit anerkannt und als eine der größten Herausforderungen für die Menschheit in den kommenden Jahrzehnten begriffen.

Weltweit wurden daher in den letzten Jahren Ziele für die Reduktion von Treibhausgasemissionen und den Einsatz fossiler Energieträger sowie die Steigerung der Energieeffizienz festgelegt. Auf der Weltklimakonferenz im Dezember 2015 in Paris hat sich die Staatengemeinschaft darauf geeinigt, die Erderwärmung auf unter 2 °C zu begrenzen [150]. Darauf folgend wurde in Deutschland der Klimaschutzplan 2050 verabschiedet [29]. Hier sowie in weiteren Gesetzen und Maßnahmenkatalogen wurden die folgenden Ziele verankert:

- Die Treibhausgasemissionen sollen bis 2030 um 55 % und bis 2050 um mindestens 80 % gegenüber 1990 sinken [29]. Diese Zahlen wurden in der Änderung des Klimaschutzgesetzes 2021 auf eine Reduktion um 65 % bis 2030 und eine Erreichung der Klimaneutralität in 2045 verschärft [51].
- Der Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch soll bis 2030 mindestens 65 % betragen, bereits vor dem Jahr 2050 soll der gesamte in Deutschland erzeugte Strom treibhausgasneutral erzeugt sein [28].
- Der Bruttostromverbrauch soll bis 2050 um 25 % gegenüber 2008 gemindert werden; bis 2020 sollte er bereits um 10 % sinken [35].
- Die Sanierungsrate für Gebäude soll von derzeit jährlich etwa 1 % auf 2 % des gesamten Gebäudebestands bis 2020 verdoppelt werden [35].

- Der Wärmeverbrauch des Gebäudebestands sollte bis 2020 um 20 % reduziert werden. Der Primärenergieverbrauch des Gebäudebestands soll bis 2050 um 80 % im Vergleich zu 2008 gemindert werden [31], mit dem Ziel, bis 2050 einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand zu haben. Neubauten sollen bereits ab 2021 im Niedrigstenergiegebäudestandard errichtet werden [29].
- Die Emissionen im Verkehrssektor sollen bis 2030 um 40 % gegenüber 1990 zurückgehen, das Verkehrssystem in Deutschland soll 2050 weitgehend dekarbonisiert sein [29].

Wie in Tabelle 1.1 zu sehen, konnten die Ziele bis 2020 im Jahr 2019¹ für den Bereich Erneuerbare Energien erreicht bzw. sogar leicht übertroffen werden.

Tabelle 1.1: Ziele der Energiewende in Deutschland bis 2050 und Stand ihrer Erreichung für die Berichtsjahre 2018 und 2019 [34]

	2018	2019	2020	2030	2050
Treibhausgasemissionen					
Treibhausgasemissionen [%] ¹	-31,5	-31,5	-40	-65	-100
Erneuerbare Energien					
Anteil am Bruttoendenergieverbrauch [%]	16,8	17,4	18	30	60
Anteil am Bruttostromverbrauch [%]	37,8	42,0	35	65	100
Anteil am Wärmeverbrauch [%]	14,8	14,7	14		
Effizienz und Verbrauch					
Primärenergieverbrauch [%] ²	-8,7	-11,1	-20		-50
Bruttostromverbrauch [%] ²	-4,2	-6,9	-10		-25
Wärmeverbrauch Gebäude [%] ²	-14,4	-10,9	-20		-80
Endenergieverbrauch Verkehr [%] ³	-6,1	-7,2	-10		-40

¹ ggü. 1990

² ggü. 2008

³ ggü. 2005

¹ Neuere Zahlen lagen bis Anfang 2022 nicht vor.

Im Bereich Effizienz und Verbrauch hingegen konnten die Ziele der Bundesregierung nicht erreicht werden. Vor allem die nicht erreichten Ziele im Bereich der Wärmeversorgung von Gebäuden sind dabei hervorzuheben, die auch einen direkten Einfluss auf die Nichterreichung der Reduktion des Primärenergieverbrauchs haben. Ein weiteres, nicht erreichtes Ziel in 2020 ist die Steigerung der Sanierungsrate für Gebäude auf 2 %. Laut dem dena Gebäudereport 2021 [49] liegt die derzeitige Sanierungsrate in Deutschland bei 1 %.

Um die Ziele bis 2030 bzw. 2050 erreichen zu können, muss die Umsetzung geeigneter Maßnahmen mit Hilfe von Gesetzen, Verordnungen und Förderungen stärker vorangetrieben werden. So hat etwa das Land Baden-Württemberg 2020 eine Weiterentwicklung des bestehenden Klimaschutzgesetzes beschlossen, in dem eine kommunale Wärmeplanung zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen für Kommunen mit mehr als 20.000 Einwohnern (Stadtkreise und große Kreisstädte) vorgeschrieben ist [101]. Die Erstellung eines solchen kommunalen Wärmeplanes oder Klimaschutzkonzeptes fällt in den Verantwortungsbereich von Energie- und Klimaschutzmanagern der Kommunen. Oftmals gibt es in den Städten dafür aber keine Kapazitäten und/oder Kompetenzen, so dass die Erstellung an ein externes Planungsbüro vergeben wird. Hier arbeiten Experten Konzepte aus, die zwar technisch-ökonomisch sinnvoll und richtig sein mögen, für die Zuständigen in den Kommunen jedoch oftmals schwer in ihrer Gänze verstanden und ggf. angepasst werden können. Darüber hinaus besteht das Risiko, dass lokale Gegebenheiten und Besonderheiten nicht ausreichend berücksichtigt werden.

Um die Umsetzungschancen der entwickelten Konzepte zu erhöhen, sind jedoch die beiden genannten Aspekte von besonderer Bedeutung. Gleichwohl müssen die Annahmen und Berechnungsmethoden, die in die Erstellung der Konzepte einfließen, wissenschaftlich und technisch richtig sein. Hier lässt sich ein Spannungsfeld zwischen Detailtiefe und Anwendbarkeit erkennen.

In den letzten Jahren gab es zahlreiche und vielfältige Ansätze zur Entwicklung von urbanen Gebäudeenergiemodellierungstools und -methoden. Diese werden detailliert in Kapitel 2 beschrieben. Die meisten dieser Tools und Methoden müssen jedoch individuell an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden.

Dafür benötigt der Nutzer² ein hohes Maß an Wissen über das Tool an sich, was oftmals auch Kenntnisse im Programmieren mit der jeweiligen Programmiersprache einschließt, sowie Wissen über die Zusammenhänge und Möglichkeiten im Rahmen der urbanen Gebäudeenergiemodellierung allgemein. Außerdem werden i.d.R. viele Daten und Informationen zum Anwendungsfall benötigt, die oftmals nur zeitintensiv beschafft werden können oder aber nicht vorhanden sind und daher durch Annahmen ersetzt werden müssen.

Alternativ gibt es Berechnungsmethoden, die basierend auf Kennzahlen oder stark vereinfachenden Berechnungen und Annahmen Ergebnisse für Bedarf und Versorgung bereitstellen. Sie berücksichtigen dabei nicht oder nur unzureichend die individuellen Gegebenheiten des zu untersuchenden Quartiers. Sie gehen in der Regel auch nicht auf Einzelgebäude ein sondern erstellen aggregierte Bilanzen für das gesamte Quartier. Dadurch ist keine räumliche Lokalisierung von Bedarfen und ggf. daraus ableitbare Versorgungslösungen möglich.

Des Weiteren sind viele der vorhandenen Tools stark auf nur einen Bereich der urbanen Gebäudeenergiemodellierung ausgerichtet. Sie haben ihren Fokus entweder in der Bedarfs- oder in der Versorgungsmodellierung und betrachten den jeweils anderen Bereich nicht oder nur vereinfacht.

1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen

Die zuvor aufgeworfenen Problemstellungen und Herausforderungen lassen sich in zwei große Themenschwerpunkte zusammenfassen: Einerseits müssen die geforderten Wärmebedarfs- und Treibhausgasemissionsreduktionen erreicht werden, andererseits werden für die konkrete Maßnahmenentwicklung und -umsetzung geeignete Werkzeuge benötigt. Geeignet bedeutet in diesem Fall, dass die Anforderungen der individuellen Problemstellungen vor Ort genau erfüllt werden.

Der Beitrag dieser Arbeit und ihrer Ergebnisse dazu ist etwa die Unterstützung von Klimaschutzmanagern von Kommunen und Landkreisen, die ein Klimaschutz-

² In dieser Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten werden dabei ausdrücklich mitgemeint, soweit es für die Aussage erforderlich ist.

konzept oder einen Wärmeleitplan erstellen und damit verschiedene Szenarien zur Wärmeversorgung berechnen und vergleichen wollen. Ebenfalls sollen Entwickler von Quartiersprojekten in Stadtwerken oder Planungsbüros angesprochen werden, die zunächst eine Vorauswahl aus der Vielzahl der möglichen Alternativen zur Umsetzung treffen wollen.

Daraus lassen sich die folgenden Forschungsfragen ableiten, die im Rahmen dieser Arbeit beantwortet werden sollen:

- Wie können Energiebedarfe für Quartiere auf Einzelgebäudeebene automatisiert berechnet werden? Wie lassen sich relevante Gebäude-Attribute im städtischen Kontext ermitteln?
- Wie können zukunftsfähige Wärmeversorgungsvarianten für Quartiere mit unterschiedlichem Energiebedarf abgeleitet werden?
- Wie können Versorgungssysteme automatisch basierend auf dem Wärmebedarf dimensioniert und simuliert werden?
- Wie kann die Simulation von Bedarfs- und Versorgungsszenarien bei der strategischen Entscheidungsfindung unterstützen?

Aus den Forschungsfragen lässt sich folgende Hypothese ableiten, die in der Arbeit belegt werden soll: Quartiere weisen unterschiedliche Energiebedarfsprofile auf. Nur durch die detaillierte Kenntnis mit hoher räumlicher Auflösung lassen sich zukunftsfähige Energiesysteme detailliert auslegen und berechnen.

1.3 Lösungsweg und Aufbau der Arbeit

Im Vergleich zu anderen Arbeiten und Herangehensweisen [41, 127, 128], die sich mit ähnlichen Problemen und Fragestellungen beschäftigen, stehen bei der vorliegenden Arbeit die einfache Anwendbarkeit, die Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten sowie die Übertragbarkeit auf andere Quartiere im Vordergrund. Dafür werden Daten genutzt, die flächendeckend vorhanden und meist frei verfügbar (*open data*) sind. Für die Erstellung und Berechnung der Alternativen ist nur ein Grundmaß an Fachwissen nötig.

Abbildung 1.1 fasst den Aufbau der Arbeit schematisch zusammen.

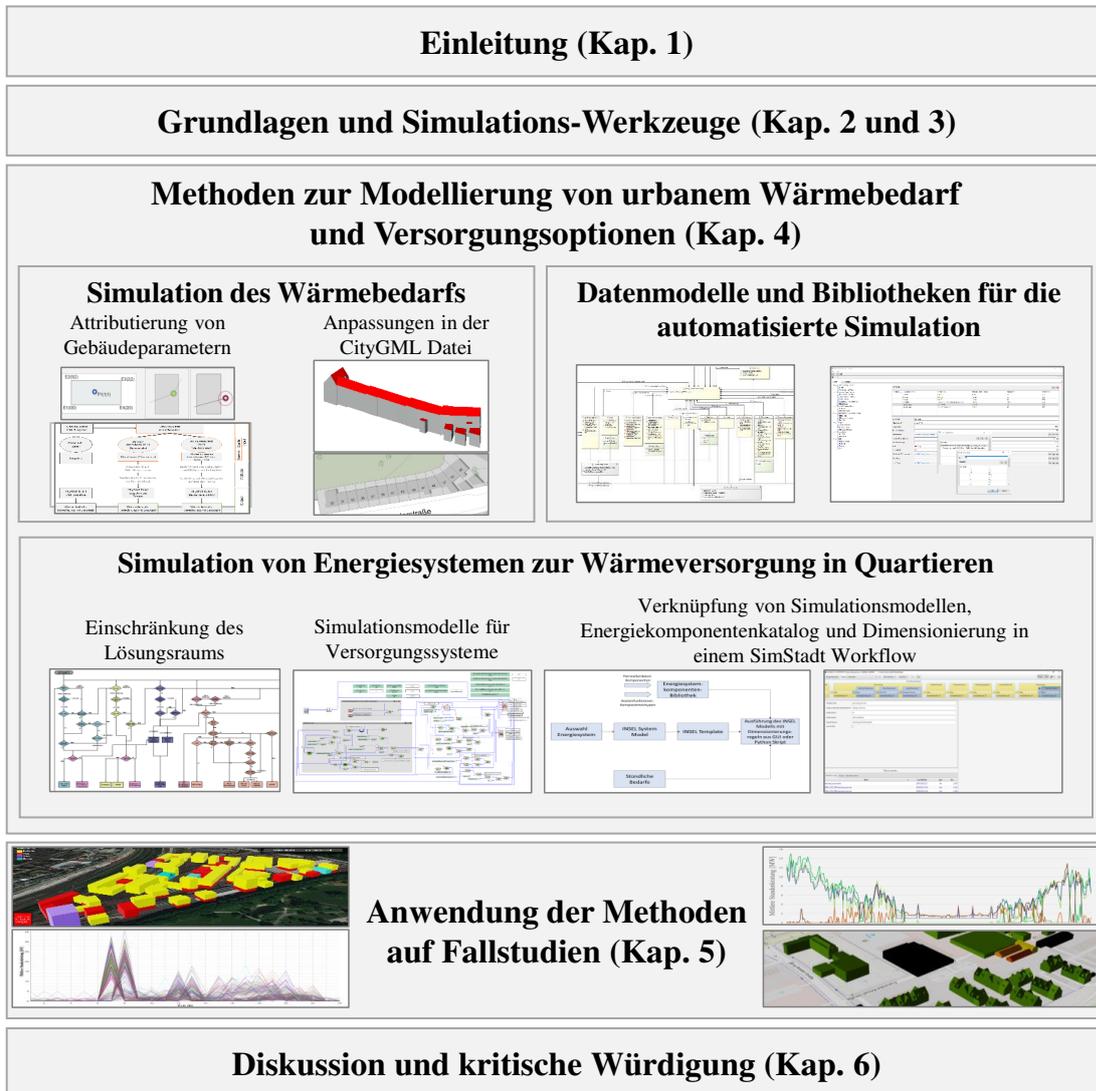


Abbildung 1.1: Schematischer Aufbau der Arbeit.

Den Anfang bilden die Einleitung mit der bestehenden Problemstellung sowie zwei Kapiteln zu den Grundlagen der Gebäudeenergiemodellierung sowie den in diesem Kontext verwendeten Simulations-Werkzeugen. In Kapitel 4 werden die in der Arbeit entwickelten Methoden beschrieben. Je ein Unterkapitel widmet sich der Simulation des Wärmebedarfs (Kapitel 4.1), der Entwicklung von Datenmodellen und Bibliotheken für die automatische Simulation (Kapitel 4.2) sowie der Erstellung und Simulation von Wärmeversorgungssystemen (Kapitel 4.3) von

Gebäuden in Quartieren. Ergebnisse der Anwendung der Methoden werden an verschiedenen Fallstudien in Kapitel 5 vorgestellt. Den Abschluss bildet Kapitel 6, in welchem die Ergebnisse diskutiert und die Methoden kritisch hinterfragt werden.

In dieser Arbeit wurde der Stand der Entwicklung bis Januar 2022 berücksichtigt.

2 Grundlagen der Gebäudeenergiemodellierung

In den letzten Jahren ist eine große Entwicklungsaktivität im Bereich der urbanen Gebäudeenergiemodellierung (englisch *Urban Building Energy Modelling (UBEM)*) zu beobachten. Zahlreiche Fachartikel beschäftigen sich mit den unterschiedlichsten Ansätzen.

Eine Suche bei ScienceDirect¹ nach Publikationen mit den Wörtern „urban“, „energy“ und „model“ in Titel, Abstract oder Keywords ergab eine Gesamtzahl von 4.048 Artikeln, von denen in den Jahren 1997 bis 2011 jährlich zwischen 8 und 99 Artikel veröffentlicht wurden. Ab 2012 ist der Trend der Anzahl der jährlich veröffentlichten Publikation stark ansteigend, er erreichte einen vorläufigen Höhepunkt mit 593 Publikationen im Jahr 2020 (siehe Abbildung 2.1).

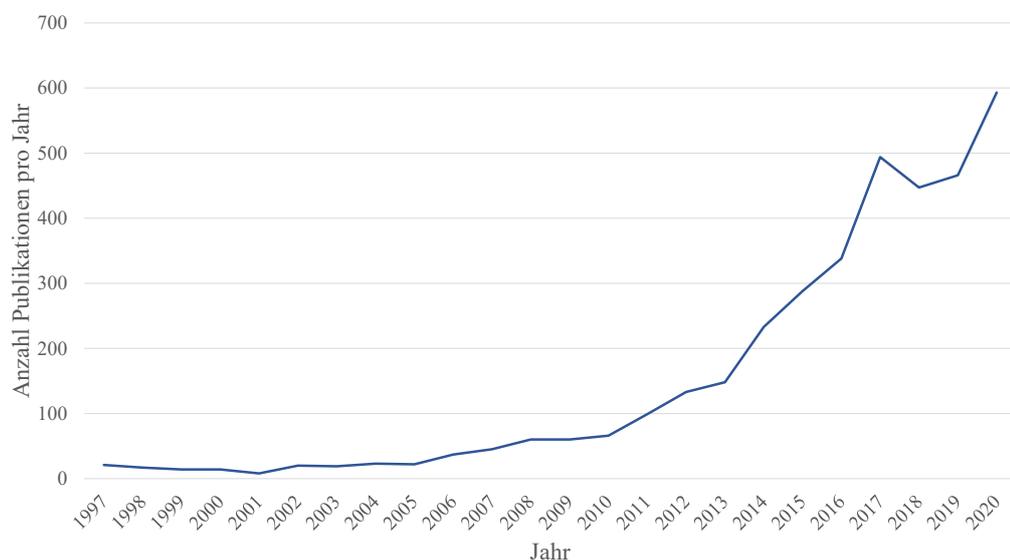


Abbildung 2.1: Anzahl der Artikel pro Jahr von 1997 bis 2020 bei ScienceDirect mit den Wörtern „urban“, „energy“ und „model“ in Titel, Abstract oder Keywords

¹ sciencedirect.com

In diesem Kapitel wird daher die urbane Gebäudeenergiemodellierung und deren Tools und Methoden genauer beschrieben. Zunächst werden die Grundlagen der Modellierung kurz erläutert, bevor anschließend verschiedene Modellierungstools und -methoden beschrieben und verglichen werden (Kapitel 2.2).

2.1 Grundlagen der Modellierung

Grundsätzlich können zwei Herangehensweisen an die urbane Gebäudeenergiemodellierung unterschieden werden: Top-down sowie bottom-up Modelle. Swan und Ugursal [146] haben bereits 2009 eine aussagekräftige Definition der beiden Ansätze veröffentlicht:

„The top-down approach treats the residential sector as an energy sink and is not concerned with individual end-uses. It utilizes historic aggregate energy values and regresses the energy consumption of the housing stock as a function of top-level variables such as macroeconomic indicators (e.g. gross domestic product, unemployment, and inflation), energy price, and general climate. The bottom-up approach extrapolates the estimated energy consumption of a representative set of individual houses to regional and national levels, and consists of two distinct methodologies: the statistical method and the engineering method.“

Darüber hinaus können die beiden Ansätze weiter unterteilt werden. Da der Fokus dieser Arbeit auf bottom-up Modellen liegt, werden in Abbildung 2.2 nur für diese Modelle zusätzliche Gliederungsebenen dargestellt. Die bottom-up Modelle unterteilen sich in statistische und physikalische Methoden (von Swan und Ugursal als „*engineering method*“ bezeichnet), wobei sich erstere weiterhin in GIS-basierte und datenbasierte Methoden unterscheiden lassen.

Im Folgenden werden die beiden Ansätze top-down und bottom-up genauer beschrieben. Dabei liegt der Fokus ebenfalls auf den bottom-up Ansätzen.

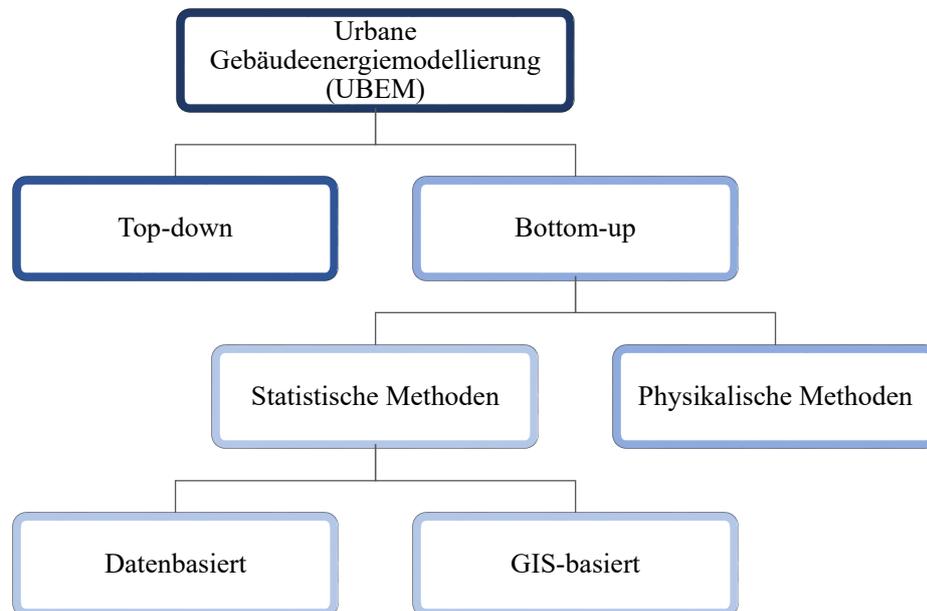


Abbildung 2.2: Methoden der urbanen Gebäudeenergiesimulation

2.1.1 Top-down Modelle

Top-down Modelle arbeiten auf einem hoch aggregierten Level; sie stellen etwa Zusammenhänge zwischen dem Energiebedarf einer Stadt und verschiedenen Parametern wie ihrer Bevölkerungsstruktur und -dichte, der Energiepreise oder dem Einkommen der Bewohner her. Top-down Modelle können so energiewirtschaftliche Zusammenhänge und Veränderungen abbilden, also z.B. den Energiebedarf für die Summe aller Gebäude einer Stadt, ohne dabei den Bedarf einzelner Gebäude zu bewerten [72]. Für Aussagen zu Einzelgebäuden muss bei top-down Modellen anschließend anhand von verschiedenen Parametern der Gesamtbedarf auf einzelne Gebäude aufgeteilt werden. Als Beispiel soll hier das Modell von Summerfield et al. [145] genannt werden, bei dem basierend auf historischen Daten der Einfluss von Klimaveränderungen und Energiepreisänderungen auf den Energiebedarf von Haushalten ermittelt wird.

2.1.2 Bottom-up Modelle

Bei bottom-up Modellen wird der Energiebedarf eines jeden Gebäudes berechnet und anschließend für das ganze Quartier bzw. die Stadt aggregiert. Hierbei gilt es die statistischen von den physikalischen Methoden zu unterscheiden.

Statistische Methoden

Statistische Methoden zur urbanen Gebäudeenergiesimulation können unter anderem auf Messdaten, Umfragen oder Daten von Energieversorgern basieren. Darüber hinaus werden Klimadaten oder sozio-ökonomische Daten benötigt, die von verschiedenen Datenbanken (z.B. Zensus, Nexiga) bereitgestellt werden können. Für die detaillierte Analyse ist eine sehr große Menge und idealerweise hohe zeitliche und räumliche Auflösung dieser Daten nötig. Sie werden mit verschiedenen Methoden wie z.B. der Regressionsanalyse, der *Conditional Demand Analysis* oder mit künstlichen neuronalen Netzen weiterverarbeitet. Bei allen drei Methoden werden verschiedene historische Daten analysiert, um z.B. Zusammenhänge zwischen energetischen Parametern und sozio-ökonomischen Faktoren oder Klimadaten herzustellen [103].

Zum Beispiel haben Braun et al. [25] sowie Fumo und Rafe Biswas [75] die Regressionsanalyse genutzt, um zukünftige Energiebedarfe in Wohn- bzw. Nichtwohngebäuden vorherzusagen. Dafür haben beide Studien Messdaten von Energieverbräuchen der Gebäude gemeinsam mit Daten zu Temperatur und Strahlung bzw. Luftfeuchte analysiert und daraus Schlüsse für die Entwicklung von zukünftigen Energiebedarfen gezogen.

Beccali et al. [16] verwenden verschiedene Varianten von künstlichen neuronalen Netzwerken, um den Strombedarf eines Quartiers vorherzusagen. Dabei verwenden sie, ähnlich wie bei den zuvor beschriebenen Anwendungen der Regressionsanalyse, Messdaten und Klimadaten. Ein Vorteil der künstlichen neuronalen Netze ist die automatische Erkennung von Fehlern in den Daten, zum Beispiel unrealistische Temperaturwerte durch Messfehler oder -ausfälle. Aydinalp et al.

[8] nutzen die Methode zur Vorhersage von Wärmeverbräuchen in Kanada mit guten Ergebnissen.

Diese statistischen Methoden erfordern eine große Menge an (Mess-)Daten, die allerdings nicht immer verfügbar oder aufgrund von Datenschutzbestimmungen nicht zugänglich sind. Wenn jedoch eine hinreichend große Fülle an verschiedenen Daten verfügbar ist, wie es häufig in angelsächsischen Ländern der Fall ist, stellen die verschiedenen Varianten der datenbasierten statistischen Analyse leistungsstarke Methoden dar. Jedoch beziehen sich die gewonnenen Ergebnisse stets auf die genutzten historischen Daten und können daher nur bedingt für Situationen und Szenarien genutzt werden, die nicht innerhalb dieser verwendeten Daten vorkommen.

Darüber hinaus gibt es inzwischen viele Geoinformationssystem (GIS)-basierte Methoden, bei denen mithilfe von 2D Karten und entsprechenden Kennzahlen Energiebedarfe von Gebäuden berechnet werden können. Hier sollen beispielhaft zwei plug-ins für das kostenlose Programm Quantum GIS (QGIS) vorgestellt werden. Das Softwarewerkzeug *GemEB* [169] des Lehrstuhls für Bauklimatik und Haustechnik der TU München berechnet, basierend auf dem vereinfachten Heizperiodenverfahren der DIN V 4108-6 [52], einen Jahreswärmebedarf jedes Gebäudes einer 2D Karte. Daten zu U-Werten kommen, abhängig von der Baualtersklasse, aus der Deutschen Wohngebäudetypologie des Institut Wohnen und Umwelt (IWU). Eingebunden wird es über die Python-Schnittstelle von QGIS. Das Tool *Open eQuarter*, entwickelt an der Universität der Künste Berlin [119, 151], setzt sich aus verschiedenen Modulen zusammen. *MOLE* ist das eigentliche GIS plug-in zur Datenakquise aus den 2D Karten. Darüber hinaus werden die Daten mit *FOX* in einer Geodatenbank verwaltet, zusätzlich gibt es mit *CROW* einen Client, um die Daten entsprechend abzurufen.

Physikalische Methoden

Bei der physikalischen bottom-up Methode werden Gebäude aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften und der Wechselwirkungen mit der Umwelt, z.B.

durch solare Einstrahlung, bewertet. Für die physikalische Simulation werden verschiedene Datensätze benötigt [126]:

- Wetter- bzw. Klimadaten (z.B. Typical Meteorological Year (TMY) oder Messdaten eines konkreten Jahres),
- Gebäudegeometrie-Daten (2D, 2,5D oder 3D),
- Gebäudespezifische Daten (z.B. Bauteilaufbau, Heizungssystem, Baujahr),
- Nutzungsspezifische Daten (z.B. Art der Nutzung, Anwesenheitsprofile).

Zunächst werden die Wetter- bzw. Klimadatensätze benötigt. Für viele Messstationen weltweit sind historische Messdaten, u.a. mit Werten zu Temperatur und Strahlung, als Langzeit-Mittelwerte in einem standardisierten Datenformat, dem typischen meteorologischen Jahr (TMY2 oder TMY3) [13] vorliegend [45]. Darüber hinaus können je nach Anwendungsfall, z.B. Klimaprognosen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) hinzugefügt [85] oder Messdaten eines konkreten Jahres zur Simulation genutzt werden.

Die Informationen zur Geometrie der Gebäude können aus verschiedenen Quellen stammen. 2D Daten zur Gebäudegrundfläche sind mittlerweile für viele Teile der Welt kostenlos verfügbar, z.B. über die Online Plattform Geofabrik². Werden diese mit Light detection and ranging (Lidar) Daten oder mittleren Gebäudehöhen kombiniert, können sogenannte 2,5D Modelle erstellt werden, bei denen die Grundfläche mit der mittleren Gebäudehöhe multipliziert wird [9]. Komplette 3D Modelle in verschiedenen Detaillierungsgraden bietet z.B. das CityGML Format, welches detailliert in Kapitel 3.3 beschrieben wird.

Da bei der urbanen Gebäudeenergiesimulation detaillierte Informationen über Bauteile, Heizsysteme oder Nutzerverhalten i.d.R. nicht für jedes Gebäude individuell verfügbar sind, werden Archetypen definiert, die in den verschiedensten Detaillierungsgraden vorliegen können. Die Erstellung solcher Archetypen erfordert zunächst die Analyse des Gebäudebestands sowie dessen Unterscheidung und Einteilung in Gruppen abhängig z.B. von Gebäudetyp, Alter, Nutzung und

² <https://download.geofabrik.de/>

Energiesystem [126]. Anschließend werden jeder Gruppe Eigenschaften zugewiesen, die dann den darauf basierenden Archetyp definieren. Das TABULA Projekt [104] hat für 20 europäische Länder Gebäudetypologien basierend auf Baujahr und Gebäudetyp erstellt, bei denen den Gebäuden U-Werte für Bauteile sowie Energiesysteme zugewiesen werden können. Ähnliche Methoden wurden auch für die Analyse einzelner Städte angewandt, wie bei Mastrucci et al. [108] für Rotterdam oder bei Shimoda et al. [138] für die japanische Stadt Osaka.

2.2 Einordnung und Vergleich der Modellierungstools

Die Nutzung von energetischen Modellierungstools³ zur Bestimmung von Bedarf und Versorgung ist eine etablierte Methode. Dabei kann der Fokus der jeweiligen Modelle zum Beispiel auf der Energiebedarfsermittlung von Gebäuden liegen, auf der Systemsimulation von Wärme- oder Stromerzeugungssystemen, auf Wärme- oder Stromverteilsystemen oder aber auf einer Kombination aus diesen Bereichen. Die räumlichen und zeitlichen Rahmenbedingungen der Modelle können dabei stark variieren. So gibt es zum Beispiel sekundlich aufgelöste Simulationen oder aber Bilanzierungen über ein gesamtes Jahr. Darüber hinaus werden in manchen Tools Gebäude einzeln betrachtet, in anderen dagegen für das gesamte Untersuchungsgebiet, wie z.B. eine Stadt oder ein Land, aggregierte Ergebnisse berechnet.

Es gibt eine ganze Reihe von Modellen und Methoden, um detaillierte Aussagen über den Energiebedarf und die -versorgung von einzelnen Gebäuden zu erstellen, mit denen sehr genaue Ergebnisse erzielt werden können. Allen ist gemein, dass bei ihrer Nutzung viele detaillierte Informationen zum Anwendungsfall sowie ein hohes Maß an Kenntnis über die Methode selbst erforderlich sind und ein aufwändiger, manueller Prozess zur Modellerstellung nötig ist. Im Folgenden werden zwei gängige Tools zur detaillierten thermisch-energetischen Gebäudesimulation für Einzelgebäude, *TRNSYS* und *EnergyPlus*, genauer beschrieben.

³ Im Folgenden wird vorwiegend die Bezeichnung Tool(s) genutzt. Gemeint sind hierbei immer sowohl Tools als auch Methoden, die ohne ein zugehöriges User Interface funktionieren.

TRNSYS [148] (*TRaNsient SYstem Simulation*, deutsch: instationäre Systemsimulation) ist ein seit den 1970er Jahren an der Universität von Wisconsin-Madison entwickeltes Simulationstool. Lag der Fokus des Tools ursprünglich vor allem auf solaren Warmwassersystemen, können damit inzwischen viele weitere thermische und elektrische Systeme modelliert werden, zum Beispiel Blockheizkraftwerke oder Brennstoffzellen [57]. Darüber hinaus können mit dem integrierten Modul *TRNBuild* auch Gebäude in großer Detailtiefe abgebildet werden. Verschiedene mitgelieferte Bibliotheken beinhalten Komponenten für thermische und elektrische Energieversorgungssysteme sowie Wetterdaten. Durch den modularen Aufbau des Tools können Nutzer eigene Komponenten, Systeme und Modelle integrieren. Für die Nutzung von *TRNSYS* benötigt man eine kostenpflichtige Lizenz.

Daneben gibt es mit *EnergyPlus* [46, 111] ein open-source Programm, welches vom US Department of Energy (DOE) entwickelt und finanziert wird. Es beinhaltet ähnliche Funktionen wie *TRNSYS*, bietet dabei aber weniger individuelle Anpassungsmöglichkeiten. Mit *EnergyPlus* können ebenfalls Energiebedarfe und Energieversorgung in Gebäuden detailliert simuliert werden.

Darüber hinaus gibt es Programme, die zur Erstellung von Energieausweisen ebenfalls einzelne Gebäude detailliert abbilden und so zum Beispiel die EnEV-Konformität von Neubauten und Bestandssanierungen nachweisen [99]. Dies kann z.B. auf Basis der deutschen Norm DIN V 4108-6 [52] in Kombination mit der DIN V 18599 [55] geschehen.

Die Nutzung dieser Tools für die energetische Simulation von Stadtquartieren oder Städten, bestehend aus mehreren hundert bis tausend Gebäuden, ist aufgrund des hohen Detaillierungsgrades der Gebäudesimulation nicht ohne Weiteres möglich.

Um eine energetische Gebäudesimulation für ganze Stadtquartiere oder Städte durchführen zu können, müssen verschiedene Vereinfachungen angewandt werden, da nicht alle gebäude-spezifischen Merkmale für eine so große Anzahl Gebäude individuell gesammelt werden können [40]. Diese können sich auf die Geometrie der Gebäude oder die Berücksichtigung von Wetter-, Nutzer- und gebäude-spezifischen Daten beziehen.

Neben den Modellen, die sich auf die verschiedenen Energieflüsse in Einzelgebäuden konzentrieren gibt es auch solche, die sich ausschließlich auf die Systemseite fokussieren und den Energiebedarf entweder aus anderen Modellen beziehen oder dieser anderweitig exogen vorgegeben werden muss. Diese Modelle sind entweder auf einzelne Systeme (z.B. Solarthermieanlagen mit T^*SOL [153]) oder Netze (z.B. Nahwärmenetzberechnung mit *NetSim* [156] oder *NEPLAN* [112]) spezialisiert oder sie führen eine Multi-System-Simulation [107] aus. Beispiel hierfür ist etwa das von der Universität Aalborg in Dänemark entwickelte *EnergyPLAN* [48]. Methoden und Modelle hierzu finden sich außerdem unter anderem bei Keirstead et al. [89].

Schließlich gibt es Modelle, welche die beiden bereits beschriebenen Ansätze zu Energiebedarfsberechnung von Gebäuden und Energiesystemsimulationen für die Quartiers- oder Stadtebene kombinieren und dabei jeweils unterschiedliche Schwerpunkte setzen.

In den letzten Jahren wurden viele verschiedene, zum Teil aber auch ähnliche Tools und Methoden zur urbanen Gebäudeenergiemodellierung entwickelt. In der folgenden Tabelle 2.1 werden 25 Tools anhand von verschiedenen Dimensionen beschrieben. Nach Angabe von Name und Entwickler (i.d.R. Universität oder Institut) wird zunächst das Land bzw. die Länder genannt, für die das Tool angewandt werden kann. Wenn es keine Beschränkung gibt, steht in der Tabelle *Global*. In der nächsten Spalte wird die dahinter stehende Methode angegeben, die Zuordnung folgt dabei der Einteilung aus Abbildung 2.2. Anschließend werden die zeitliche und räumliche Auflösung der Ergebnisse aufgezeigt. In den nächsten Spalten ist der Umfang des Tools zu sehen; hier wird angegeben, welchen der Bereiche *Bedarf*, *Versorgung*, *Erneuerbare Energien (EE)-Potenzial*, *Kosten* und *Lebenszyklusanalyse* das Tool abdeckt. Zum Teil gibt es in den beschriebenen Tools auch Schnittstellen zu anderen (Simulations-) Tools, dies wird an den entsprechenden Stellen der Tabelle 2.1 kenntlich gemacht. In der letzten Spalte wird eine Quelle angegeben, die das Tool beschreibt. Bei mehreren relevanten Veröffentlichungen wurde die Publikation gewählt, die das Tool am ausführlichsten beschreibt.

Tabelle 2.1: Vergleich verschiedener Tools und Methoden zur urbanen Gebäudeenergiemodellierung

Name	Land ¹	M ²	Auflösung ³			Umfang ⁴				Quelle & Jahr ⁵	
			Z	R	B	V	P	K	LCA		
Best et al. (Stanford)	USA	h	std	2D	EnergyPlus				-	-	Best et al. 2015 [20]
CEA (ETH Zürich)	CH, SGP	h	std	2D	x	x	x	x	-	Fonseca et al. 2016 [66]	
CityBES (Lawrence Berkeley National Laboratory)	USA	p	std	3D	EnergyPlus				-	-	Chen et al. 2017 [41]
CitySim (EPFL Lausanne)	Global	p	std	3D	x	x	-	-	-	Robinson et al. 2009 [130]	
District ECA (Fraunhofer IBP)	DEU	s	m	2D	x	x	-	-	-	Jank 2014 [84]	
EN-easy (Uni Stgt)	DEU	s	m	2D	x	-	-	x	-	Blesl et al. [23]	
EnerGIS (EPFL Lausanne)	CH	s	j	2D	x	x	x	x	-	Girardin et al. 2010 [77]	
GemEB (TU MUC)	DEU	GIS	j	2D	x	-	-	x	-	Zadow 2012 [169]	
GEMIS (IINAS)	Global	s	j	2D	-	-	-	x	x	Rausch et al. 1993 [125]	
Kommod (Fraunhofer ISE)	DEU	O	min	2D	x	x	x	x	-	Eggers 2017 [59]	

Name	Land ¹	M ²	Auflösung ³					Umfang ⁴			Quelle & Jahr ⁵
			Z	R	B	V	P	K	LCA		
Nageler et al. (Uni Graz)	AT	s	std	2D		IDA ICE			-	-	Nageler et al. 2017 [110]
Open eQuarter (UdK Berlin)	DEU	GIS	j	2D	x	-	-	-	-	-	Nytsch-Geusen et al. 2015 [119]
OpenIDEAS (KU Leuven)	Global	p	std	2D	x	-	-	-	-	-	Jorissen et al. 2018 [87]
PHPP (Passivhaus Institut)	Global	p	j	2D	x	x	x	-	-	-	Passivhaus Institut [120]
Q-SWOP (RWTH Aachen)	DEU	s	j	2D	x	x	-	x	-	-	Körper und Vasconcelos 2018 [95]
RE ³ ASON (KIT)	DEU	O	std	2D	x	x	x	x	-	-	Mainzer 2018 [106]
SimStock (UCL London)	UK	s	std	2D	EnergyPlus			-	-	-	Coffey et al. 2015 [43]
Solene (ES Nantes)	Global	p	std	3D	x	-	-	-	-	-	Morille et al. 2015 [109]
SynCity (Imperial College London)	Global	O	j	2D	x	x	-	x	-	-	Keirstead et al. 2009 [90]
TEASER (RWTH Aachen)	DEU	p	std	3D	x	-	-	-	-	-	Remmen et al. 2018 [128]
Umi (MIT)	Global	p	std	3D	EnergyPlus			-	x	-	Reinhart et al. [127]

Name	Land ¹	M ²	Auflösung ³			Umfang ⁴				Quelle & Jahr ⁵
			Z	R	B	V	P	K	LCA	
URBANopt (NREL)	Global	O	std	2D		EnergyPlus		-	-	Polly et al. 2016 [122]
URB ^{io} (EPFL Lausanne)	CHE	O	std	2D	x	x	-	x	-	Cajot et al. 2017 [39]
SimStadt (HFT Stuttgart)	DEU ⁶	p	m	3D	x	(x)	x	-	(x)	Nouvel et al. 2015 [116]
SimStadtSystem	DEU ⁶	p	std	3D	x	x	x	x	(x)	vorliegende Arbeit 2022

¹ Land: CH = Schweiz, DEU = Deutschland, SGP = Singapur, AT = Österreich, UK = Vereinigtes Königreich

² Methode: s = statistisch, p = physikalisch, h = hybrid, GIS = GIS-plugin, O = Optimierung

³ Auflösung: z = zeitlich: min = minütlich, std = stündlich, m = monatlich, j = jährlich; r = räumlich: 2D = zweidimensional, 3D = dreidimensional

⁴ B = Bedarf, V = Versorgung, P = Potenzial, K = Kosten, LCA = Lebenszyklusanalyse

⁵ Bei mehreren relevanten Veröffentlichungen wurde die Publikation gewählt, die das Tool bzw. die Methode am besten beschreibt.

⁶ Das Tool ist in der Standardkonfiguration nur für das angegebene Land nutzbar, kann aber individuell angepasst werden für die globale Nutzung.

3 Kontext und verwendete Simulations-Werkzeuge

Im vorangegangenen Kapitel wurden einige Tools und Methoden zur urbanen Gebäudeenergiemodellierung vorgestellt und eingeordnet. Manche dieser Tools beinhalten die Berechnung von Energiesystemen für Gebäude. Im folgenden Kapitel 3.1 werden daher verschiedene Studien vorgestellt, die die Zusammensetzung der zukünftigen Wärmeversorgung in Deutschland in 2030 bzw. 2050 diskutieren.

Ebenfalls im vorangegangenen Kapitel wurde angeführt, dass viele der Tools entweder auf Einzelgebäude fokussiert sind oder Ergebnisse top-down auf einer hoch-aggregierten, z.B. nationalen, Ebene bereitstellen. Die Zwischenebene des Quartiers oder Stadtviertels wird von vielen Tools nicht adressiert. In Kapitel 3.2 wird daher die Bedeutung des Betrachtungshorizonts Quartier im Rahmen dieser Arbeit beleuchtet.

Darauf aufbauend wird in den nachfolgenden Kapiteln 3.3 bis 3.5 die Nutzung von 3D Gebäudemodellierung im CityGML Format im Allgemeinen sowie der Tools SimStadt und DHWcalc im Speziellen begründet und der Stand dieser Tools vor Beginn der vorliegenden Arbeit detailliert beschrieben.

3.1 Wärmeversorgungsszenarien für Deutschland in 2030 und 2050

In den letzten Jahren wurden viele Studien durchgeführt und publiziert, die die mögliche oder geforderte Energieversorgung in Deutschland in der Zukunft darstellen. Dabei beziehen sich die meisten Studien auf einen Zeithorizont bis 2050, teilweise mit Zwischenzielen für 2020 und 2030. In der Regel werden Trendszenarien mit Zielszenarien verglichen. Im Folgenden werden exemplarisch vier Studien

und deren Betrachtungen zur zukünftigen Wärmeversorgung in Deutschland vorgestellt.

Bei der Studie des Fraunhofer ISE „Energiesystem Deutschland 2050“ [69] von Ende 2013 ist das Ziel die Ermittlung des Gesamtenergiesystems mit den geringsten Gesamtkosten, welches zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen um 80 % bis 2050 führt. Tabelle 3.1 zeigt einen Überblick über die Zusammensetzung der Wärmebereitstellung dieses Zielsystems im Jahr 2050.

Tabelle 3.1: Zusammensetzung der Wärmebereitstellung im auf Gesamtkosten optimierten System in 2050 [69]

	TWh	%		TWh	%
Solarthermie	87,2	20,1	Solarthermie, dezentral	36,1	8,3
			Solarthermie, zentral	26,2	6,0
			Solarthermie, Prozesse	25,0	5,7
Kraft-Wärme-Kopplung	72,5	16,7	BHKW, dezentral	22,6	5,2
			KWK, groß	27,1	6,2
			KWK, mittel	22,8	5,2
Wärmepumpen	171,1	39,4	Wärmepumpen, Netze	43,2	9,9
			Wärmepumpen, Luft	42,9	9,9
			Wärmepumpen, Sole	51,1	11,8
			Gas-Wärmepumpen	33,9	7,8
Heizstäbe	27,3	6,3	Heizstäbe	27,3	6,3
Heizkessel	70,5	16,2	Heizkessel	70,5	16,2
Geothermie	6,3	1,4	Tiefengeothermie	6,3	1,4

Wenn der Umbau der Energieversorgung auf diese Weise vollzogen wird, wären die jährlichen volkswirtschaftlichen Gesamtkosten in der gleichen Größenordnung wie heutzutage. Wenn zusätzlich noch steigende Preise für fossile Energieträger angenommen werden, wäre die geforderte Energieversorgung sogar günstiger als das heutige System. Dabei zeigt sich eine starke Priorisierung von Wärmepumpen und Solarthermie. Der Ausbau der Wärmenetze wird nur moderat gefordert, sie sollen jedoch möglichst erneuerbar und über Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)-

Anlagen versorgt sowie mit großen Wärmespeichern gekoppelt werden. Heizstäbe sollen überschüssigen erneuerbaren Strom nutzen. Darüber hinaus wird eine energetische Gebäudesanierung angestrebt, so dass der Raumwärmebedarf um 40 % reduziert ist.

Eine Studie der Fraunhofer Institute IWES und IBP in Zusammenarbeit mit dem Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU) und der Stiftung Umweltenergierecht aus dem Jahr 2015 („Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr“) sieht ebenfalls Wärmepumpen als Schlüsseltechnologie im Gebäudewärmebereich [71]. Darüber hinaus soll der Anteil der durch Fern- und Nahwärme versorgten Gebäude vor allem in Städten und bei hoher Wärmedichte steigen. Zur Erhöhung der Flexibilität sollen Power-to-Heat Anlagen verstärkt vor allem in Wärmenetze integriert werden sowie eine Temperaturabsenkung der Netze stattfinden, um Solarthermie und Großwärmepumpen einsetzen zu können. Die genannten Technologien sollen ergänzt werden durch Biomasse-Kessel in ineffizienten Bestandsgebäuden sowie bei geringer Siedlungs- bzw. Wärmedichte. Die Roadmap zur Zielerreichung wird in Abbildung 3.1 dargestellt.

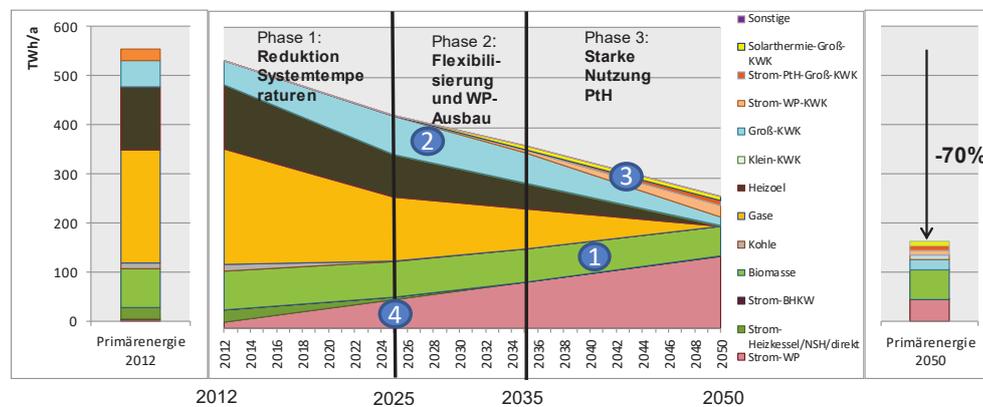


Abbildung 3.1: Roadmap Wärmebedarf und -versorgung Haushalte [71]

Zusätzlich zu dieser Transformation der Wärmeerzeugung ist die energetische Gebäudesanierung sowie eine Flexibilisierung des Bedarfs mittels Wärmespeichern ein zentraler Bestandteil. Die Studie beschäftigt sich darüber hinaus mit dem Industrie- und Verkehrssektor und gibt Empfehlungen zu Förderungen und gesetzlichen Rahmenbedingungen, die zum Erreichen der vorgestellten Ziele beitragen können.

Die Studie der Fraunhofer Institute IWES und IBP aus dem Jahr 2017 mit dem Titel „Wärmewende 2030“ beschäftigt sich explizit mit der Wärmeversorgung von Gebäuden [70]. Die Autoren der Studie beschreiben, dass aufgrund der Trägheit des Systems und der Annahme, dass Heizsysteme nicht vor Ende ihrer technischen Lebensdauer ausgetauscht werden, ambitionierte Mindestziele bereits für das Jahr 2030 gesetzt werden müssen. Die Annahme zur Kesselnutzungsdauer beträgt in der Studie 25 Jahre. Nur so können ihrer Meinung nach die Ziele für 2050 überhaupt erreicht werden. Dabei setzen sie auf den Ölausstieg, eine Wärmeversorgung von Gebäuden mittels dezentralen Wärmepumpen sowie Wärmenetzen gespeist von KWK-Anlagen, Solarthermie, industrieller Abwärme und Großwärmepumpen. Der Strom zum Betrieb der Wärmepumpen soll aus erneuerbaren Quellen stammen. Abbildung 3.2 zeigt die Entwicklung des Absatzes sowie den jeweils jährlichen Bestand an Wärmeerzeugern in Neubau und Bestand, der für eine Erreichung des Ziels der Reduktion der Treibhausgasemissionen um 83 % gefordert wird. Darüber hinaus fordern sie die Reduktion des Wärmebedarfs in Gebäuden um ein Viertel und eine damit verbundene Steigerung der Sanierungsrate auf jährlich 2 % bei großer Sanierungstiefe.

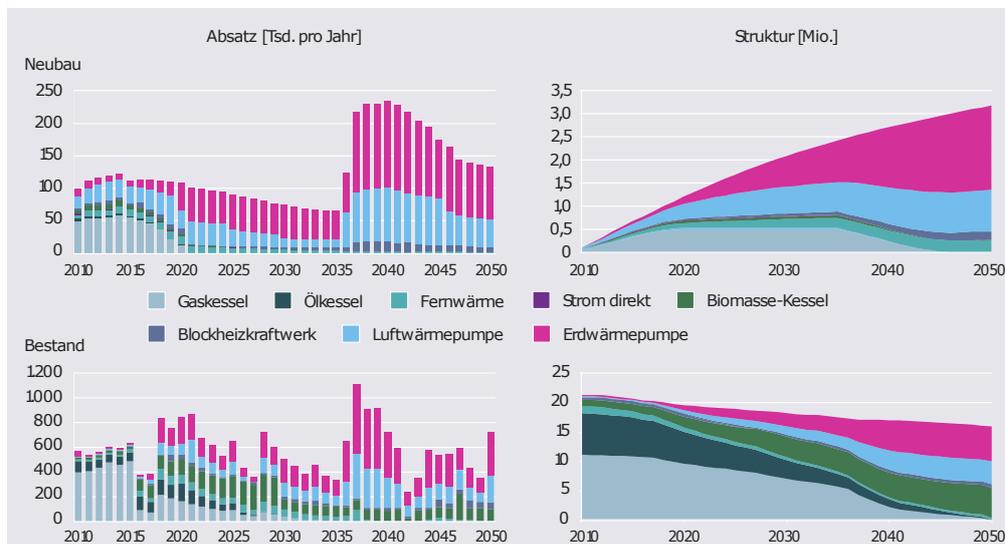


Abbildung 3.2: Entwicklung Absatzmarkt und Gesamtstruktur der Wärmeerzeuger für Neubau (oben) und Bestandsgebäude (unten) im Szenario zur Reduktion der Treibhausgasemissionen um 83 % [70]

Alle Studien gehen von einem hohen Anteil an Wärmepumpen zur Erreichung der Ziele zur Emissionsreduktion aus. Daher wird im Folgenden die Branchenstudie 2018 des Bundesverband Wärmepumpe e.V. [36] beschrieben. Hier gibt es zwei Szenarien: das erste Szenario schreibt die aktuellen Marktentwicklungen fort, das zweite Szenario beschreibt dagegen die Entwicklung des Absatzes, wenn verschiedene geforderte Maßnahmen wie Änderungen bei der Förderung erneuerbarer Wärmeerzeuger sowie eine Erhöhung der Sanierungsrate von Bestandsgebäuden umgesetzt werden. Das Ergebnis des ersten Szenarios ist ein Marktanteil von 25 % im Jahr 2050. Dieser Anteil liegt deutlich unter dem, was von den zuvor beschriebenen Studien gefordert wird, um die Klimaziele 2050 zu erreichen. In den hier vorgestellten Studien liegt der Wärmepumpenanteil 2050 bei 40 % bei „Energiesystem Deutschland 2050“, 61 % in der Studie „Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr“ sowie 68 % bei „Wärmewende 2030“. Das zweite Szenario prognostiziert einen Anteil von 47 % im Jahr 2050, was fast einer Verdopplung im Vergleich zum ersten Szenario entspricht. Der Anstieg in diesem Szenario ist hauptsächlich auf eine deutliche Steigerung der Sanierungsrate von Gebäuden zurückzuführen, welche zu einem vermehrten Einbau von Wärmepumpen in Bestandsgebäude führt.

3.2 Betrachtungshorizont Quartier

Der Begriff des Quartiers ist in der Literatur nicht klar definiert und kann verschiedene Arten und Größen von Gebäudeansammlungen meinen. Daher kann eine Vielzahl von Verfahren zur Festlegung bzw. Abgrenzung eines Quartiers herangezogen werden. Bebauungsstrukturen und gemeinsame architektonische bzw. historische und baugeschichtliche Merkmale und Gebäudenutzungen sind eine Methode zur Abgrenzung eines Quartiers. Auf diese Weise definiert das UrbanReNet Projekt der TU Darmstadt [149] mehrere Energetische Stadtraumtypen (EST), die in Abbildung 3.3 dargestellt sind. Die Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGNB) definiert Quartiere nach Nutzungen und unterscheidet dabei zwischen Stadt-, Business-, Gewerbe-, Industrie- und Eventquartieren sowie Resorts und Vertical Cities [50]. Darüber hinaus können auch Verwaltungsgrenzen oder

geografische Merkmale, wie z.B. die Begrenzung durch einen Fluss oder große Parkanlagen, eine Methode zur Festlegung eines Quartiers sein.

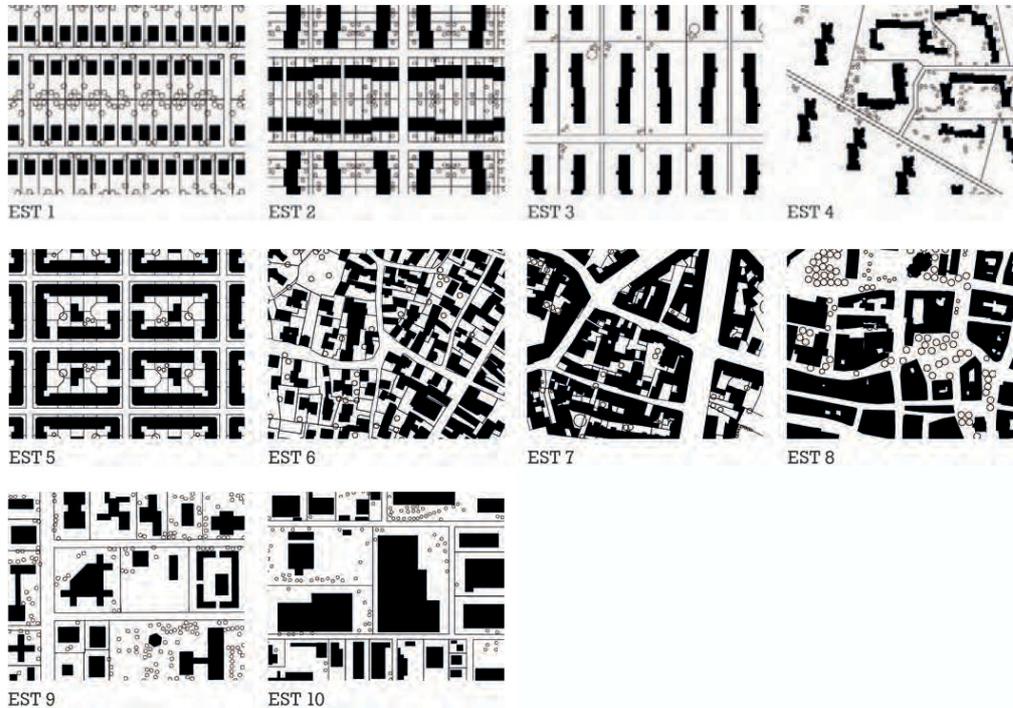


Abbildung 3.3: Energetische Stadtraumtypen (EST) nach [149]

Oft werden Quartiere auch anhand von individuellen Anforderungen, wie z.B. der Festlegung als Sanierungsgebiet oder durch Eigentümerverhältnisse definiert. Auch bei der Vergabe eines Zuschusses durch die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) im KfW 432 Programm für die Energetische Stadtsanierung [98] wird der Quartiersbegriff genannt, aber nicht explizit definiert. Daher kann man hier davon ausgehen, dass das Quartier selbst, z.B. anhand der oben beschriebenen Merkmale, zu definieren ist.

Im Zuge dieser Arbeit ist mit dem Begriff Quartier ein zuvor festzulegender Betrachtungsrahmen gemeint, der von etwa zehn bis hin zu mehreren hundert Gebäuden reichen kann. Diese Größe ist dabei gut geeignet, um strategische Entscheidungen und Maßnahmen zu identifizieren und umzusetzen.

Ein Quartier als Betrachtungshorizont und Bilanzgrenze für die energetische Betrachtung bringt mehrere Vorteile. Zum einen können Synergien und Wechselwirkungen, Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Gebäuden identifiziert und abgebildet werden. Bei der alleinigen Betrachtung von Einzelgebäuden ohne Bezugnahme auf Gebäude und Strukturen in der Nachbarschaft können eventuelle Potenziale übersehen werden. So können etwa Energieversorgungsszenarien nur vollumfänglich analysiert und bewertet werden, wenn ein Gebäudeensemble mit einer ausreichenden Zahl an Gebäuden betrachtet wird. In der Regel kann erst dann eine Entscheidung zwischen zentralen und dezentralen Versorgungsmöglichkeiten getroffen werden. Zum anderen kann nur eine quartiersbezogene Betrachtung Potenziale wie etwa das Vorhandensein von industrieller Abwärme in der Nachbarschaft oder Wärmequellen wie Abwasserkanäle oder große Freiflächen für oberflächennahe Geothermie oder Photovoltaik in der Analyse berücksichtigen.

Trotzdem ist die Analyse und Simulation jedes einzelnen Gebäudes äußerst wichtig. Nur so können die räumlichen Zusammenhänge und Synergien von Energiebedarf und -versorgung in einem Quartier erkannt und bewertet werden.

3.3 3D Gebäudemodellierung im CityGML Format

Viele der zuvor in Kapitel 2 beschriebenen Simulationstools verwenden zur Repräsentation der Gebäude CityGML Modelle, unter anderem CityBES, CitySim, umi, TEASER und SimStadt. Das CityGML Format wurde zunächst nicht zur Nutzung als Input in Simulationsprogramme entwickelt. Zu Beginn wurden nur für spezielle Anwendungen einzelne Modelle erstellt, nach und nach wurde jedoch die Notwendigkeit einer einheitlichen Definition deutlich.

CityGML ist ein Datenmodell basierend auf dem XML Format für den Austausch von virtuellen 3D Stadtmodellen. Es ist eine Anwendung der Geography Markup Language (GML) und wird vom Open Geospatial Consortium (OGC) definiert und gepflegt. Es beinhaltet Vorgaben für Struktur und Definition von Attributen, Einheiten und Beziehungen, die eine einheitliche Handhabung der Modelle ermöglichen.

Das CityGML-Format kann bestehende Strukturen wie Gebäude, Straßen oder Vegetation darstellen. Gebäudemodelle können in fünf verschiedenen Detailstufen (Level of Detail (LOD)) verfügbar sein (siehe auch Abbildung 3.4):

- LOD0 mit nur einer planaren Form des Gebäudegrundrisses,
- LOD1, bei dem das Gebäude als Quader mit einer durchschnittlichen Gebäudehöhe und einem Flachdach dargestellt wird,
- LOD2 mit detaillierten Informationen über Gebäudehöhen und Dachform,
- LOD3 beinhaltet darüber hinaus Fenster und weitere Informationen zur Dachform wie z.B. Gauben,
- LOD4 kann zusätzlich eine detaillierte Innenarchitektur darstellen.



Abbildung 3.4: Verschiedene *Levels of Detail* des CityGML Formats [21]

Die Anwendung von CityGML Modellen reicht heute von der reinen Visualisierung der Gebäude über die Nutzung in Simulationen in den Bereichen Energie, Verkehr, Lärm oder Hochwasser bis zur Verknüpfung mit Sensordaten und der Erstellung von digitalen Zwillingen. In Deutschland und vielen weiteren Ländern weltweit (u.a. China, Indien, Kanada, USA sowie die meisten europäischen Länder) wird CityGML genutzt. Inzwischen werden CityGML Daten zunehmend durch einzelne Städte oder Regionen als Open Data bereitgestellt.

CityGML Modelle können mithilfe von verschiedenen Techniken und Methoden erstellt werden, die häufigste dabei ist die mit optischer Abstandsmessung mit Lidar [157]. Dabei werden bei Überfliegungen des Untersuchungsgebietes mit Drohnen oder Kleinflugzeugen Laserstrahlen emittiert. Die Reflektionen dieser Strahlen werden gemessen und daraus anschließend z.B. die Geometrie der Gebäude errechnet. Biljecki et al. [22] sowie Vosselman und Dijkman [157] beschreiben

Methoden, bei denen mittels 2D Plänen und zusätzlichen Informationen wie der Gebäudehöhe ein 3D Modell erstellt werden kann. Darüber hinaus gibt es auch die Möglichkeit, CityGML Modelle aus eigenen Zeichnungen z.B. in Google SketchUp über das kostenlose plug-in GEORES¹ zu exportieren. Diese Methode ist wegen des relativ hohen manuellen Aufwandes nur bei kleinen Untersuchungsgebieten, wie z.B. Einzelgebäuden oder wenigen Gebäuden mit einfacher Geometrie, zu empfehlen.

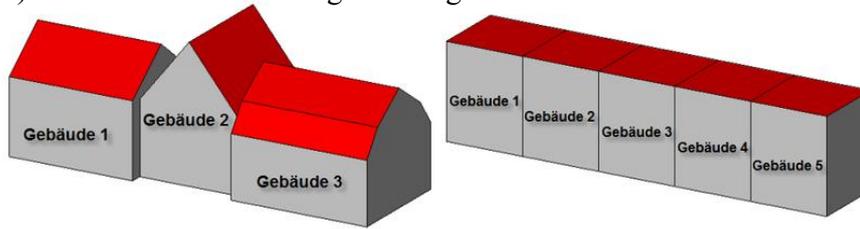
Im CityGML Format gibt es verschiedene Methoden, Gebäude zu modellieren, die aus mehreren Baukörpern bzw. Gebäudeteilen bestehen. Dabei muss jedes Gebäudeteil (*buildingPart*) eindeutig zu einem Gebäude (*building*) zugeordnet sein und mit diesem auch direkt über eine oder mehrere gemeinsame Flächen verbunden sein. Abbildung 3.5 zeigt zwei Möglichkeiten, wie Gebäude in CityGML modelliert werden können. Dabei ist die Aufteilung in Gebäude und Gebäudeteil auch sinnvollerweise davon abhängig, wie diese im Kataster definiert sind. Wenn es sich um eigenständige Gebäude handelt, z.B. um Reihenhäuser, sollten sie auch je als ein separates Gebäude modelliert sein. Wenn es sich hingegen um ein zusammengefasstes Gebäude handelt, können dessen Gebäudeteile innerhalb des Gebäudes getrennt definiert werden. Attribute wie z.B. das Baujahr des Gebäudes stehen auch für die Gebäudeteile zur Verfügung, es sei denn, es werden abweichende Attribute definiert.

Es gibt in der Spezifikation der aktuellen CityGML Version 3 nur ein verpflichtendes Attribut, die *gml:id*. Empfohlen werden allerdings weitere Attribute, unter anderem *gml:name*, *bldg:function*, *bldg:yearOfConstruction*, *bldg:roofType* und *bldg:measuredHeight*. Darüber hinaus gibt es weitere vordefinierte Attribute sowie die Möglichkeit, selbst generische Attribute zu definieren. Zusätzlich muss im Modell das Referenzkoordinatensystem dreidimensional angegeben werden. Weitere Details finden sich im Handbuch für die Modellierung von 3D Objekten der Special Interest Group 3D (SIG3D) [139, 140].

Eine Besonderheit des CityGML Standards ist die Möglichkeit der Erweiterung der Modelle mit einer Application Domain Extension (ADE). Dabei ist für diese Arbeit vor allem die EnergyADE [17, 115, 117] relevant, die eine Struktur für

¹ <https://github.com/GeoplexGIS/geores>

A) Gebäude im Kataster eigenständig:



B) Gebäude im Kataster zusammengefasst:

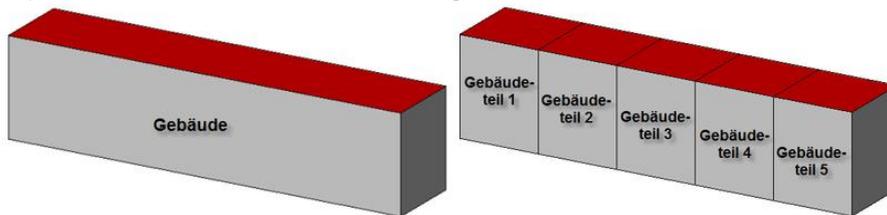


Abbildung 3.5: Möglichkeiten zur Modellierung von Gebäudeteilen in CityGML [140]

Informationen vorgibt, die zur energetischen Modellierung von Gebäuden genutzt werden können. Darüber hinaus ist durch die EnergyADE auch eine Struktur für die Rückführung und Organisation von Berechnungsergebnissen in der CityGML Datei vorgegeben. Aktuell liegt sie in der Version 1.0 vor.

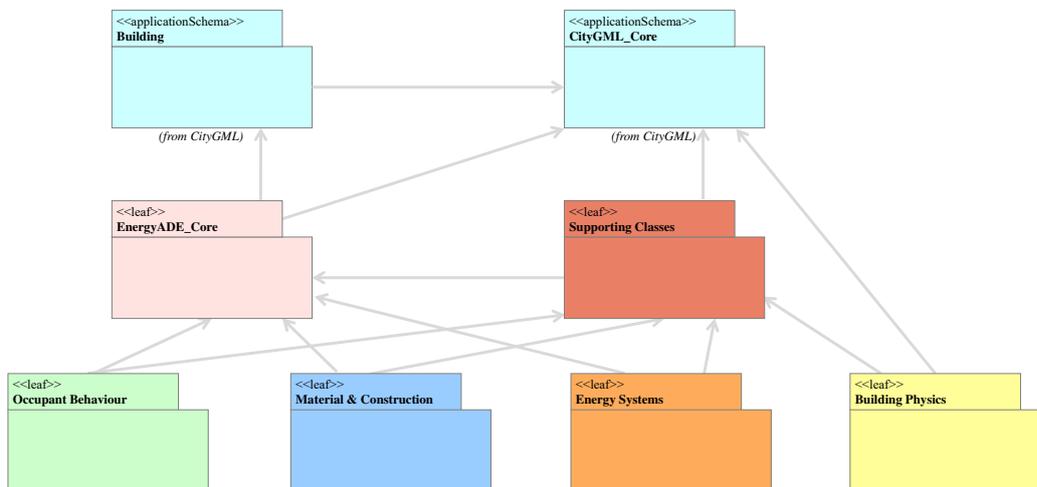


Abbildung 3.6: Struktur der EnergyADE Version 1.0., eigene Darstellung nach [17]

Abbildung 3.6 zeigt die verschiedenen Module der EnergyADE, die aus dem CityGML Standard übernommen (*Building* und *CityGML_Core*) bzw. neu definiert (*Energy ADE Core*, *Building Physics*, *Occupant Behaviour*, *Material and Construction*, *Energy Systems* und *Supporting Classes*) werden. Eine detaillierte Beschreibung der Module findet sich in [17].

3.4 Die Simulationsplattform SimStadt

SimStadt ist eine an der Hochschule für Technik Stuttgart (HFT Stuttgart) entwickelte Simulationsplattform zur urbanen Gebäudeenergiemodellierung². Sie wird in mehreren Forschungsprojekten seit 2013 unter der Leitung von Prof. Volker Coors, Prof. Ursula Eicker und Prof. Bastian Schröter entwickelt. In diesem Kapitel wird die grundsätzliche Funktionsweise von SimStadt beschrieben.

Abbildung 3.7 zeigt das Workflow Schema der Simulationsplattform SimStadt, ohne die Erweiterungen und Neuerungen im Rahmen dieser Arbeit. Nouvel et al. [118] beschreiben die Methode zur Berechnung des monatlichen Heizwärmebedarfs mit SimStadt auf Basis der DIN V 18599 [55] und einer Gebäudephysik-Bibliothek basierend auf der Deutschen Wohngebäudetypologie nach Loga et al. [105] sowie einer Nutzungsbibliothek. Darüber hinaus kann mit SimStadt das Potenzial für Aufdach-Photovoltaik Anlagen berechnet werden [61, 131]. Beide Workflows werden über eine Schnittstelle mit der Simulationsumgebung INSEL³ simuliert. INSEL ist ein frei verfügbares grafisches Simulationssystem zur Erstellung von Simulationsmodellen und Anwendungen, die auf den Bereich der erneuerbaren Energietechnologien spezialisiert ist [134]. Ein weiterer Workflow von SimStadt ist die Wärmenetz-Auslegung anhand der Straßenverläufe aus Open Street Map (OSM), der eine Input-Datei für die detaillierte Netz-Simulationssoftware STANET⁴ generiert. Weiterhin können stündlich aufgelöste Strom-Lastprofile [94] sowie das Biomasse Potenzial basierend auf einem digitalen Landschaftsmodell [11] mit SimStadt generiert werden.

² <https://simstadt.hft-stuttgart.de/doc/>

³ www.insel.eu

⁴ www.stafu.de

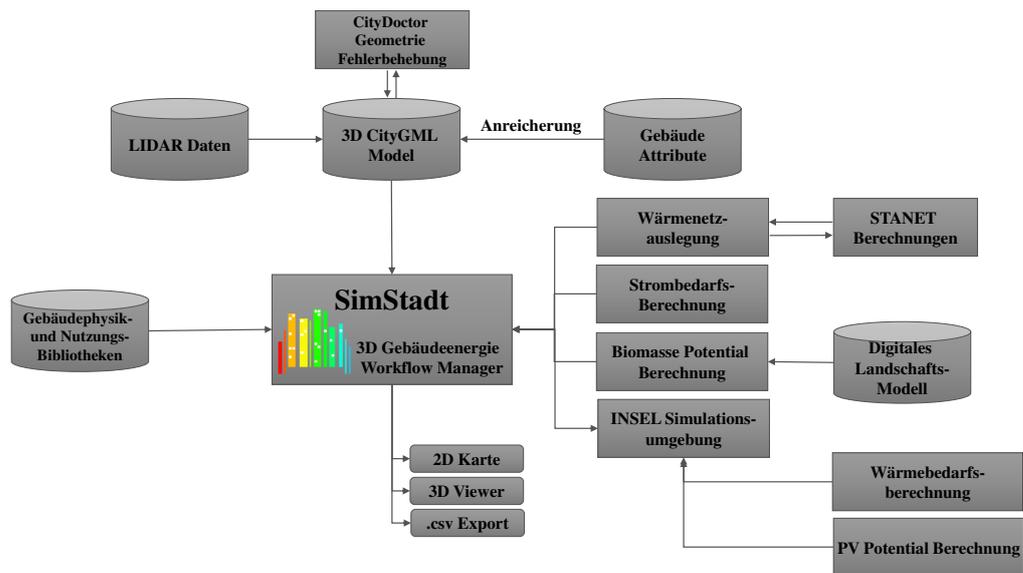


Abbildung 3.7: SimStadt Workflow Schema

SimStadt nutzt das bereits in Kapitel 3.3 beschriebene CityGML Format für den Input der 3D Gebäudemodelle, die v.a. mit der Lidar-Methode generiert werden. Trotz der zuvor beschriebenen Vorgaben kann es zu Fehlern bei der Modellierung von Gebäuden im CityGML Format kommen. Das 3D Modell kann mit dem CityDoctor [44] einer Qualitätsprüfung unterzogen werden. Solche Fehler können z.B. offene Polygone oder eine falsche Orientierung der Punkte sein, welche dann unter anderem zu einer falschen Berechnung des Gebäudevolumens führen können. Diese Gebäude können dann von der Simulation ausgeschlossen werden oder, abhängig von der Art des Fehlers, auch mit dem CityDoctor geheilt werden.

Jedes Gebäude im CityGML Modell muss über die Attribute *yearOfConstruction* (Baujahr) und *function* (Gebäudenutzung) verfügen, um in SimStadt simuliert werden zu können. Diese beiden Attribute werden benötigt, um entsprechende Informationen für jedes Gebäude aus den beiden verknüpften Bibliotheken für Gebäudephysik sowie Nutzung abzurufen. Das CityGML Modell kann mit diesen Attributen angereichert werden.

Die Ergebnisse von SimStadt können in 2D oder 3D Visualisierungen ausgegeben werden oder als .csv Datei, die zur weiteren Verarbeitung nutzbar ist.

3.4.1 Aufbau, Datenmodell und Bibliotheken

SimStadt ist in Workflows organisiert, die entlang von Workflow-Schritten aufgebaut sind. Abbildung 3.8 zeigt einen Screenshot der SimStadt Benutzeroberfläche im Workflow *Heat Demand Analysis*. Im oberen Teil der Abbildung sind in gelb die Workflow-Schritte des Workflows zu sehen, die blauen Felder sind verschiedene sogenannte *Preprocessings*, also Vorverarbeitungsschritte, innerhalb des Workflow-Schrittes.

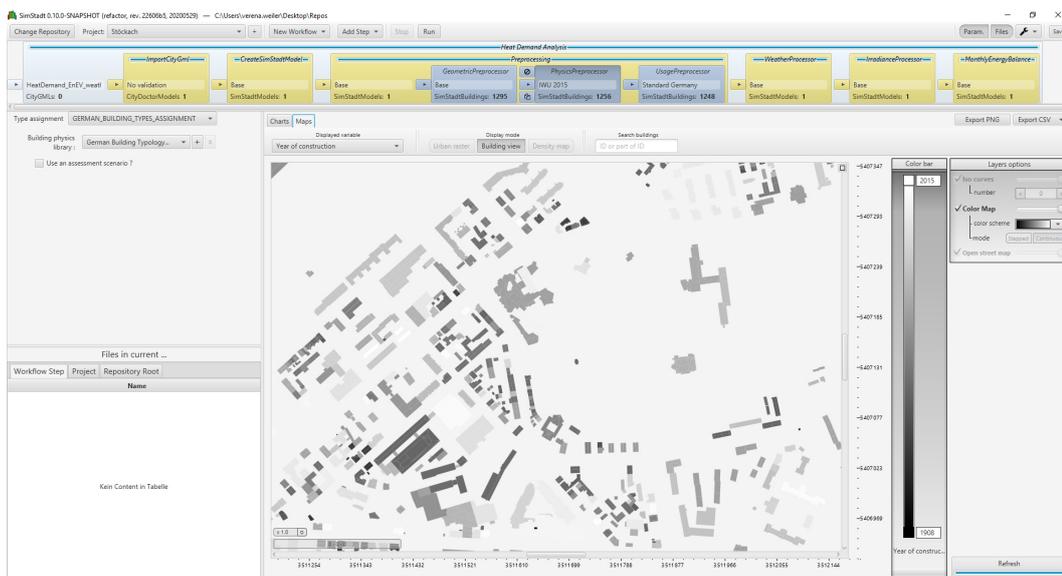


Abbildung 3.8: SimStadt Simulations-Plattform, *Heat Demand Analysis* Workflow

Der erste Schritt zur Berechnung des monatlichen Heizwärmebedarfs ist der Import des CityGML Modells, um daraus im Anschluss ein für SimStadt lesbares Modell zu generieren. Nun folgt das *Preprocessing*, bei dem für korrekt beschriebene Gebäude verschiedene geometrische Parameter wie Fläche und Ausrichtung der Wandflächen, Gebäudehöhen, A/V-Verhältnis oder die Art des Dachs ausgegeben werden. Im *PhysicsPreprocessor* wird im Anschluss jedem Gebäude abhängig von der Geometrie ein Gebäudetyp (*buildingType*) zugewiesen. Hier wird zwischen Einfamilienhaus (EFH), Reihenhaus (RH), Mehrfamilienhaus (MFH), Großes Mehrfamilienhaus (GMH) und Hochhaus (HH) unterschieden. Die Zuordnung erfolgt aufgrund der Gebäudehöhe, Anzahl der Vollgeschosse und des

Anteils der *sharedWallArea*, also des Anteils der Wände eines Gebäudes, die mit einem angrenzenden Gebäude adiabatisch geteilt werden.

Nachdem jedem CityGML Gebäude ein *buildingType* zugeordnet wurde und außerdem die Information über das Baujahr vorhanden ist, können die entsprechenden spezifischen U-Werte und weitere Parameter aus der Gebäudephysik-Bibliothek für die weiteren Berechnungen verwendet werden. Sie basiert auf der deutschen Wohngebäudetypologie herausgegeben vom IWU [105]. Hier werden Referenzgebäude aus verschiedenen Baualtersklassen für fünf Gebäudetypen beschrieben (siehe Abbildung 3.9).

In der deutschen Wohngebäudetypologie werden für jedes dieser Gebäude U-Werte für Außenwand, Fenster, Dach, oberste Geschossdecke sowie Kellerdecke im unsanierten Zustand angegeben. Diese U-Werte finden sich in der Gebäudephysik-Bibliothek wieder. Dabei werden in der Gebäudephysik-Bibliothek auch Baualtersklassen für Gebäudetypen zugelassen, die nicht in der IWU-Typologie vorkommen. So ist z.B. ein GMH auch für die Altersklasse 1984-1994 definiert, obwohl es ein solches Referenzgebäude in der IWU-Typologie nicht gibt. Die Werte in der Gebäudephysik-Bibliothek werden dann von einem anderen Gebäudetyp der gleichen Altersklasse übernommen, wie in diesem Fall vom Typ MFH.

Zusätzlich gibt es für alle Kombinationen aus Typ und Alter mehrere Sanierungsvarianten. Die IWU-Typologie definiert eine Standard- und eine zukunftsweisende Sanierungsvariante. Neben den beiden IWU-Varianten gibt es in der Gebäudephysik-Bibliothek noch die Sanierung nach Energieeinsparverordnung (EnEV), die die Vorgaben für die U-Werte der Bauteilsanierung nach der EnEV 2016 nutzt [30]. Dabei kann sowohl eine Vollsanierung aller Bauteile auf EnEV2016-Niveau gewählt werden, als auch eine Teilsanierung von nur einem Bauteil. Seit 2020 gelten in Deutschland die Bauteilkennwerte nach dem Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden - Gebäudeenergiegesetz (GEG) [33]. Diese unterscheiden sich nur geringfügig von den bestehenden EnEV-Kennwerten, es ändert sich etwa der zulässige U-Wert der Außenwand von $0,24 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ in der EnEV2016 im GEG zu $0,28 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Diese minimalen Unterschiede können hier vernachlässigt werden.

Baualterklasse		EFH	RH	MFH	GMH	HH
		Basis-Typen				
A	... 1859	EFH_A 		MFH_A 		
B	1860 ... 1918	EFH_B 	RH_B 	MFH_B 	GMH_B 	
C	1919 ... 1948	EFH_C 	RH_C 	MFH_C 	GMH_C 	
D	1949 ... 1957	EFH_D 	RH_D 	MFH_D 	GMH_D 	
E	1958 ... 1968	EFH_E 	RH_E 	MFH_E 	GMH_E 	HH_E 
F	1969 ... 1978	EFH_F 	RH_F 	MFH_F 	GMH_F 	HH_F 
G	1979 ... 1983	EFH_G 	RH_G 	MFH_G 		
H	1984 ... 1994	EFH_H 	RH_H 	MFH_H 		
I	1995 ... 2001	EFH_I 	RH_I 	MFH_I 		
J	2002 ... 2009	EFH_J 	RH_J 	MFH_J 		
K	2010 ... 2015	EFH_K 	RH_K 	MFH_K 		
L	2016 ...	EFH_L 	RH_L 	MFH_L 		

Abbildung 3.9: Übersicht der Baualters- und Größenklassen nach IWU [105]

In der Bibliothek sind verschiedene Bauteil-Konstruktionen hinterlegt, die sich aus Materialien aus der ebenfalls in der Gebäudephysik-Bibliothek vorhandenen Material-Bibliothek zusammensetzen lassen. Für die Materialien, die in einer ausgewählten Konstruktion verwendet werden, können jeweils Dicken angegeben werden. Daraus und aus den Materialparametern wie Dichte oder Wärmeleitfähigkeit errechnet sich der spezifische U-Wert für jede Bauteil-Konstruktion. Mit diesen

Informationen können so auch individuelle Sanierungszustände von einzelnen Gebäuden abgebildet werden.

Neben den material- und konstruktionsspezifischen Informationen enthält die Gebäudephysik-Bibliothek auch globale Parameter wie z.B. die mittlere Geschosshöhe, die thermische Kapazität und der indirekt beheizte Flächenanteil. Diese Parameter gelten gleichermaßen für alle Varianten eines Gebäudetyps in einer Baualtersklasse.

Die U-Werte der Bauteile werden in SimStadt abhängig von Gebäudetyp und Baujahr jedes einzelnen Gebäudes aus der Gebäudephysik-Bibliothek eingelesen und mit den tatsächlichen Flächen des entsprechenden Gebäudes verrechnet. So ergibt sich ein individuelles Ergebnis für den mittleren U-Wert für jedes Gebäude.

Der dritte Preprocessing Schritt in Abbildung 3.8 ist der *UsagePreprocessor*. Hier wird aufgrund des in der CityGML Modell vorhandenen Attributs *function* die Gebäudenutzung ausgegeben. In Deutschland liegt diese Information in CityGML Dateien meist in Form von Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS) Klassen vor, die von der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) herausgegeben werden. Insgesamt werden hier über 200 verschiedene Nutzungen definiert. Diese werden in der Nutzungsbibliothek von SimStadt in 18 Nutzungen (z.B. *residential, office and administration, restaurant, education*) zusammengefasst. Hier werden u.a. Informationen zu internen Lasten, Soll-Temperaturen bei Heiz- oder Kühlbetrieb sowie Kennwerte zum Trinkwarmwasserbedarf aus der DIN V 18599-10 für die verschiedenen Nutzungen gespeichert.

Im *WeatherProcessor* und im *IrradianceProcessor* können historische Wetterdaten aus verschiedenen Quellen wie z.B. der PV-GIS Datenbank⁵ gewählt oder eine eigene Datei im TMY3 Format eingelesen werden. Darüber hinaus stehen verschiedene Strahlungsmodelle (z.B. Hay Algorithmus [81] oder Simplified Radiosity Algorithm (SRA) [129]) mit und ohne Berücksichtigung der Verschattung zur Verfügung.

⁵ <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>

Der letzte Workflow-Schritt im *Heat Demand Analysis* Workflow aus Abbildung 3.8 ist schließlich die Berechnung des monatlichen Heizwärmebedarfs, der im nächsten Kapitel 3.4.2 beschrieben wird. Zu allen Workflow-Schritten gibt es verschiedene Visualisierungsoptionen der jeweiligen Daten als Karte und/oder in Form von Graphen. Je nach Anwendungsfall ist eine Variation von Farbskala und Legenden-Intervallen möglich.

3.4.2 Wärmebedarfsberechnung

Der monatliche Heizwärmebedarf wird nach der Norm DIN V 18599 [55] berechnet. Alle Wärmequellen (z.B. interne und solare Gewinne) und -senken (z.B. Transmissionswärme- und Lüftungsverluste) innerhalb des Gebäudes werden berechnet und über einen Monat ausbalanciert, wie in Formel 3.1 zu sehen.

$$Q_{h,b} = \sum_{m=1}^{12} Q_{sink,m} - \eta_m \cdot Q_{source,m} - \Delta Q_{c,b,m} \quad (3.1)$$

mit

$Q_{h,b}$	Heizwärmebedarf des Gebäudes, dabei steht h für Heizen (engl. <i>heating</i>) und b für Gebäude (engl. <i>building</i>)
$Q_{sink,m}$	Summe der Wärmesenken (engl. <i>heat sinks</i>) des Gebäudes je $m = \text{Monat}$ (engl. <i>month</i>)
η_m	Ausnutzungsgrad der Wärmequellen je $m = \text{Monat}$ (engl. <i>month</i>)
$Q_{source,m}$	Summe der Wärmequellen (engl. <i>heat sources</i>) des Gebäudes je $m = \text{Monat}$ (engl. <i>month</i>)
$\Delta Q_{c,b,m}$	während des reduzierten Betriebs an Wochenend- und Feiertagen genutzte, aus den Bauteilen entspeicherte Wärme je $m = \text{Monat}$ (engl. <i>month</i>), c steht für die Wärmekapazität (engl. <i>capacity</i>), b für Gebäude (engl. <i>building</i>)

Die monatlichen Werte werden anhand der Außentemperatur und weiteren Rahmenbedingungen, angelehnt an die Berechnung der Gradtage in VDI 4710 [154], auf Stunden verteilt. Die benötigten Variablen Heizgrenztemperatur, Soll-Innentemperatur sowie die Dauer der Nachtabschaltung können je nach Gebäudenutzung aus der mit SimStadt gekoppelten Nutzungsbibliothek bezogen werden. Zusätzlich wird eine Heizperiode festgelegt, in welcher die Heizung grundsätzlich in Betrieb ist. Anschließend kann eine „Stundengradzahl“ G_h für jede Stunde berechnet werden, also die Temperaturdifferenz zwischen Außentemperatur und Heizgrenztemperatur bzw. Soll-Innentemperatur, je nach Stunde des Tages. Für jeden Monat wird die Summe dieser Werte gebildet. Um daraus einen stündlichen Heizwärmebedarf zu berechnen, wird der Quotient aus dem monatlichen

Heizwärmebedarf und der Summe der Stundengradzahlen gebildet und mit der Stundengradzahl der jeweiligen Stunde multipliziert (siehe Formel 3.2).

$$Q_{h,h} = \frac{Q_{h,m}}{\sum_{m=1}^{12} G_h} \cdot G_h \quad (3.2)$$

mit

$Q_{h,h}$ stündlicher Heizwärmebedarf, dabei steht h für Heizen
(engl. *heating*) und h für stündlich (engl. *hourly*)

$Q_{h,m}$ monatlicher Heizwärmebedarf, dabei steht h für Heizen
(engl. *heating*) und m für Monat (engl. *month*)

G_h Stundengradzahl (h für stündlich (engl. *hourly*))

Der Warmwasserbedarf wird in SimStadt basierend auf einem flächen-spezifischen Kennwert aus der DIN V 18599 [54] abhängig von der Gebäudenutzung errechnet. Aus der Summe des Heizwärme- und des Warmwasserbedarfs ergibt sich der Gesamtwärmebedarf eines Gebäudes.

3.4.3 Primärenergie- und CO₂-Emissionsberechnung

Für jedes Gebäude können mit SimStadt vereinfacht der monatliche Primärenergiebedarf sowie die CO₂-Emissionen basierend auf dem monatlichen Gesamtwärmebedarf berechnet werden. Dafür sind für verschiedene Wärmeerzeugungssysteme Effizienzkennwerte und für deren Brennstoffe Primärenergiefaktoren sowie CO₂-Emissionsfaktoren hinterlegt. Die folgenden Wärmeerzeugungssysteme können dabei in SimStadt gewählt werden:

- Niedertemperaturkessel (Gas),
- Gas-Brennwertkessel,
- Ölkessel,
- Holzpelletkessel,
- Luft/Wasser-Wärmepumpe,

- Sole/Wasser-Wärmepumpe,
- Heizstab.

Es werden dabei allerdings keine detaillierten Simulationen der Systeme durchgeführt, es handelt sich hierbei lediglich um eine einfache Bilanzierung basierend auf wenigen Kennzahlen. Das bedeutet auch, dass nur eine jährliche Bilanz erstellt werden kann und keine zeitlich höher aufgelösten Ergebnisse generiert werden können.

3.4.4 Ermittlung der grauen Energie der Baukonstruktion der Gebäude

Mit zunehmender Güte der Gebäudehülle und anspruchsvollen Standards wie der EnEV 2016 reduziert sich der Wärmebedarf eines Gebäudes während seiner Nutzungsphase deutlich im Vergleich zu älteren, unsanierten Gebäuden. Gleichzeitig aber nehmen, vor allem aufgrund der höheren Menge an benötigtem Dämmmaterial, die benötigte Energie und die emittierten Treibhausgase, die in der Produktions- und End-of-Life Phase der Baumaterialien entstehen, immer weiter zu. Um eine ganzheitliche Aussage zum energetischen Zustand von Gebäuden machen zu können, sollten sie hinsichtlich ihres gesamten Lebenszyklus bewertet werden, der zusätzlich die Produktions- und die End-of-Life Phase umfasst, statt nur auf den Energiebedarf und die Emissionen während der Nutzungsphase zu fokussieren.

Die Lebenszyklusanalyse (LCA) befasst sich mit den Umweltaspekten und potenziellen Umweltauswirkungen während des gesamten Lebenszyklus eines Produkts bzw. in diesem Fall eines Gebäudes. Es werden hier grundsätzlich die im Folgenden aufgezählten Phasen berücksichtigt, die sich an die Definition der Lebenszyklusphasen nach DIN EN 15978⁶ [53] orientieren. Dabei werden die Herstellungs- und die Errichtungsphase zu einer gemeinsamen Produktionsphase kombiniert. Die Nutzungsphase beinhaltet dabei keine weiteren Maßnahmen wie z.B. Instandhaltung oder Modernisierung, sondern bezieht sich nur auf den Energieverbrauch des Gebäudes.

1. Produktionsphase:

⁶ Richtlinie befindet sich derzeit in Überarbeitung

- Abbau von Rohmaterial und Herstellung des Produkts,
 - Transport des Materials zur Baustelle,
 - Zusammenbau der Materialien vor Ort.
2. Nutzungsphase,
3. End-of-Life Phase:
- Abbau der Materialien,
 - Transport des Materials zur Deponie,
 - Behandlung.

In Weiler et al. [161] wird eine umfassende Methode zur Berechnung des Lebenszyklus einzelner Gebäude mit SimStadt vorgestellt und in Harter et al. [80] auf eine Fallstudie in einem urbanen Stadtquartier angewandt. Zunächst wurde die Materialzusammensetzung der Gebäude aus der IWU-Gebäudetypologie bestimmt. Mithilfe der ecoinvent 3.2⁷ Datenbank und dem Tool Umberto⁸ wurde anschließend für jedes der in der Typologie verwendete Material die benötigte spezifische Energie und Emissionen für Herstellung und Entsorgung berechnet. In Abbildung 3.10 ist die Methode grafisch beschrieben.

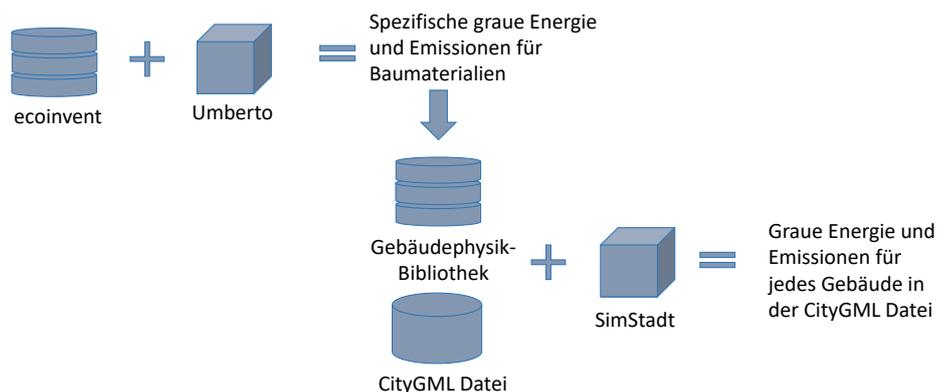


Abbildung 3.10: Methode zur Abbildung von grauer Energie und Emissionen in SimStadt

⁷ <https://www.ecoinvent.org/>

⁸ <https://www.ifu.com/umberto/oekobilanz-software/>

Anschließend wurden die Werte in die Gebäudephysik-Bibliothek integriert, so dass sie von einem Workflow in SimStadt gelesen und verarbeitet werden können. Basierend auf der Geometrie der Gebäude aus der CityGML Datei und den in der Gebäudephysik-Bibliothek hinterlegten Bauteil-Konstruktionen können in SimStadt für jedes Gebäude sowie jede Sanierungsvariante die Energie sowie Emissionen für die Produktions und End-of-Life Phase berechnet werden. Die Ergebnisse können zum Beispiel bei der Beantwortung der Frage unterstützen, ob ein Bestandsgebäude saniert werden soll oder abgerissen und neugebaut wird.

Grundsätzlich können bei der Ermittlung dieser Kennwerte verschiedene Datenbanken (dabei sind vor allem die hier verwendete ecoinvent Datenbank, die Datenbanken der GaBi Software⁹ sowie die ÖKOBAUDAT¹⁰ des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB)) und eine Vielzahl an Modellierungstools (z.B. Umberto¹¹, GaBi¹², openLCA¹³) genutzt werden.

Energieaufwände und erfolgte Emissionen im Zusammenhang mit der Herstellung und Entsorgung von Komponenten der Wärmeversorgung wie z.B. Wärmepumpen oder Heizkessel werden hierbei nicht berücksichtigt.

3.4.5 Weitere Bedarfs- und Potenzialberechnungen

Neben dem Heizwärme-, Warmwasser- und Primärenergiebedarf kann mit SimStadt auch der Strombedarf von Wohngebäuden simuliert werden. Dabei werden synthetische Stromlastprofile für Haushalte unter Verwendung gemessener Zeitreihendaten generiert [93].

Zusätzlich zu den Bedarfsermittlungen können in SimStadt Potenziale für erneuerbare Energien ermittelt werden. Die Berechnung des Photovoltaik (PV)-Potenzials für Aufdach-Anlagen beruht auf den zuvor beschriebenen CityGML Dateien und deren Abbildung der Dachform und -orientierung [144, 61]. Das Biomasse-Potenzial wird mittels GIS-basierten Landnutzungsdaten und Satellitenkarten

⁹ <https://gabi.sphera.com/deutsch/databases/gabi-databases/professional/>

¹⁰ <https://www.oekobaudat.de/>

¹¹ <https://www.ifu.com/umberto/lca-software>

¹² <https://gabi.sphera.com/deutsch/software/gabi-software/gabi/>

¹³ <https://www.openlca.org/>

bestimmt. Dabei können verschiedene Flächennutzungen, Nutzpflanzen und Biokraftstoffe unterschieden werden [11, 12].

3.5 Warmwasserbedarfsermittlung mit DHWcalc

Verschiedene Studien wie z.B. Fuentes et al. [74], Ahmed et al. [5] sowie de Santiago et al. [133] stellen eine Notwendigkeit der detaillierten Modellierung des Trinkwarmwasserbedarfs fest, im Gegensatz zu einer ausschließlich flächenbezogenen Kennwertmethode. Aufgrund von Messungen des Trinkwarmwasserbedarfs in Wohngebäuden in europäischen und nordamerikanischen Ländern haben Untersuchungen einen Unterschied zwischen Wochenende und Werktag¹⁴ im Bezug sowohl auf die Höhe als auch auf den zeitlichen Verlauf des Warmwasserbedarfs festgestellt, zusätzlich sind Unterschiede zwischen den verschiedenen Jahreszeiten auszumachen [1, 4, 76]. Beide Effekte können durch verändertes Nutzerverhalten erklärt werden, etwa durch einen höheren Warmwasserbedarf zur Zeit des Mittagessens an Werktagen sowie an Wochenenden eine Verlagerung der Spitzenverbräuche in die Mittagszeit und eine generelle Glättung der Verbrauchskurve.

Das im Rahmen des International Energy Agency (IEA) Solar Heating and Cooling Programme (SHC) Task 26 entstandene Tool DHWcalc [86] der Universität Kassel ermittelt Warmwasser-Zapfprofile in verschiedenen Auflösungen zwischen einer Minute und einer Stunde. DHWcalc generiert Textdateien, in denen die Zapfereignisse als Volumenstrom für jeden Zeitschritt abgebildet sind. Die Zapfereignisse werden mittels Wahrscheinlichkeitsfunktionen über den Tag und das Jahr verteilt. Nutzer des Tools können dabei die vordefinierten Standard-Verteilungen anpassen, die in Abbildung 3.11 zu sehen sind. Sie zeigt die vier verschiedenen vorkommenden Lasten (Dusche, Badewanne, Handwaschbecken sowie Küchenspüle) mit Gaußschen Normalverteilungen und Treppenfunktionen im Tagesverlauf. „Small and medium“, die beiden Lasten aus Handwaschbecken und Küchenspüle, sind zwischen 5 Uhr und 23 Uhr als konstant angenommen.

¹⁴ Unter Werktag werden hier die Tage von Montag bis Freitag verstanden. Samstag und Sonntag sind Wochenend-Tage.

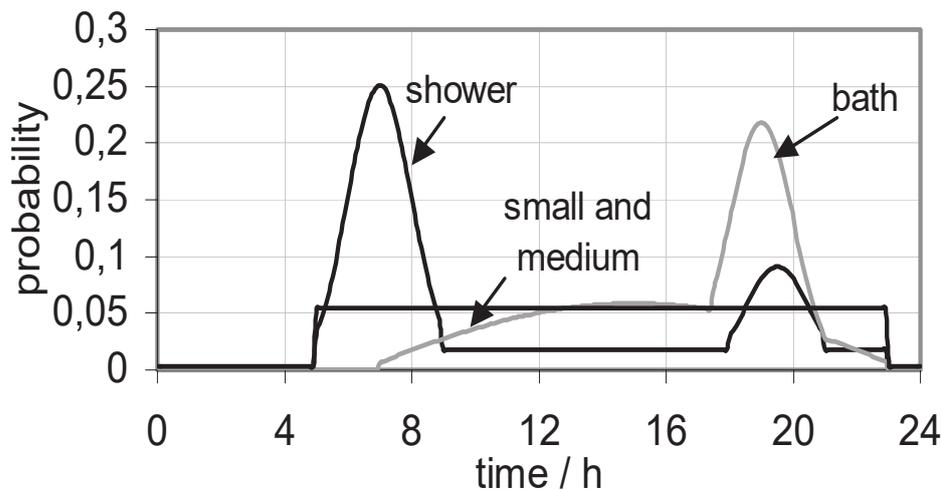


Abbildung 3.11: Wahrscheinlichkeitsverteilungen der vier TWV-Lasten im Tagesverlauf [86]

Diese Wahrscheinlichkeiten als Anteil am gesamten Zapfvolumen des jeweiligen Tages können für Wochentage und Wochenend-Tage individuell für einzelne Stunden oder frei wählbare Zeitintervalle angepasst werden.

In DHWcalc können die unterschiedlichen Warmwassermengen an Werk- und Wochenend-Tagen über ein Verhältnis der Durchschnitts-Verbrauchswahrscheinlichkeit abgebildet werden; bei einem Wert von z.B. 120 % führt das zu einer leichten Erhöhung des Bedarfs an Wochenenden gegenüber den Werktagen. Eine Berücksichtigung der verschiedenen Jahreszeiten und somit der herrschenden Außentemperatur findet statt, indem eine Sinusfunktion für saisonale Schwankungen angewandt wird. Somit kann eine leichte Reduktion der Bedarfs-Wahrscheinlichkeit im Sommer vorgenommen werden. Diese beiden Effekte werden in den bereits zuvor genannten Studien beschrieben und mit Messdaten bestätigt.

Darüber hinaus sind Angaben zum Gebäudetyp, der Anzahl der Haushalte im Gebäude, dem mittleren Zapfvolumen pro Tag sowie dem durchschnittlichen Volumenstrom nötig. Basierend auf diesen Angaben erstellt DHWcalc für jedes Gebäude ein Trinkwarmwasserprofil in der gewählten zeitlichen Auflösung.

Mithilfe einer beta Version zur Erweiterung des Tools können mittels der Integration einer Zufallszahl auch unterschiedliche Profile für ansonsten gleiche Randbedingungen generiert werden [19].

4 Methoden zur Modellierung von urbanem Wärmebedarf und Versorgungsoptionen

Schlussfolgernd aus der Problemstellung sowie der Literaturrecherche in den vorangegangenen Kapiteln sowie den offenen Forschungsfragen spannt sich der Rahmen der geforderten Methoden und deren Anwendung auf.

In Kapitel 1 wurde das Problem thematisiert, dass Tools zur Berechnung von Wärmebedarf und -versorgung sowie erneuerbaren Potenzialen benötigt werden, die basierend auf relativ wenigen Input-Daten sowie mit kurzen Rechenzeiten und ohne lange Einarbeitungszeit von Personen genutzt werden können, die z.B. verschiedene Szenarien für Klimaschutzkonzepte in Kommunen und für größere Liegenschaften erstellen wollen. Im darauffolgenden Kapitel 2 wurden unter anderem bestehende Tools sowie deren Anwendungsspektrum vorgestellt. Dabei wurde festgestellt, dass es wenige Tools gibt, die alle zuvor beschriebenen relevanten Aspekte abdecken. Keines der untersuchten Tools wurde als für die vorliegende Problemstellung geeignet befunden. Die Simulationsplattform SimStadt, deren Funktionen und Umfang zum Zeitpunkt vor Beginn dieser Arbeit detailliert in Kapitel 3.4 beschrieben wurde, bietet jedoch eine geeignete Basis, um die Anforderungen erfüllen zu können. Die einfache Anwendbarkeit sowie gute Datenverfügbarkeit der benötigten Input-Daten sowie eine dadurch einheitliche Datenbasis machen SimStadt zu einem geeigneten Tool für die urbane Gebäudeenergiemodellierung im kommunalen und planerischen Kontext. In SimStadt sind bereits verschiedene Potenzialanalysen sowie die Heizwärmebedarfs- und Strombedarfsberechnung integriert und validiert. Ein großer offener Bereich ist hingegen die Versorgungssimulation, die bislang in SimStadt nur mittels einfacher Kennzahlen (siehe Kapitel 3.4.3) durchgeführt werden konnte. Den Kern dieser Arbeit bildet daher die Entwicklung eines Verfahrens, um verschiedene Versorgungsoptionen für Quartiere automatisiert mit SimStadt berechnen zu können.

Im Folgenden wird das gesamte methodische Vorgehen im Rahmen dieser Arbeit zusammenfassend beschrieben und dabei erläutert, welche Teile im Rahmen der

Arbeit neu entwickelt wurden und welche Teile bereits zu Beginn der Arbeit vorhanden waren.

Für die Ermittlung des Wärmebedarfs von Gebäuden in Quartieren muss gebäudescharf der Heizwärme- und Warmwasserbedarf ermittelt werden (2). Dafür werden Simulationsmodelle benötigt, die automatisch für viele Gebäude den Bedarf in stündlicher Auflösung ermitteln. Um das zu ermöglichen, wird zunächst die Nutzung von 3D Gebäudemodellen im CityGML Format zur realistischen Abbildung der Gebäudegeometrie untersucht (1). In einem weiteren Schritt (3) werden Methoden entwickelt, um aus unterschiedlichen Datenquellen für die Gebäudesimulation relevante Attribute, insbesondere Nutzung und Baujahr, zu ermitteln. Damit wird die Bedarfssimulation trotz fehlender oder ungenauer Daten durch Nutzung und Zuordnung frei verfügbarer Datenquellen ermöglicht. Zusätzlich können verschiedene Sanierungsszenarien für die Gebäude inklusive Berücksichtigung der grauen Energie, die dafür aufgewandt werden muss, berechnet werden (4). Neben der Bestimmung der Bedarfe ist auch die Ermittlung erneuerbarer Potenziale im lokalen Kontext von Bedeutung (5).

Um die automatische Simulation von Wärmeversorgungssystemen durchzuführen, wird ein Datenmodell in Form eines Klassendiagramms für eine Energiesystemkomponenten-Bibliothek entwickelt (6). Mittels eines Flussdiagramms können die individuellen Rahmenbedingungen und Gegebenheiten eines zu untersuchenden Quartiers abgefragt und daraus mögliche Versorgungssysteme abgeleitet werden (7).

Parallel dazu werden Simulationsmodelle von zukunftsfähigen Wärmeversorgungssystemen in der INSEL Simulationsumgebung erstellt und anschließend allgemeine Templates aus diesen entwickelt (8). Mit diesen beiden Methoden kann anschließend eine automatische Parametrisierung der Simulationsmodelle aus der Energiesystemkomponenten-Bibliothek, basierend auf der Bedarfssimulation und der Komponentendimensionierung, durchgeführt werden (9).

Nicht alle der oben genannten Punkte wurden als Teil dieser Arbeit entwickelt. Abbildung 4.1 gibt einen Überblick zu den einzelnen Schritten und beschreibt farblich, welche Schritte im Rahmen dieser Arbeit komplett neu entwickelt wurden in grün und welche bereits zu Beginn der Arbeit zu Verfügung standen in blau. Der

erste sowie vierte und fünfte Schritt sind bereits in der vor Beginn der Arbeit bestehenden Version von SimStadt vorhanden, ebenfalls ein Teil des zweiten Schrittes, der für die Ermittlung des Heizwärmebedarfs bereits durch SimStadt abgedeckt ist. Die Berechnung des Warmwasserbedarfs durch das Tool DHWcalc sowie die Verknüpfung der beiden Tools ist Teil dieser Arbeit. Die weiteren Schritte drei sowie sechs bis neun sind Neu-Entwicklungen im Rahmen dieser Arbeit. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Methoden werden, abgesehen von Schritt sieben, in die vorhandene Simulationsplattform SimStadt eingebunden.

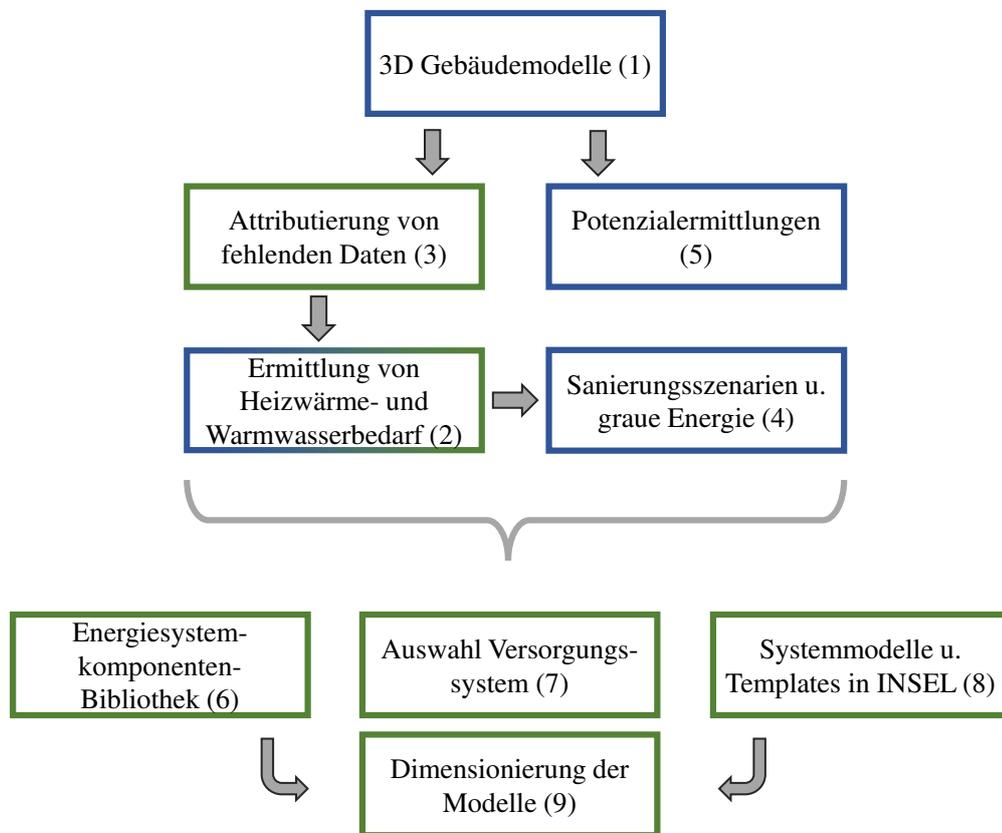


Abbildung 4.1: Schematischer Überblick über angewandte und entwickelte Methoden (grün:im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelt, blau:in SimStadt bereits vorhanden).

Insgesamt steht durch die Kombination von verschiedenen Methoden, die so bisher noch nicht kombiniert wurden, ein einfach zu bedienendes und verständliches Tool zur Verfügung, mit dem verschiedene Szenarien auf Quartiersebene unter Beibehaltung einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung auf Basis von 3D

Gebäudemodellen und auch bei ggf. mangelhafter Datenlage simuliert werden können. Weiterhin können aufbauend auf der Bedarfsberechnung und unter Berücksichtigung lokaler Rahmenbedingungen Szenarien zur Wärmeversorgung simuliert werden. Dieses Tool kann Kommunen und Entscheidungsträger bei der strategischen Planung unterstützen und somit einen wertvollen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele im Bereich der Wärmeversorgung von Gebäuden leisten.

4.1 Simulation des Wärmebedarfs von Gebäuden in Quartieren

Der Heizwärmebedarf hat, bezogen auf den gesamten Gebäudebestand, den größten Anteil am Gebäudeenergiebedarf [32]. Daher kommt der Ermittlung des Wärmebedarfs im Gebäudesektor eine große Bedeutung zu.

Wie in Kapitel 3.4 beschrieben, wird die Simulationsplattform SimStadt für die Simulationen des Heizwärmebedarfs im Rahmen dieser Arbeit genutzt. Für die Simulation werden 3D-Gebäudedaten im CityGML Format mit den beiden Gebäudeattributen *function* (Nutzung) und *yearOfConstruction* (Baujahr) sowie gegebenenfalls *yearOfRefurbishment* (Sanierungsjahr), für die Simulation benötigt.

4.1.1 Methoden zur Attributierung von fehlenden Gebäude- und Nutzungsparametern

Oftmals ist die Datenlage für genau die Parameter Nutzung, Baujahr und Sanierungsjahr in den verfügbaren CityGML Daten unzureichend. Dies kann verschiedene Ursachen haben. Zum einen kann es vorkommen, dass die benötigten Daten nicht vorhanden bzw. nicht dokumentiert sind. Zum anderen können Datenschutzbestimmungen dazu führen, dass etwa bei Ämtern vorhandene Daten nicht zur Nutzung und Verarbeitung an Dritte weitergegeben werden dürfen. Darüber hinaus kann es vorkommen, dass Datenbestände nicht regelmäßig gepflegt oder aktualisiert werden, Fehler enthalten sind oder manche Informationen ganz oder teilweise fehlen. Die verschiedenen Abstufungen der Datenqualität und

-verfügbarkeit sind in Abbildung 4.2 abgebildet. Die Übergänge können dabei fließend sein.



Abbildung 4.2: Abstufungen bei Qualität und Verfügbarkeit der Daten zu den benötigten Attributen

Je genauer und aktueller die Daten sind, die als Input in ein Modell gegeben werden, desto besser kann der daraus generierte Output sein. Daher wurden im Rahmen dieser Arbeit Methoden entwickelt, um die fehlenden Daten automatisch aus anderen, frei verfügbaren Quellen nutzbar zu machen und den Gebäuden zuzuordnen. Dabei werden für die verschiedenen o.g. Attribute unterschiedliche Methoden und Datenquellen untersucht und in Kapitel 5 auf Fallstudien angewandt.

Attribut *function*

Das Attribut *function* beschreibt die Nutzung eines Gebäudes. Informationen dazu können grundsätzlich aus verschiedenen Quellen stammen, wie z.B. dem örtlichen Kataster, öffentlichen Daten aus Google Maps oder OSM, Befragungen der Besitzer oder Nutzer der Gebäude sowie aus Vor-Ort-Begehungen.

Im Folgenden werden Informationen zur Nutzung des Gebäudes aus OSM gewonnen und verschiedene Möglichkeiten der Verknüpfung dieser Daten mit den Gebäudeinformationen gezeigt [165]. OSM hat das Ziel, eine kostenlose und freie Weltkarte zu erschaffen. Dabei stehen alle Informationen unter der Creative Commons (CC) Lizenz. Daten wie Straßen, Umrisse von Gebäuden und interessante Punkte (POIs) können von jedem der 4,3 Millionen registrierten Nutzer (Stand 2017) zur Verfügung gestellt und bearbeitet werden. Gleichzeitig werden alle gesammelten Daten in Rohform und als Kartenbilder online kostenfrei bereitgestellt.

Vor allem im Bereich der Nichtwohngebäude gibt es einen großen Spielraum bei der konkreten Benennung des Attributes *function*. So ist etwa die Bezeichnung eines Gebäudes, das als Supermarkt genutzt wird, mit dem Attribut „Geschäftsbau“ nicht falsch, dennoch kann durch die Verwendung des Attributs „Supermarkt“ ein höherer Detaillierungsgrad erreicht werden. Daher wurden für ein Testgebiet die Attribute in der vorhandenen CityGML Datei mit Informationen aus der online Plattform OSM verglichen.

In OSM werden POIs durch die 2xxx codes und die dazugehörigen *feature classes* (fclasses) beschrieben [124]. Die POIs sind für den Vergleich mit den Attributen der CityGML 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 werden daher gefiltert und gelöscht. Aus den insgesamt 142 Kategorien konnten so 85 relevante Kategorien identifiziert werden.

Der Detaillierungsgrad und die Aktualität der Daten von OSM ist unterschiedlich. In urbanen Gebieten kann man davon ausgehen, dass die Informationsdichte eher hoch ist [79]. Auf verschiedenen Webseiten kann man den Informationsgehalt von OSM Karten mit den Karteninhalten von Google Maps oder anderen Anbietern vergleichen¹. In städtischen Gebieten ist die Informationsdichte von OSM größer als etwa die von Google Maps, für ländliche Gebiete und kleine

¹ Map Compare von Geofabrik, <http://tools.geofabrik.de/mc>

Orte kann dies jedoch abweichen. Die geometrische Zuordnung der POIs erfolgt über das GIS Programm QGIS. Über eine Verschneidung des Punktes mit dem Gebäudegrundriss über die geografische Lage werden so die Sachinformationen aus OSM mit den geografischen Informationen der CityGML Datei kombiniert. Beim Verschneiden der beiden Datensätze ist zu beachten, dass die Zuordnung des POI innerhalb der Gebäudeumrisse stattfindet. Um zu prüfen, ob der Point Of Interest (POI) innerhalb des Gebäudegrundrisses liegt, muss die Anzahl der Schnitte des Punktes mit den Wänden ermittelt werden, siehe Abbildung 4.3.

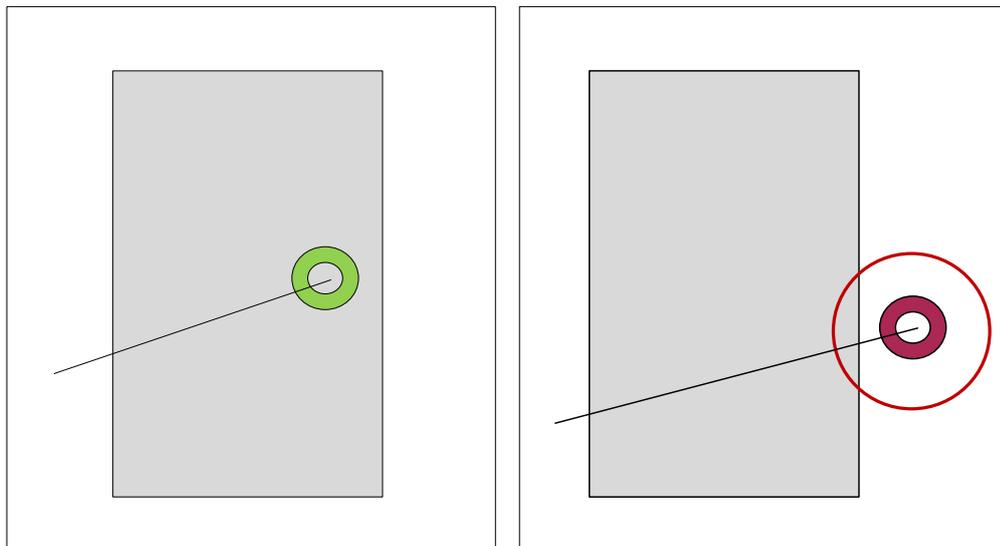


Abbildung 4.3: Zuordnung wenn der Punkt innerhalb oder außerhalb des Polygons liegt

Bei einer ungeraden Anzahl Schnitte befindet sich der POI innerhalb der Gebäudegrundfläche, bei einer geraden Anzahl außerhalb. Wenn sich POIs außerhalb des CityGML Gebäudegrundrisses befinden, 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 (siehe Abbildung 4.3 rechts).

Um die neu gewonnenen Daten für die energetische Simulation nutzen zu können, müssen sie in die CityGML Datei überführt werden. Es gibt verschiedene Methoden dafür, die Daten aus OSM zu extrahieren, zu speichern und in die CityGML Datei zu schreiben:

- Export der OSM Daten und der CityGML Datei in File Manipulation Engine (FME). Hier können bereits nur die relevanten Daten aus OSM ausgewählt werden, die restlichen Informationen werden nicht importiert. Zunächst muss ein gemeinsames Koordinatensystem gewählt werden (in der Regel wird hier das System der CityGML Datei gewählt, da dies das spätere Ausgabeformat ist), anschließend werden alle 3D Gebäude auf 2D reduziert. Dadurch können die Gebäude-Grundrisse mit den Punkten (POI) verschnitten werden. Da FME eine proprietäre Software ist, wird dieser Ansatz hier nicht weiter verfolgt.
- Direkte Integration der OSM Daten in die Simulationsplattform. Hierfür müsste eine Schnittstelle innerhalb der Simulationsplattform zu OSM aufgebaut werden, die regelmäßig und automatisch die relevanten Daten des zu untersuchenden Gebietes abrufen, zuordnet und verknüpft. Eine solche Automatisierung ist programmieretechnisch sehr aufwändig, außerdem ist diese Lösung nur individuell für die verwendete Simulationsplattform zu verwenden und nicht allgemein nutzbar.
- Verschneidung der Daten aus den verschiedenen Quellen in einer Datenbank. Hier sollen die Daten aus OSM über das PostgreSQL Datenbankmanagementsystem mit den in der CityGML Datei enthaltenen Informationen verknüpft werden. Zur Verarbeitung geographischer Daten wird die PostgreSQL Erweiterung PostGIS verwendet, die 3D CityDB [142] bildet die Grundlage der Datenbank. Die CityGML Datei wird mit dem 3D City Importer in die Datenbank importiert, die OSM Daten werden mithilfe des Tools Osmosis importiert. Auch hier können nicht relevante Daten vorher gefiltert werden, so dass diese nicht in die Datenbank geladen werden. Um die OSM Daten den Gebäuden der CityGML Datei zuzuordnen, müssen die Daten 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. Eine Möglichkeit hierfür ist die Verschneidung, bei der über die geografische Lage die Sachinformationen von mehreren Datensätzen kombiniert werden kann. Dabei müssen die zu verschneidenden Datensätze zunächst dem gleichen Koordinatensystem zugewiesen werden. Anschließend kön-

nen die Sachinformationen aus OSM mit den geografischen Informationen der CityGML Datei verschnitten werden, wie in Abbildung 4.3 beschrieben. Dieser gesamte Prozess ist schematisch in Abbildung 4.4 abgebildet.

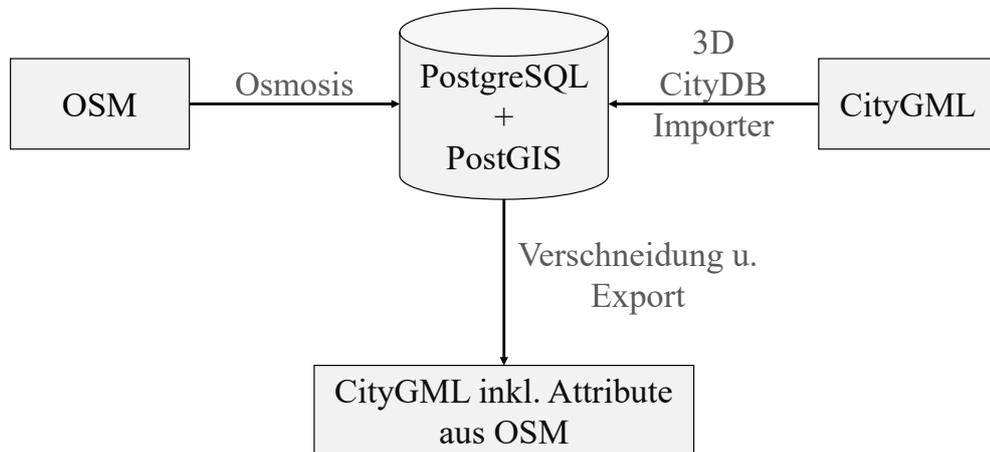


Abbildung 4.4: Nutzung einer PostgreSQL Datenbank zur Zusammenführung von Daten aus OSM und CityGML Quellen

Eine weitere Information, die in CityGML Dateien oft fehlt oder ungenau ist, ist das Baujahr, also das Attribut *yearOfConstruction* bzw. das Sanierungsjahr mit dem Attribut *yearOfRefurbishment*. Hierfür gibt es in OSM verschiedene Attribute wie *start_date*, *year_of_construction* oder *year_built*. Davon ist das Attribut *start_date* mit 4,48 % das am Häufigsten verwendete im Zusammenhang mit dem key *building*. Jedoch kann das *start_date* sowohl für das Baujahr des Gebäudes als auch z.B. das Eröffnungsjahr des darin befindlichen Geschäfts stehen. 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 TagInfo² von OSM eingesehen werden. Mithilfe eines von Almendros-Jiménez entwickelten Webtools [7] zur Analyse der in OSM hinterlegten Tags wurden die Gebäude im Untersuchungsgebiet analysiert. Das einzige zur Analyse auswählbare, d.h. vorhandene, Attribut im Zusammenhang mit dem Baujahr ist *start_date*, welches bei 99,3 % der Gebäude fehlt.

² <https://taginfo.openstreetmap.org/>

Das zeigt, dass OSM bei den Attributen *yearOfConstruction* sowie *yearOfRefurbishment* keine geeignete Quelle ist. Es sind also andere Quellen nötig, um fehlende Baujahre in einer CityGML zu ergänzen. Darauf wird im Folgenden näher eingegangen.

Attribut *yearOfConstruction*

Ähnlich wie auch beim Attribut *function*, kann auch das Attribut *yearOfConstruction* in den vorliegenden CityGML Dateien entweder komplett fehlen, nur für einen Teil der Gebäude verfügbar oder aber auch teilweise oder komplett fehlerhaft sein.

Um das Problem der fehlenden Information über Gebäudebaujahre zu lösen, wurden zwei verschiedene Datenquellen sowie Methoden untersucht, wie die fehlenden Baujahre den Gebäuden zugeordnet werden können [171]. Die im Folgenden beschriebenen Methoden werden in Kapitel 5.1 auf eine Fallstudie angewandt. In Abbildung 4.5 wird der Prozess veranschaulicht, um neue CityGML Dateien inkl. Gebäudebaujahren aus zwei verschiedenen Datenquellen zur Wärmebedarfsberechnung zu erzeugen.

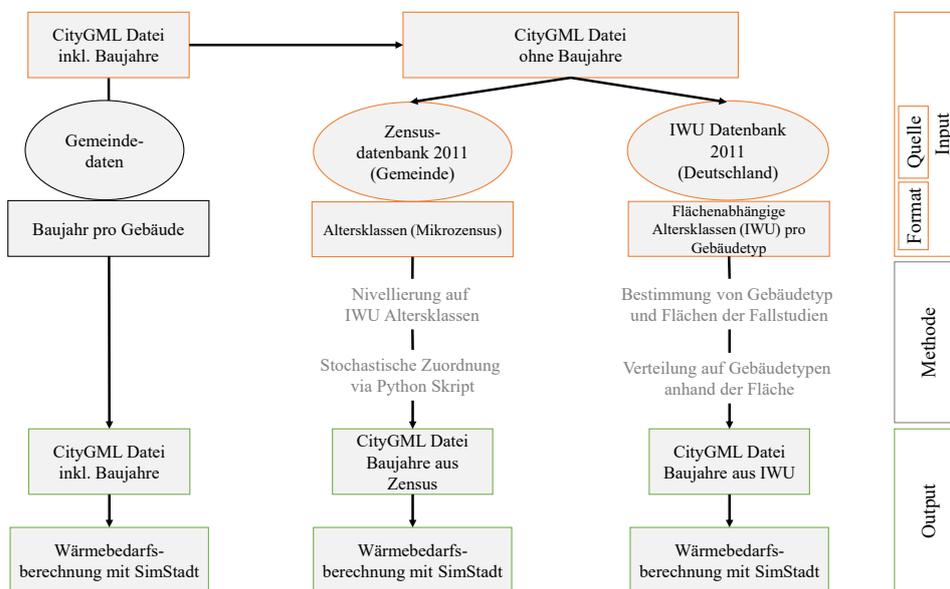


Abbildung 4.5: Vorgehen zur Zuordnung der Gebäudealtersklassen in der CityGML Datei bei verschiedenen Datenquellen

Die Ergebnisse sowohl der Zuordnung der Baujahre zu den Gebäuden in der CityGML als auch die daraus resultierenden Wärmebedarfsermittlungen in SimStadt können mit einem Referenzfall verglichen werden. Für das hier betrachtete Beispielgebiet liegen die Informationen zu den tatsächlichen Baujahren der Gebäude in der CityGML Datei vor (CityGML Datei inkl. Baujahre). Für die vorliegende Analyse wurden diese Daten aus der CityGML Datei entfernt (CityGML Datei ohne Baujahre).

Um die CityGML Dateien nun wieder mit Daten zum Baujahr aus anderen Quellen anzureichern, wurden zum einen Informationen aus der Zensus-Datenbank des Zensus 2011³ genutzt, zum anderen aus der deutschen Wohngebäudetypologie des IWU [105], die ebenfalls auf dem Zensus 2011 aufbaut. Im Zensus werden Daten für einzelne Gemeinden dargestellt, die IWU-Datenbank beinhaltet dagegen durchschnittliche Werte für ganz Deutschland. In der Zensus-Datenbank sind alle Gebäude in die Altersklassen des Mikrozensus eingeteilt. In der IWU-Datenbank hingegen weicht das Format der Altersklassen leicht von den Klassen des Mikrozensus ab, wie in Tabelle 4.1 zu sehen.

Da in SimStadt bzw. in der Gebäudephysik-Bibliothek die Altersklassen aus der IWU-Typologie genutzt werden, werden die Daten aus dem Zensus 2011 auf das Format der IWU-Klassen nivelliert. Dazu wird die Anzahl der Gebäude in jeder Mikrozensus-Klasse gleichmäßig auf jedes Jahr der Klasse verteilt. Anschließend werden die einzelnen Jahre wieder zu den Altersklassen nach IWU aggregiert. Die Daten liegen nun in einer Tabelle vor, in der jede IWU-Altersklasse mit Start- und Endjahr sowie der Anzahl der Gebäude für den jeweiligen Anwendungsfall in dieser Altersklasse angegeben ist. Es wird ein vorhandenes Python Skript genutzt, um mittels der in der Tabelle vorhandenen Daten allen Gebäuden in der CityGML Datei zufällig ein Baujahr zuzuweisen. Da die Zuordnung der Baujahre hier nicht auf Grund von weiteren Parametern wie Gebäudetyp und / oder Wohnfläche erfolgen kann sondern rein zufällig erfolgt, werden mit dem Python Skript zwei neue CityGML Dateien erzeugt, bei denen die Zuordnung der Baujahr zu den einzelnen Gebäude jeweils unterschiedlich ist. Somit kann der Einfluss der zufälligen Zuteilung der Baujahre auf den Heizwärmebedarf untersucht werden.

³ <https://ergebnisse.zensus2011.de>

Tabelle 4.1: Vergleich der Altersklassen im Mikrozensus und in der IWU-Datenbank

Mikrozensus	IWU-Datenbank	
	vor 1860	A
vor 1919	1861-1918	B
1919-1948	1919-1948	C
1949-1978	1949-1957	D
	1958-1968	E
	1969-1978	F
1979-1986	1979-1983	G
1987-1990	1984-1994	H
1991-1995		
1996-2000	1995-2001	I
2001-2004	2002 und später	J
2005-2008		
2009 und später		

Ein weiterer Unterschied zwischen den beiden Datenquellen ist, dass in der Statistik der IWU-Datenbank nach Gebäudetypen (EFH, RH, MFH, GMH, HH) unterschieden wird, sowie für jede Altersklasse eines Gebäudetyps der Anteil an der gesamten beheizten Wohnfläche dieses Gebäudetyps angegeben wird wie in Abbildung 4.6 dargestellt.

Für die Zuordnung der Daten aus der IWU-Datenbank zu den Gebäuden des Beispielgebietes muss also zunächst für jedes Gebäude der Gebäudetyp sowie die beheizte Fläche mit SimStadt bestimmt werden (siehe Kapitel 3.4). Über eine Zielfunktion wird anschließend nacheinander so vielen Gebäuden eines Gebäudetyps eine bestimmte Baualtersklasse zugewiesen, bis der Anteil laut Abbildung 4.6 erreicht ist. So wird immer weiter verfahren, bis alle Gebäude ein Baujahr zugewiesen bekommen haben. Anschließend wird mithilfe eines weiteren vorhandenen Python Skripts diese Information in die CityGML Datei geschrieben.

Nun liegen also vier verschiedene CityGML Dateien jeder Fallstudie vor:

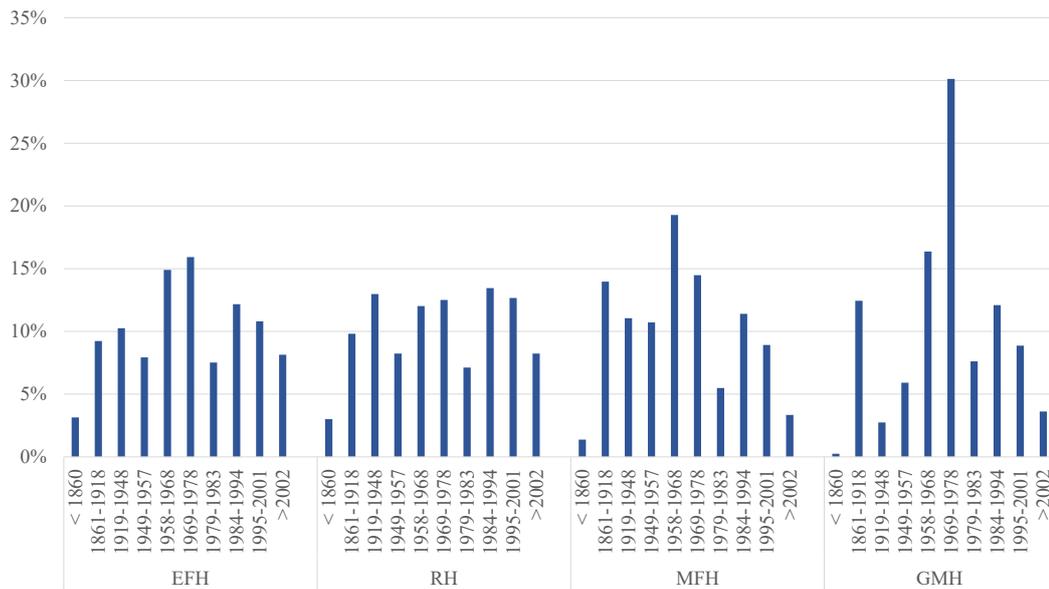


Abbildung 4.6: Verteilung der beheizten Wohnfläche nach Gebäudetyp und Baualtersklassen in Deutschland nach IWU-Typologie [105]

- CityGML mit Baujahren der Gemeinde (Referenzfall),
- CityGML mit Baujahren aus dem Zensus 2011 (Durchlauf 1),
- CityGML mit Baujahren aus dem Zensus 2011 (Durchlauf 2),
- CityGML mit Baujahren zugeordnet aus der IWU-Datenbank.

Die beschriebenen Daten der Gemeinde, ebenso wie die Daten aus Zensus und IWU Datenbank erhalten nur das Baujahr der Gebäude, nicht aber Angaben über eventuelle Sanierungen. Bei Gebäuden, die älter als 50 Jahre sind, kann man davon ausgehen, dass zumindest Teile der Gebäudehülle inzwischen saniert wurden.

4.1.2 Ergänzung und Veränderung der CityGML Datei

Das in Kapitel 3.3 beschriebene CityGML Format wurde nicht speziell für die urbane Gebäudesimulation entwickelt und weist daher in manchen Aspekten Herausforderungen bei der Nutzung für diesen Zweck auf. Durch die Veränderung von konkreten CityGML Dateien zur besseren Nutzung in der energetischen Simulation kann man diese jedoch teilweise ausgleichen [26].

Ein CityGML Modell zur Darstellung von urbanen Umgebungen besteht in der Regel aus einer Anzahl von Gebäuden (*building*), die aus Gebäudeteilen (*buildingPart*) zusammengesetzt sein können. Diese werden vor allem dann verwendet, wenn z.B. eine Erweiterung an ein bestehendes Hauptgebäude angebaut wird, welche dann mit einem anderen Baujahr und / oder einer abweichenden Nutzung als das bestehende Gebäude attribuiert wird. Außerdem kann die Aufteilung eines Gebäudes in mehrere Gebäudeteile bei verschiedenen Gebäudehöhen oder anderen Besonderheiten der Geometrie sinnvoll sein. In manchen Modellen jedoch wird diese Struktur nicht eingehalten bzw. anders verwendet als eigentlich vorgesehen (siehe Abbildung 3.5 in Kapitel 3.3).

Diese Problematik zeigt sich vor allem bei der Betrachtung von Reihenhäusern. In Abbildung 4.7 links oben sind Reihenhäuser aus einem Wohngebiet in Stuttgart im CityGML Modell zu sehen, bei dem jedes Gebäude als ein *buildingPart* modelliert ist. Links unten ist die 2D GIS Karte der Stadt Stuttgart zu sehen, bei der jedes der Reihenhäuser anhand der Hausnummer und Flurstücksbegrenzung deutlich erkennbar ist.

Für die energetische Simulation ist es äußerst relevant, ob rechts, links oder beidseitig zum betrachteten Gebäude ein weiteres Haus über eine adiabatische Wand anschließt. Wenn also ein Reihemittelhaus als eigenes *building* statt als *buildingPart* der gesamten Reihe an Reihenhäusern betrachtet wird, wird die Fläche der thermischen Außenhülle je nach Gebäudegeometrie um 40 - 60 % überschätzt. Bei Reihenendhäusern reduziert sich dieser Wert auf 20 - 30 %. Analog gilt dies auch für die Fensterfläche, da diese in einem LOD2 Modell nicht enthalten ist und daher aufgrund eines Wand-zu-Fenster-Verhältnisses errechnet werden kann. Daraus ergibt sich in der Simulation ein erhöhter Heizwärmebedarf aufgrund von als zu hoch angenommenen Transmissionswärmeverluste.

Ein weiteres Problem, das bei der Nutzung von CityGML Dateien vorkommen kann, ist das Fehlen des Geländeprofiles (englisch Terrain Intersection Curve (TIC)), welches in Abbildung 4.7 oben blau zu sehen ist.

Das Geländeprofil beschreibt den Verlauf des Geländes über verschiedene Höhenlagen. Dabei schneidet es i.d.R. die im Modell vorhandenen Gebäude und definiert so den Teil des Gebäudes, der oberhalb der Geländekante liegt und somit für die

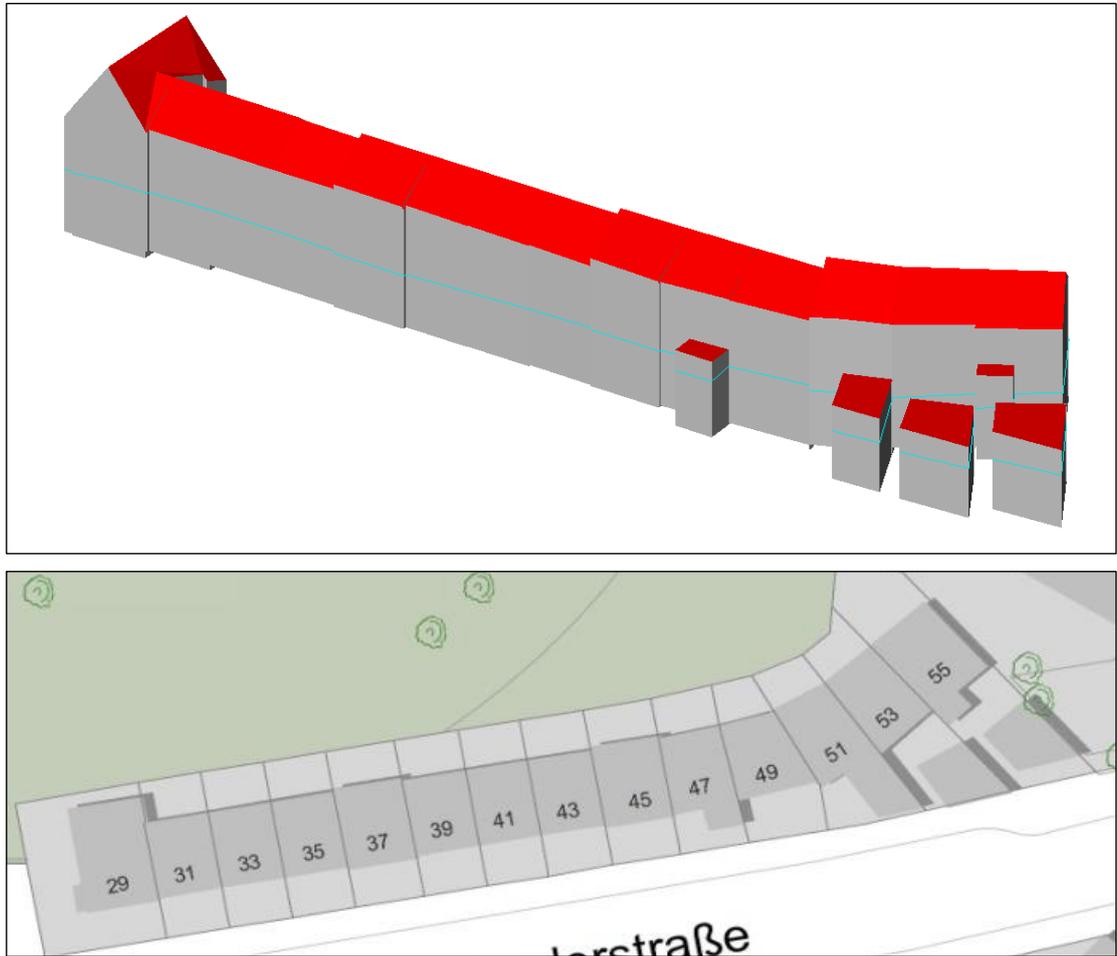


Abbildung 4.7: Darstellung von Reihenhäusern im verwendeten CityGML Modell (oben) und in der online Karte von gis6.stuttgart.de/maps (unten)

Berechnung des beheizten Volumens herangezogen wird (der Teil des Gebäudes, der unter der Geländekante liegt, wird als ungeheizter Keller angenommen). So ist vor allem in hügeligem Gelände das Vorhandensein und die Richtigkeit dieser Linie sehr wichtig.

Es kann auch vorkommen, dass nach Hinzufügen des Geländeprofiles ein deutlich zu großes Volumen unterhalb der Geländekante vorhanden ist. Dies kann dadurch erklärt werden, dass bei den verwendeten Modellen alle Gebäude, die z.T. ausschließlich zur Visualisierung der Gebäude erstellt wurden, bis auf ein gemeinsames Niveau nach unten „verlängert“ werden. Da jedoch der Keller in

der Regel bei allen Gebäudetypen und -nutzungen als ungeheizt angenommen wird, wirkt sich diese Tatsache nicht auf die Berechnung des Heizwärmebedarfs des Gebäudes aus.

Wenn die TIC allerdings im CityGML Modell komplett fehlt, also keine Unterscheidung zwischen über- und unterirdischem Teil des Gebäudes möglich ist, kann das berechnete beheizte Volumen stark überschätzt werden. Durch eine Plausibilitätsprüfung der Simulationsergebnisse sowie einen visuellen Abgleich von errechneter Gebäudehöhe und Stockwerksanzahl mit Satellitenbildern oder optionalen Vor-Ort-Begehungen kann festgestellt werden, ob im Modell eventuell die TIC fehlt und daher hinzugefügt werden muss.

4.1.3 Stündliche Warmwasserprofile für Wohngebäude mit DHWcalc und SimStadt

In der Regel liegt der Fokus bei Simulationen von Stadtquartieren auf dem Energiebedarf für Raumwärmeerzeugung, und nicht auf dem Energiebedarf zur Erzeugung von Trinkwarmwasser. Der Trinkwarmwasserbedarf wird in vielen Modellen daher vereinfacht als Kennwert in Form eines konstanten Bedarfs, abhängig von der Nutzfläche des Gebäudes oder der Anzahl der im Gebäude wohnenden oder arbeitenden Personen angenommen (siehe Agugiaro et al. [2] und Li et al. [102]). Teilweise wird auch die Energie für die Warmwasserbereitung in den Modellen überhaupt nicht berücksichtigt (siehe Bahu et al. [9] und Reinhart u. Cerezo Davila [126]), sondern ausschließlich auf den Raumwärmebedarf fokussiert.

Der Trinkwarmwasserbedarf hat den zweitgrößten Anteil am Gesamtenergiebedarf von Gebäuden, nach dem Bedarf für Raumwärmeerzeugung, und ist daher ein wichtiger Faktor bei der Simulation des Gesamtenergiebedarfs in Gebäuden. In den Niederlanden werden 23 % des Gasbedarfs in Haushalten zur Erzeugung von Trinkwarmwasser genutzt, im Vereinigten Königreich liegt der Anteil des Trinkwarmwassers am Primärenergiebedarf bei 24 % [167], wobei dieser Anteil bei neu gebauten Gebäuden aufgrund der besseren Gebäudehülle und dem dadurch reduzierten Raumwärmebedarf auf bis zu 50 % ansteigt [73]. Dieser Trend ist auch bei Zeisberger [170] in Abbildung 4.8 für den spezifischen Endenergieverbrauch in Deutschland zu sehen. Hier werden die Anteile der verschiedenen

Anwendungen (Haushaltsstrom, Lüfterstrom, Warmwasser und Heizung) am Gesamtenergiebedarf für verschiedene Baustandards aufgezeigt. In Gebäuden, die vor der Wärmeschutzverordnung von 1984 gebaut wurden, hat die Trinkwassererwärmung nur einen Anteil von 11 % am Gesamtenergiebedarf. In den neueren Gebäuden, die seit der Einführung der EnEV 2002 erbaut wurden, steigt dieser Anteil auf 19 bzw. 20 % beim Passivhaus-Standard. Der Warmwasserenergiebedarf hat dadurch den zweitgrößten Anteil. Gleichzeitig sinkt der Gesamtenergiebedarf stetig bei steigendem Gebäudestandard. Darüber hinaus spielt der Energiebedarf zur Warmwasserbereitung in Regionen, die aufgrund der geographischen Lage und der klimatischen Bedingungen einen im Vergleich zu Deutschland und Zentraleuropa geringen Raumwärmebedarf haben, eine übergeordnete Rolle [60]. Ähnliche Auswirkungen hat auch der Klimawandel und damit einhergehende wärmere Sommer z.B. in Mitteleuropa auf den Gesamtwärmebedarf. Rossknecht [132] beschreibt die Auswirkungen der vorhergesagten Veränderungen in der Außentemperatur für 2030 und 2050 auf den Wärmebedarf der Stadt Helsinki, die eine Reduktion von 6 bzw. 11 % bedeuten würden.

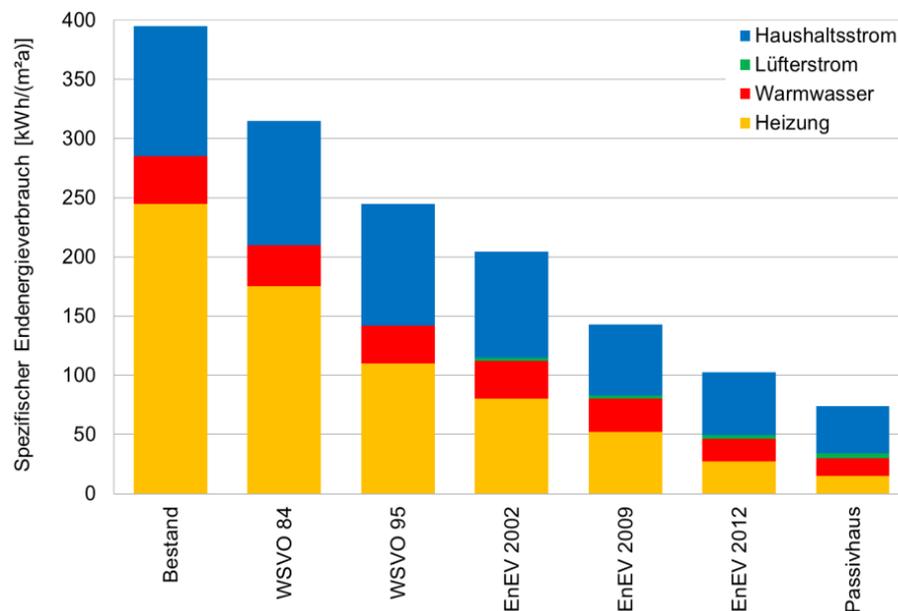


Abbildung 4.8: Spezifischer Endenergieverbrauch in Deutschland, getrennt nach Anwendung [170]

Um die Notwendigkeit einer differenzierteren Betrachtung des Trinkwarmwasserbedarfs zu zeigen, wurden mithilfe von DHWcalc mehrere, stündlich aufgelöste Profile für verschiedene Einfamilien-, Mehrfamilien- und große Mehrfamilienhäuser erstellt [160]. Dabei wurde ein Warmwasserverbrauch von 160 l/d pro Haushalt angenommen. Dieser Wert stellt den durchschnittlichen täglichen Warmwasserbedarf eines Haushalts in Deutschland laut dem Abschlussbericht des Annex 42 der International Energy Agency IEA [15, 92] dar.

Um die Anzahl der Haushalte pro Gebäude festzulegen, wird die für Deutschland mittlere Wohnungsgröße von 91,9 m² [143] genutzt und mit der in SimStadt berechneten beheizten Fläche der Gebäude verrechnet. Dabei wurde jeweils auf ganze Haushalte auf- bzw. abgerundet.

Die mit DHWcalc erstellten Profile sind in der Einheit Liter pro Stunde und müssen für die weitere Verwendung zur Berechnung des Trinkwarmwasserbedarfs in kWh umgerechnet werden. Dafür wird die folgende Formel 4.1 genutzt:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\vartheta \quad (4.1)$$

mit

- Q Wärmemenge [kJ]
- m Masse [kg]
- c spezifische Wärmekapazität [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$]
- $\Delta\vartheta$ Temperaturdifferenz [K]

Dabei wird von einem Temperaturunterschied zwischen Eingangs- und Zieltemperatur des Wassers von 30 K ausgegangen. Diese Differenz errechnet sich aus einer Eingangs-Wassertemperatur von 15 °C und einer Zieltemperatur von 45 °C.

In Abbildung 4.9 ist der mittlere Lastgang des Warmwasserbedarfs für ein Mehrfamilienhaus mit acht Haushalten zu sehen. Das Profil wurde mit DHWcalc und den dort hinterlegten Standard-Annahmen zur Wahrscheinlichkeit für Zapfereignisse erstellt sowie mit den oben genannten Annahmen und Formel 4.1 in ein Lastprofil mit der Einheit kWh umgerechnet. In der Abbildung werden Werk-

(blau) und Wochenendtage (grün) unterschieden. Zusätzlich zu sehen ist der konstante, flächenabhängige Bedarf (orange). Der Kennwert wurde angepasst an die aus DHWcalc abgeleiteten Profile, so dass die mittlere gesamte Energiemenge zur Trinkwarmwassererwärmung jeweils gleich ist.

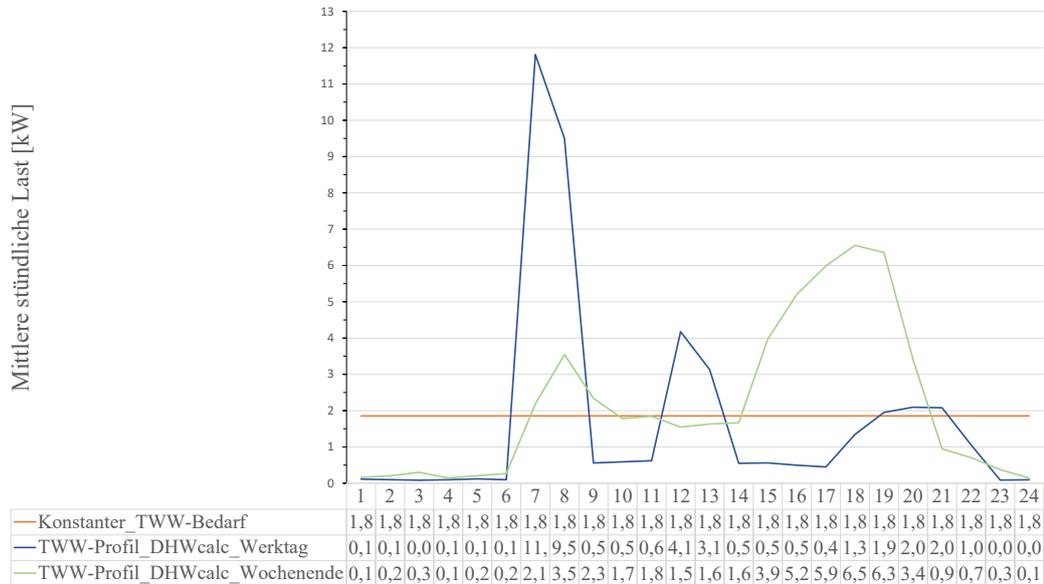


Abbildung 4.9: Vergleich des Verlaufs des Warmwasserbedarfs bei Annahme eines konstanten Bedarfs sowie einem Bedarfsverlauf aus den DHWcalc Profilen für Werktag und Wochenende für ein Mehrfamilienhaus

Man erkennt, dass der Bedarf mit einem konstanten Profil an einem durchschnittlichen Werktag vormittags um das bis zu sechsfache unterschätzt wird. An Wochenendtagen wird er am Nachmittag um das bis zu dreifache unterschätzt. Darüber hinaus wird der Bedarf in den Nachtstunden mit einem konstanten Profil stark (bis zu um das elffache) überschätzt. Hier sind allerdings die absoluten Unterschiede kleiner, was daran liegt, dass die Annahmen zur Wahrscheinlichkeitsverteilung zu Zapfereignissen in den Nachtstunden in DHWcalc nur knapp über null liegen.

Um zu sehen, wie sich die 365 einzelnen Tages-Profile, die aus den stündlichen Werten in DHWcalc generiert werden, unterscheiden, wurden sie in Abbildung 4.10 übereinander visualisiert. Dabei erkennt man, dass sich die tägliche Spitze am Morgen der Werktage auf die beiden Stunden um 7 Uhr und 8 Uhr aufteilt. Darüber hinaus ist eine Häufung von niedrigeren Spitzen um die Mittagszeit zu erkennen sowie eine breite Streuung von erhöhten Werten am Nachmittag.

Außerdem sieht man, dass der Warmwasserbedarf in der Nacht zwar meist bei null oder nahe null liegt, es in manchen Stunden des Jahres jedoch auch nachts einen gering über null liegenden Warmwasserbedarf gibt.

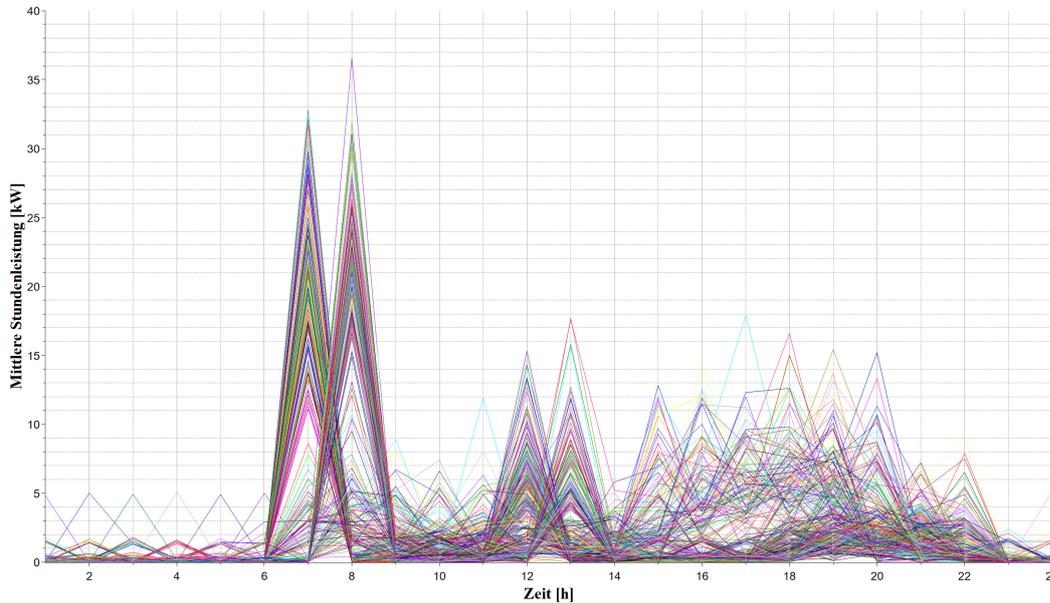


Abbildung 4.10: 365 stündlich aufgelöste Warmwasserprofile für ein Jahr

Um die Relevanz von detaillierten Warmwasserprofilen auch im Zusammenhang mit dem Raumheizwärmebedarf zu zeigen, ist in Abbildung 4.11 die Summe der Bedarfe im Tageslastprofil zu sehen, jeweils für die beiden untersuchten Methoden zur Trinkwarmwasserbedarfsberechnung. Bei der Berechnung mit DHWcalc wird zwischen Werktag und Wochenendtag unterschieden.

Dabei wurde der Heizwärmebedarf des zuvor beschriebenen Mehrfamilienhauses mit SimStadt simuliert und mit dem in Kapitel 3.2 dargestellten Verfahren in Stundenwerte umgerechnet. Das hier betrachtete Gebäude ist ein unsaniertes Mehrfamilienhaus aus dem Jahr 1975 mit acht Haushalten und einem simulierten spezifischen Heizwärmebedarf von 106 kWh/m². Es ist ein typisches Gebäude in einem urbanen Stadtquartier in Deutschland und wurde daher für die Betrachtungen ausgewählt. Bei der Summierung von Heizwärmebedarf und Warmwasserbedarf sind die zuvor beschriebenen Spitzen des Warmwasserprofils aus DHWcalc ebenfalls zu sehen, d.h. die Auswirkungen der unterschiedlichen Berechnungsme-

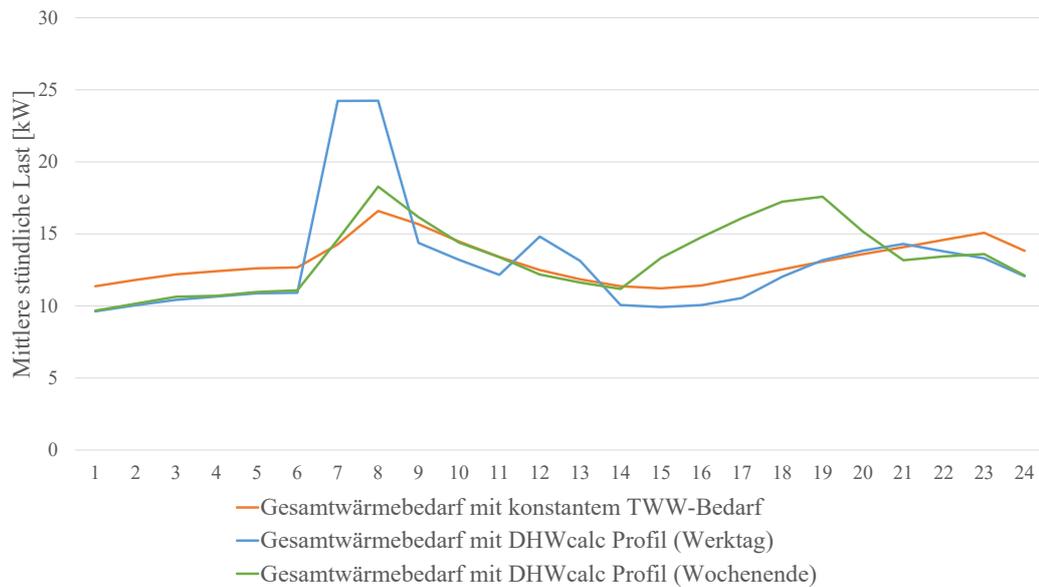


Abbildung 4.11: Vergleich des Gesamtwärmebedarfs eines MFHs bei konstantem WW-Bedarf (orange) und WW-Bedarf aus den DHWcalc Profilen (blau für Werktage und grün für Wochenendtage)

Methoden des Trinkwarmwasserbedarfs sind im Verlauf der Gesamtwärmebedarfs erkennbar.

Um die Methodik und die Relevanz der stündlich aufgelösten Profile des Trinkwarmwasserbedarfs nicht nur auf Gebäudeebene sondern auch auf Quartiersebene zu zeigen, wurde der Analyserahmen auf einen Gebäudeblock von zehn Wohngebäuden ausgeweitet. Diese zehn Gebäude unterscheiden sich in Baujahr, Anzahl der Haushalte (HaH) und Größe. Details finden sich in Tabelle 4.2, wo ebenfalls für jedes Gebäude der Heizwärme (HW)- und Trinkwarmwasser (TWW)-Bedarf aufgezeigt sind.

Geometrie und Wärmebedarf der Gebäude wurden mit SimStadt simuliert, der Trinkwarmwasserbedarf wurde mit DHWcalc berechnet. Aus dem für jedes Gebäude berechneten Verhältnis von Heizwärme- und Trinkwarmwasserbedarf kann man erkennen, dass vor allem bei den Gebäuden mit Baujahr 2006 der Trinkwarmwasserbedarf einen großen Teil des Gesamtwärmebedarfs ausmacht.

Abbildung 4.12 vergleicht die Ergebnisse der beiden zuvor beschriebenen Methoden zur Trinkwarmwasserbedarfsberechnung jeweils addiert zum simulier-

Tabelle 4.2: Gebäudeinformationen und Simulationsergebnisse für zehn Gebäude eines Gebäudeblocks

Anzahl HaH	Bau- jahr	Grund- fläche m ²	Beheizte Fläche m ²	HW- Bedarf kWh	TWW- Bedarf kWh	HW: TWW	Gesamt- bedarf kWh
1	2006	71	101	10.945	2.031	5:1	12.976
3	2006	79	312	13.868	6.094	2:1	19.962
4	1953	172	390	63.585	8.124	8:1	71.710
4	1955	92	393	56.347	8.124	7:1	64.472
7	2006	210	629	29.531	14.218	2:1	43.749
8	1965	161	748	96.339	16.248	6:1	112.587
11	1955	193	992	116.809	22.343	5:1	139.152
12	1977	217	1143	115.829	24.374	5:1	140.203
13	2006	346	1195	43.896	26.405	2:1	70.301
20	2006	396	1845	125.726	40.623	3:1	166.346

ten Heizwärmebedarf des Quartiers von zehn Gebäuden für ein ganzes Jahr in stündlicher Auflösung ($HW+TWW_p$ (mit p für Profil) und $HW+TWW_k$ (mit k für konstant)). Außerdem ist jeweils die Jahresdauerlinie abgebildet. Bei Verwendung des konstanten Trinkwarmwasserbedarfs (analog zu oben wird hier die Summe des Trinkwarmwasserbedarfs aus den DHWcalc Profilen genommen und über 8760 Stunden konstant verteilt) wird das Lastprofil des Heizwärmebedarfs um den konstanten Wert von 19,2 kWh nach oben verschoben. Die Jahresdauerlinie des Gesamtwärmebedarfs nähert sich null, bleibt dann aber konstant bei 19,2 kWh. Die Spitzenlast steigt leicht von 395,4 kW ohne Warmwasserbedarf auf 414,6 kW für die Summe aus Heizwärmebedarf und Trinkwarmwasserbedarf.

Bei Verwendung des Trinkwarmwasserbedarfs aus den mit DHWcalc generierten Profilen dagegen ist eine deutliche Veränderung des Verlaufs des Gesamtwärmebedarfs sichtbar. Die Spitzen des Trinkwarmwasserbedarfs vor allem in den Morgenstunden am Werktag sind im Jahresverlauf erkennbar, insbesondere im Sommer wenn kein Heizwärmebedarf vorhanden ist. Die Spitzenlast steigt deutlich auf 611,5 kW.

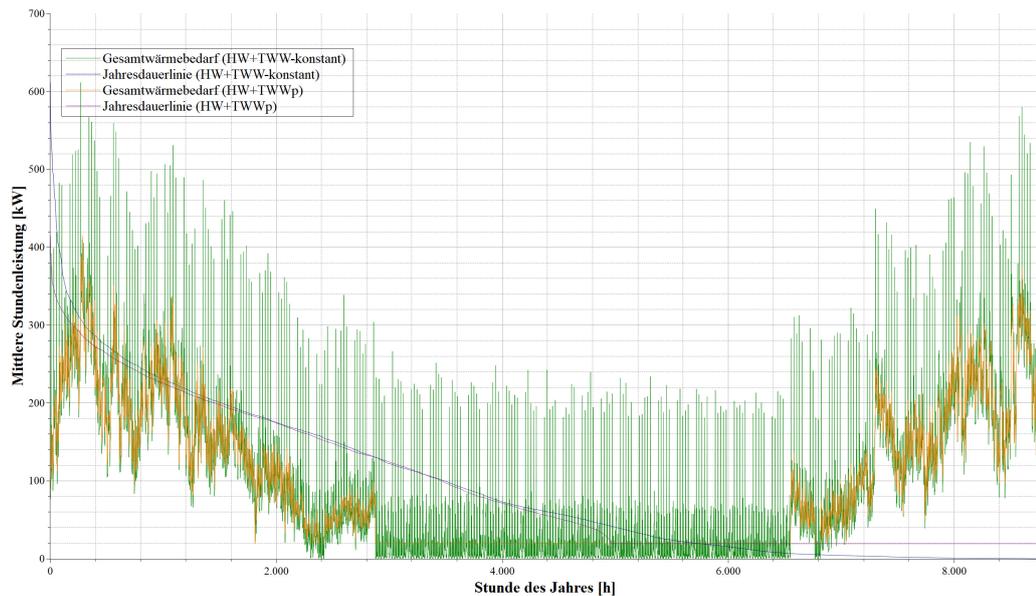


Abbildung 4.12: Jahresverlauf des Gesamtwärmebedarfs bei Verwendung eines konstanten TWW-Bedarfs sowie bei Verwendung eines mit DHWcalc generierten TWW-Profiles

Um für jedes Wohngebäude eines beliebig großen Quartiers ein individuelles Profil aus DHWcalc erzeugen zu können, muss dessen Erstellung und Berechnung automatisiert werden. Alternativ zur Nutzung der in Kapitel 3.5 beschriebenen manuellen Vorgehensweise, kann die von DHWcalc benötigte .ini Datei auch unabhängig vom Tool erzeugt werden. Dabei sind Parameter wie Gebäudetyp, Anzahl der Haushalte oder mittleres tägliches Gesamt-Zapfvolumen anzugeben. Diese können im SimStadt Workflowschritt aus dem vorangegangenen Preprocessing (siehe Kapitel 3.4) übernommen werden und stehen damit individuell für jedes Gebäude zur Verfügung. Andere Parameter wie Zeitschritt, Dauer des Profils oder Angaben zur Verteilung der Wahrscheinlichkeiten bleiben für alle Gebäude gleich.

Die beschriebene Methode zur Berechnung des Trinkwarmwasserbedarfs mit DHWcalc ist nur für Wohngebäude geeignet. Für Nichtwohngebäude werden Kennwerte aus der DIN V 18599-10 [54] zur Berechnung übernommen. Mit den Werten des personenbezogenen Energiebedarfs für Trinkwarmwasser sowie Kennzahlen zu täglichen Nutzungsstunden, jährlichen Nutzungstagen sowie Personenbelegung abhängig von der Nutzungsart, kann basierend auf der aus SimStadt

verfügbaren Fläche für die entsprechenden Nichtwohnnutzungen der Trinkwarmwasserbedarf in stündlicher Auflösung für ein Jahr berechnet werden.

4.2 Datenmodelle und Entwicklung von Bibliotheken für die automatisierte Simulation

4.2.1 Energiesystemkomponenten-Bibliothek

Um die automatische Parametrisierung von Simulationsmodellen zu ermöglichen, wird ein Datenmodell zur Speicherung und Verwaltung der erforderlichen Daten benötigt, welches inhaltlich und strukturell zu den Simulationsmodellen passt und dadurch Informationen an diese weitergeben kann. Die sich aus dem Datenmodell ergebende Datenbank enthält die Komponenten-Informationen, die für die Ausführung der Simulationsmodelle benötigt werden. Die Simulationsmodelle und deren Parametrisierung selbst werden im nachfolgenden Kapitel 4.3 beschrieben.

Die Bibliothek wird im Rahmen dieser Arbeit komplett unabhängig von SimStadt als *stand-alone* Anwendung entwickelt, d.h. das Modell und die Benutzeroberfläche können entweder eigenständig verwendet oder aber mit einem Simulationstool verknüpft werden, wie in diesem Fall mit SimStadt.

Für die Erstellung der Energiesystemkomponenten-Bibliothek wird die objektorientierte Modellierung mit der Unified Modeling Language (UML) genutzt. Zum einen ist damit die visuelle Darstellung des Modells gut verständlich und auch nachträglich erweiterbar, zum anderen ist die Kompatibilität zu objektorientierten Programmiersprachen wie Java gegeben.

Generell geht es bei der Modellierung um eine Abstraktion der Realität, die Verallgemeinerung und um das Erkennen von Gemeinsamkeiten [10]. Den Begriff des *Modells* definiert Stachowiak [141] bereits 1973 über die drei folgenden Merkmale:

- Abbildung: „Ein Modell ist immer ein Abbild von etwas (...).“

- Verkürzung: „Ein Modell erfasst nicht alle Attribute des Originals, sondern nur diejenigen, die dem Modellierer (...) relevant erscheinen.“
- Pragmatismus: „Die Zuordnung eines Modells zum Original wird durch die Fragen *Für wen?*, *Warum?* und *Wozu?* getroffen.“

Modelle können grundsätzlich als Skizze, Blaupause oder ausführbare Programme verwendet werden [68]. In der vorliegenden Arbeit wird das Modell als ausführbares Programm genutzt, was bedeutet, dass aus dem Modell automatisch Code generiert werden kann und die entsprechenden Spezifikationen dazu bereits vorliegen.

UML kann universell verwendet werden und stellt Modelle grafisch in Form von verschiedenen Diagrammen dar. Dabei unterscheidet UML zwischen insgesamt 14 Struktur- und Verhaltensdiagrammen, die in Abbildung 4.13 dargestellt sind. Strukturdiagramme fokussieren dabei auf den Aufbau und die Struktur eines Systems, das dynamische Verhalten seiner Elemente wird nicht berücksichtigt. Im Gegensatz dazu definieren Verhaltensdiagramme das Verhalten sowie daraus folgende Zustandsänderungen von Objekten. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Diagramme findet sich u.a. bei Seidl et al. [136]. Im Folgenden wird nur auf das in der vorliegenden Arbeit genutzte Klassendiagramm und dessen hier relevanten Funktionen eingegangen.

Eine allgemeine Darstellung der im Folgenden beschriebenen Beziehungen und Eigenschaften sind in der Abbildung 4.14 zu sehen.

Bei Klassendiagrammen werden *Klassen* definiert, die Instanzen einer Klasse sind *Objekte*. Sie werden durch *Attribute* (Merkmale) und *Operationen* (Verhalten) genauer beschrieben. Dabei werden i.d.R. nicht alle bekannten Merkmale, sondern nur die für das System relevanten in das Modell aufgenommen, das Objekt wird also abstrahiert. Über Attribute werden die Informationen gespeichert, die für alle Objekte einer Klasse relevant und bekannt sind, sich aber je Objekt unterscheiden können. Zusätzlich muss definiert werden, was der *Typ* des Attributs ist. Typen können z.B. *Integer*, *String* oder eine *Enumeration* sein. Enumerationen sind Aufzählungen, welche die erlaubten Werte (*Literale*) dieses Attributs enthalten. Darüber hinaus kann für jedes Attribut ein *default* (Standardwert) angegeben werden, so

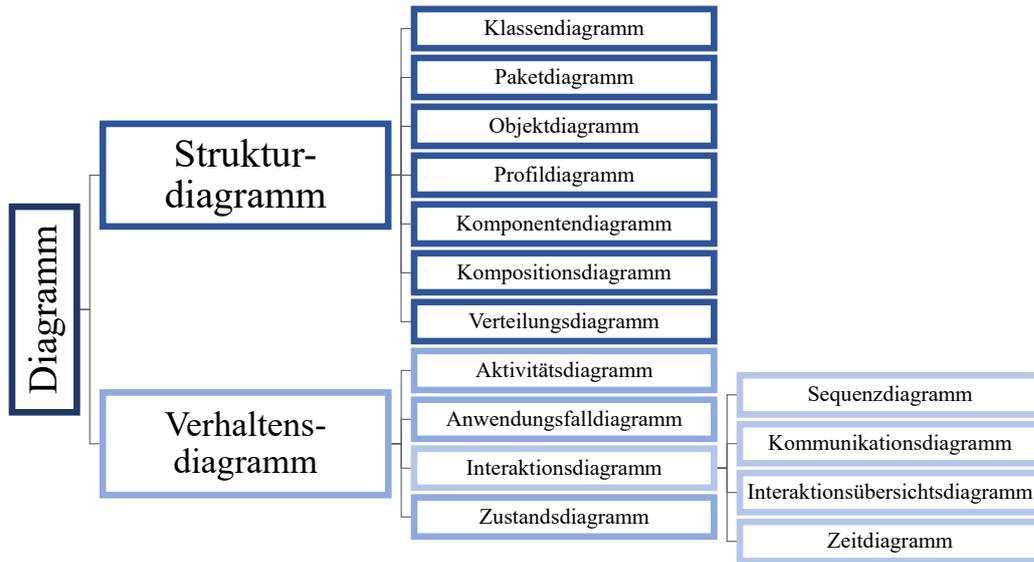


Abbildung 4.13: Übersicht der verschiedenen Typen von UML-Diagrammen (eigene Darstellung nach [136])

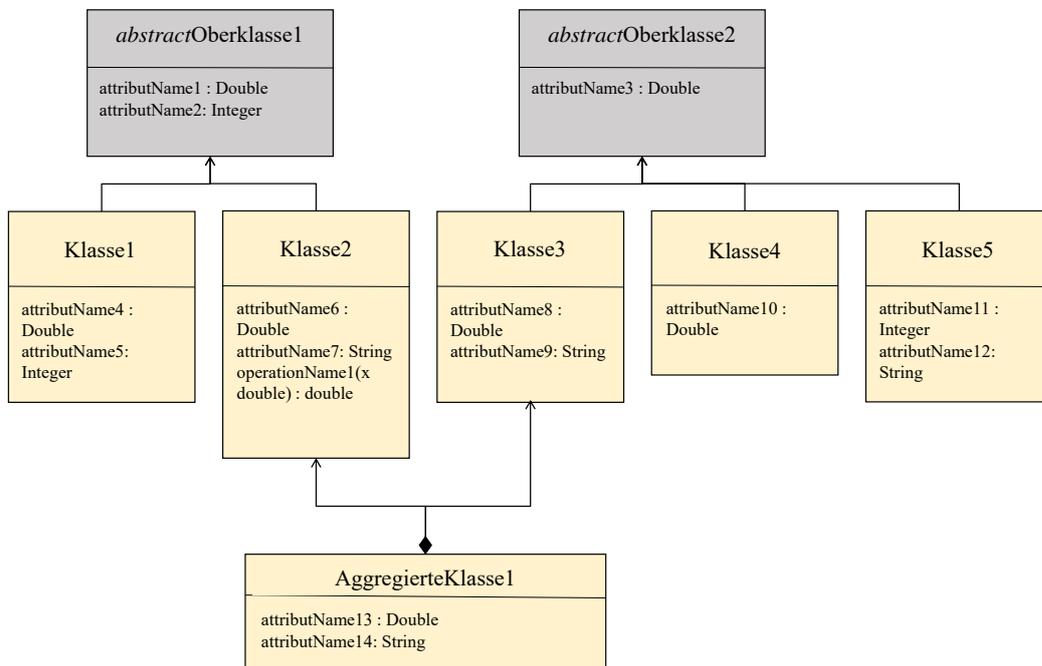


Abbildung 4.14: Allgemeines Beispiel eines Klassendiagramms

dass das Attribut zu keinem Zeitpunkt keinen Wert besitzt und etwa dadurch eine Berechnung nicht durchgeführt werden kann. Dies kann vor allem bei den Attributen sinnvoll sein, für die zwingend ein Wert angegeben sein muss.

Für jedes Attribut kann ein Intervall an Werten spezifiziert werden. Das angegebene Intervall wird durch Minimum und Maximum in eckigen Klammern definiert (z.B. [1..1] für genau einen Wert oder [0..*] für keinen bis beliebig viele Werte).

Gemeinsame Eigenschaften von mehreren Klassen können in Oberklassen zusammengefasst bzw. generalisiert werden. Dabei darf eine Klasse mehrere Oberklassen besitzen. Die Attribute und Operationen, die für eine Oberklasse spezifiziert sind, werden an ihre Subklassen vererbt. Jede Instanz der Subklasse ist damit auch eine Instanz der Oberklasse und besitzt ihre sämtlichen Attribute und Operationen. Die Subklasse kann noch zusätzliche Attribute und Operationen erhalten, die in der Oberklasse nicht definiert sind. Eine solche Beziehung wird im Diagramm durch einen Pfeil von der Subklasse zur Oberklasse dargestellt. Oberklassen können als abstrakt definiert sein, was bedeutet, dass es keine eigenen Instanzen dieser Klasse gibt, sondern nur von deren Subklassen. So können Hierarchien definiert werden und ein klar strukturierter Aufbau des Modells wird realisiert. Wiederholungen und Fehler können dadurch vermieden werden, es handelt sich um eine zunehmende Detaillierung von allgemeinen, übergeordneten Eigenschaften hin zu speziellen Eigenschaften für bestimmte Subklassen.

Darüber hinaus können Kompositionen definiert werden, die im Diagramm mit einem Pfeil und einer Raute an der Klasse, zu der die anderen Klassen aggregiert werden, dargestellt werden. Hiermit wird ausgedrückt, dass die Klassen Teil einer anderen Klasse sind. Die Attribute werden dabei nicht weitergegeben.

Viele der Konzepte des hier vorgestellten Klassendiagramms sind auch in objekt-orientierten Programmiersprachen vorhanden. Dadurch kann eine Übersetzung der Klassendiagramme in Java oder C++ i.d.R. automatisch erfolgen.

Datenmodell der Energiesystemkomponenten-Bibliothek

Eclipse ist eine *open-source* Software Umgebung, die weltweit von Millionen Menschen genutzt und entwickelt wird. Eine der Anwendungen der Umgebung ist Eclipse Modelling Tools, welches für die Entwicklung des Datenmodells im Rahmen dieser Arbeit genutzt wird. Das Eclipse Modeling Framework (EMF)⁴ ist ein Java Framework für die Modellierung und automatische Erzeugung von Quellcode aus Modellen auf Grundlage eines strukturierten Domänenmodells (Ecore Modell) in Form eines Klassendiagramms. Das Framework bietet Werkzeuge zur Erstellung von Java-Schnittstellen und Implementierungsklassen und zur Anzeige des Modells in einem einfachen Editor sowie verschiedenste plug-ins zur Anpassung von Modell und Editor. Der generierte Editor lässt den Nutzer Instanzen der Klassen des Modells erstellen, validieren, abfragen und exportieren. Für diesen Editor wird ein *Viewmodel* erstellt, welches das Aussehen des User-Interfaces definiert (siehe Kapitel 4.2.1).

In Abbildung 4.15 ist der zentrale Teil des Datenmodells der Bibliothek zu sehen. Die oberste Klasse ist die Bibliothek selbst, die aus verschiedenen Unterklassen besteht (Komposition), die unter anderem die einzelnen Komponenten beschreiben.

Jede der Klassen hat individuelle Attribute, welche die Instanzen der Klasse beschreiben. Wenn es Attribute gibt, die für mehr als eine Klasse benötigt werden, wird eine übergeordnete abstrakte Klasse eingefügt. Dies ist in Abbildung 4.15 links für die Klassen *CombinedHeatPower*, *Boiler* und *HeatPump* mit der übergeordneten Klasse *ThermalEnergyDevice* zu sehen. Diese Klasse enthält die Attribute *installedThermalPower*, *modulationRange* und *fuel*, die für alle drei Klassen gleichermaßen benötigt werden.

In der folgenden Tabelle 4.3 werden die Attribute und deren Charakterisierung für die *CombinedHeatPower* Klasse näher beschrieben.

⁴ <https://www.eclipse.org/modeling/emf/>

4.2 Datenmodelle und Entwicklung von Bibliotheken für die automatisierte Simulation

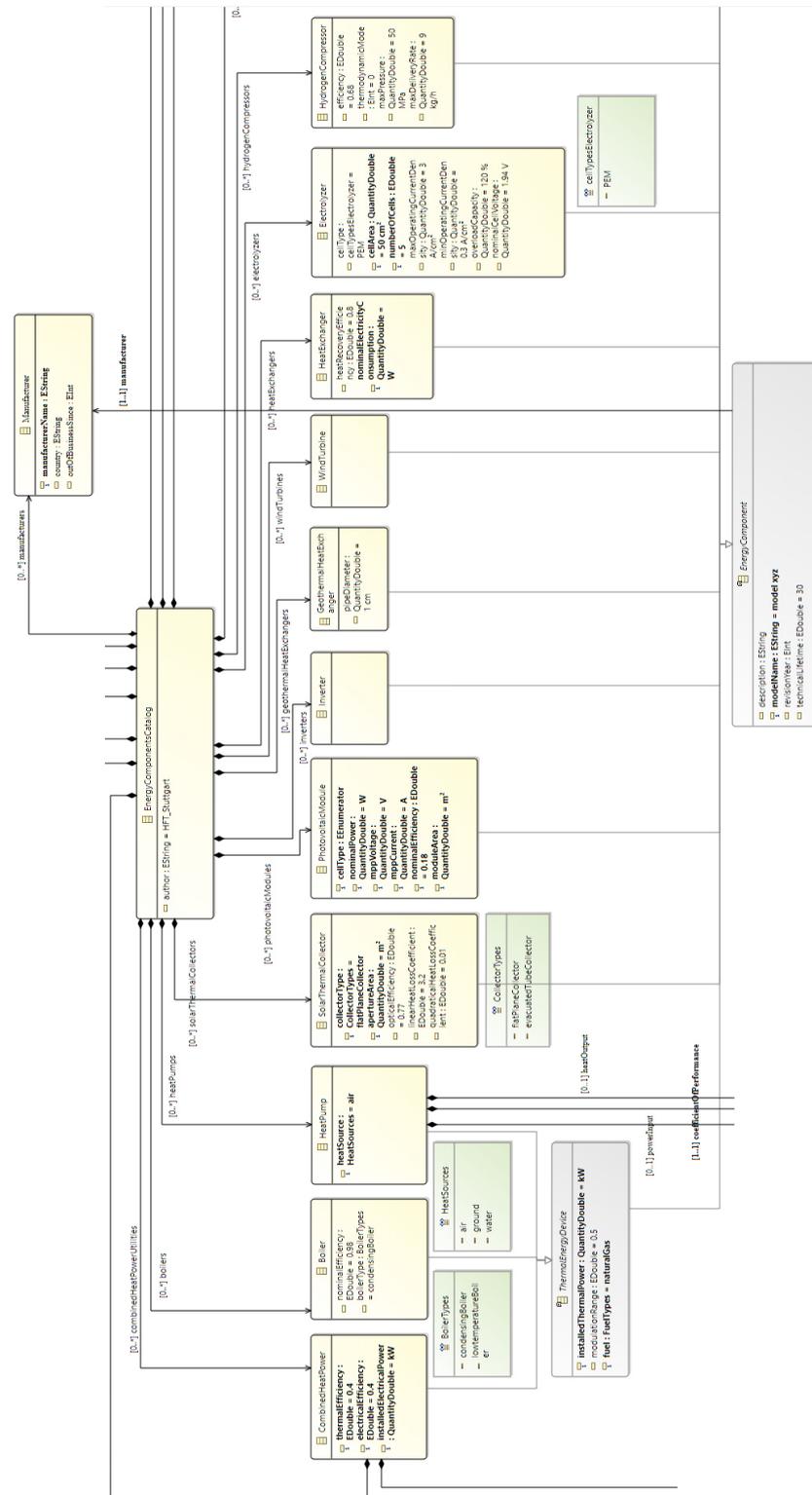


Abbildung 4.15: Ausschnitt der Energiesystemkomponenten-Bibliothek: Systemkomponenten

Tabelle 4.3: Attribute der Klasse *CombinedHeatPower* und deren Charakterisierung

Attribut (eng.)	Attribut (deu.)	Typ	Intervall	Default Wert	Einheit	Auswahl
installedThermalPower	Thermische Nominalleistung	Double	1..1	-	kW	-
modulationRange	Modulationsspanne	Double	0..1	0,5	-	-
fuel	Brennstoff	Enum	1..1	-	-	FuelTypes
thermalEfficiency	Thermische Effizienz	Double	1..1	0,4		-
electricalEfficiency	Elektrische Effizienz	Double	1..1	0,4		-
installedElectricalPower	Elektrische Nominalleistung	Double	1..1	-	kW	-
description	Beschreibung	String	0..1	-	-	-
modelName	Modell Name	String	1..1	-	-	-
manufacturer	Hersteller	Klasse	1..1	-	-	aus Klasse
revisionYear	Jahr der Information	Integer	0..1	2020	-	-
technicalLifetime	Technische Lebensdauer	Double	0..1	30	a	-

Die ersten drei Attribute der Tabelle stammen aus der übergeordneten abstrakten Klasse *ThermalEnergyDevice*, die folgenden drei Attribute aus der Klasse *CombinedHeatPower* selbst. Die letzten vier Attribute stammen aus einer weiteren übergeordneten abstrakten Klasse *EnergyComponent*, die allen Komponenten-Klassen übergeordnet ist. Das Attribut *fuel* wird durch die Enumeration *FuelTypes* beschrieben, welche aus den Literalen *naturalGas*, *bioGas*, *syntheticGas*, *sewageGas*, *oil*, *woodPellets*, *woodChips* und *electricity* zusammengesetzt ist.

Die Bezeichnungen der Klassen und Attribute in der Bibliothek orientieren sich an den Bezeichnungen aus dem Bereich *EnergyConversionSystem* der EnergyADE 1.0. Abbildung 3.6 in Kapitel 3.3 zeigt das Klassendiagramm dieses Teils der EnergyADE.

Für die Beschreibung mancher Attribute sind die Typen *String*, *Double* oder *Enumeration* nicht geeignet. Stattdessen kann eine Referenz auf eine weitere Klasse eingefügt werden. Zum Beispiel soll die Information des Herstellers (*manufacturer*) einer Komponente nicht jedes Mal händisch neu eingetragen werden. Einerseits dient dieses Vorgehen dazu, Dopplungen aufgrund von unterschiedlichen Schreibweisen eines Herstellers (z.B. *Robert Bosch GmbH*, *Bosch GmbH* oder *Bosch* als Herstellerangabe) zu vermeiden, andererseits können durch die Einführung einer eigenen Klasse *manufacturer* weitere Eigenschaften, wie z.B. aus welchem Land der Hersteller kommt und ob er noch am Markt vertreten ist, in der Instanz gespeichert werden.

Beim späteren Eintragen von Instanzen z.B. in der Klasse *CombinedHeatPower* kann der Nutzer also aus einer bereits vorhandenen Liste an Herstellern wählen, oder eine neue Instanz in der Klasse *manufacturer* anlegen. Darüber hinaus kann so eine Liste der zur Verfügung stehenden Hersteller in der Datenbank ausgegeben werden.

Zusätzlich gibt es (zum Beispiel bei der Klasse *HeatPump*) Attribute, die durch von einem Parameter abhängige Funktionen oder Datentabellen beschrieben werden. Als Beispiel dient hier der temperaturabhängige Coefficient of Performance (COP), der darüber hinaus auch von der Vorlauftemperatur des Systems abhängig ist. Abbildung 4.16 zeigt beispielhaft für eine Luft/Wasser-Wärmepumpe drei verschiedene COP-Kennlinien für unterschiedliche Vorlauftemperaturen, abhängig

von der Außenlufttemperatur, sowie deren Trendlinien, Formeln und Bestimmtheitsmaße. Diese drei Kennlinien bzw. die Parameter ihrer Formeln sollen später im User-Interface (siehe Kapitel 4.2.1) eingegeben werden können. Dafür müssen allerdings zunächst im Datenmodell verschiedene Klassen für die jeweiligen Funktionen definiert werden.

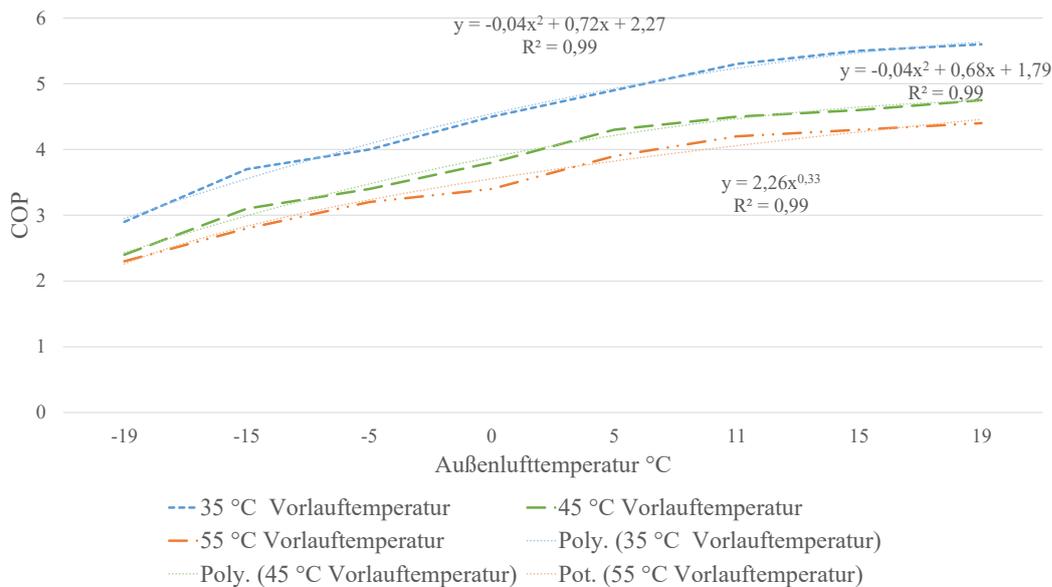


Abbildung 4.16: Beispiel temperaturabhängige COP-Kurve einer Wärmepumpe

Die verschiedenen Funktionstypen müssen zunächst im Modell definiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die in Abbildung 4.17 zu sehenden vier Funktions-Typen im Datenmodell abgebildet.

- quadratische Funktion $y = ax^2 + bx + c$,
- exponentielle Funktion $y = a \cdot b^x$,
- Potenzfunktion $y = a \cdot x^b$,
- lineare Funktion $y = m \cdot x + c$.

Die Variablen der Funktionen sind jeweils über ihre Parameter definiert. Zusätzlich verfügt jede Instanz einer Funktion über einen *key*, welcher die jeweilige Instanz beschreibt. In diesem Fall handelt es sich dabei um die Vorlauftemperatur, für die die Funktion gilt. Neben den genannten Funktionstypen können die Daten aus

4.2 Datenmodelle und Entwicklung von Bibliotheken für die automatisierte Simulation

den Kennlinien auch in Form einer Datentabelle angegeben werden. Dies ist durch die Klasse *TableCharacteristic* definiert, für deren Instanzen stets mindestens zwei Datenpunkte bestehend aus je zwei Werten X und Y angegeben sein müssen.

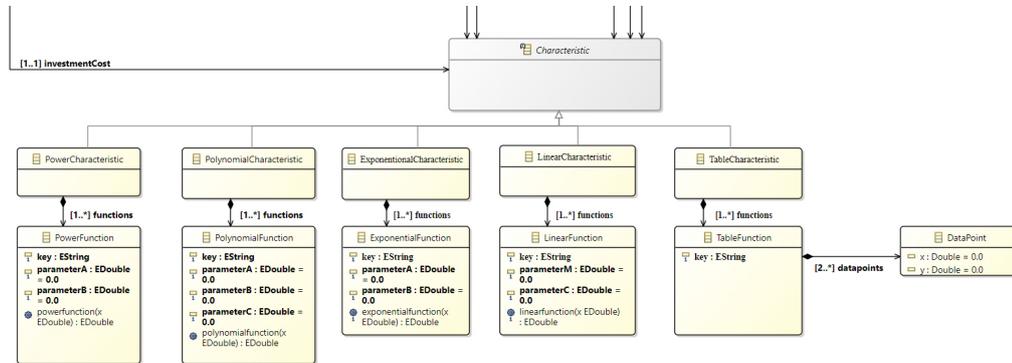


Abbildung 4.17: Ausschnitt der Energiesystemkomponenten-Bibliothek: Funktionen

Zusätzlich zu den technischen Parametern der Energiesystemkomponenten widmet sich ein Teil des entwickelten Datenmodells den Energieträgern und Medien, die für den Betrieb der Komponenten relevant sind. Wie zuvor beschrieben, sind sie über das Attribut *fuel* mit den verschiedenen Komponenten verknüpft. In Abbildung 4.18 sind Klassen und Attribute zu sehen, wie z.B. CO₂-Emissionsfaktor in der Klasse *EnergyCarrier* sowie Dichte oder Heizwert in der untergeordneten Klasse *Fuel*.

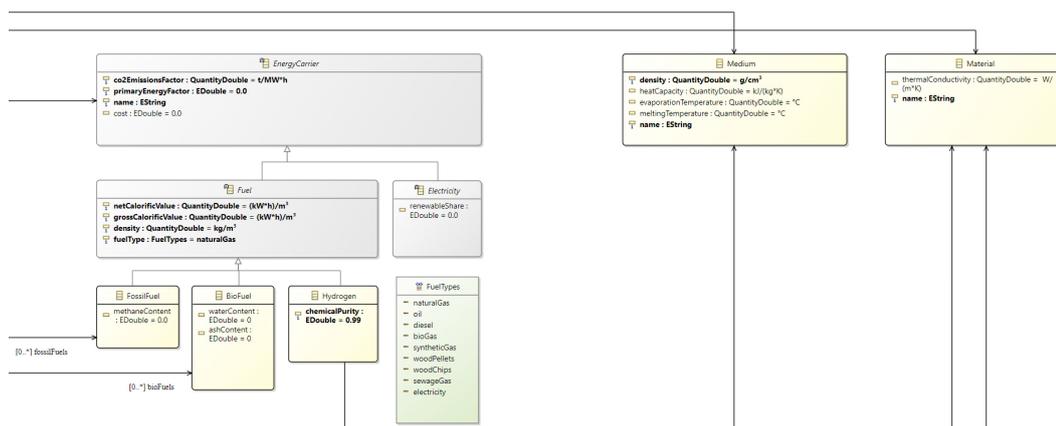


Abbildung 4.18: Ausschnitt der Energiesystemkomponenten-Bibliothek: Energieträger

User-Interface der Energiesystemkomponenten-Bibliothek

Das ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit definierte User-Interface der Energiesystemkomponenten-Bibliothek erlaubt die Erstellung einer beliebigen Anzahl Instanzen für jede Klasse des Modells. In mehreren hier definierten *viewmodels* für verschiedene Klassen des Datenmodells wird zunächst das Aussehen der Anwendung definiert. So können zum Beispiel einzelne Klassen zu Gruppen zusammengefasst werden, um eine übersichtliche Anzeige zu erhalten. Darüber hinaus können die anzuzeigenden Attribute der einzelnen Klassen ausgewählt und deren Reihenfolge bestimmt werden. In Abbildung 4.19 ist das Viewmodel der gesamten Energiesystemkomponenten-Bibliothek zu sehen. Links ist die Baumstruktur mit den zusammenfassenden Ordnern zu sehen, die jeweils verschiedenen Klassen beinhalten. Jede der Klassen hat eine eigene *TableControl*, in der die Verknüpfung zur Klasse im Modell erstellt wird, verschiedene Anzeigeeoptionen definiert und die anzuzeigenden Attribute bestimmt werden.

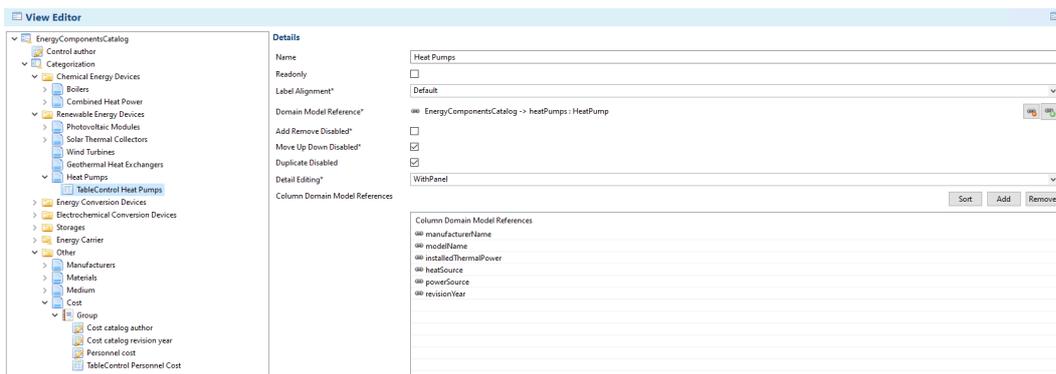


Abbildung 4.19: Viewmodel der Energiesystemkomponenten-Bibliothek

In der folgenden Abbildung 4.20 ist der Editor und somit das User-Interface zum Modell zu sehen. Der Nutzer kann hier eigenständig Daten für konkrete Instanzen der jeweiligen Klassen hinterlegen. In der Abbildung ist eine Instanz der Klasse *HeatPump* geöffnet. Zusätzlich zu den Attributen, die in der Klasse selbst definiert sind, sind die Attribute der übergeordneten Klasse *EnergyComponent* dargestellt. Ebenfalls können über die verknüpfte Klasse *Characteristic* Funktionen bzw. Datentabellen (wie in Abbildung 4.20 zu sehen) für *Coefficient of Performance*, *Heat Output* und *Power Input* definiert werden.

4.2 Datenmodelle und Entwicklung von Bibliotheken für die automatisierte Simulation

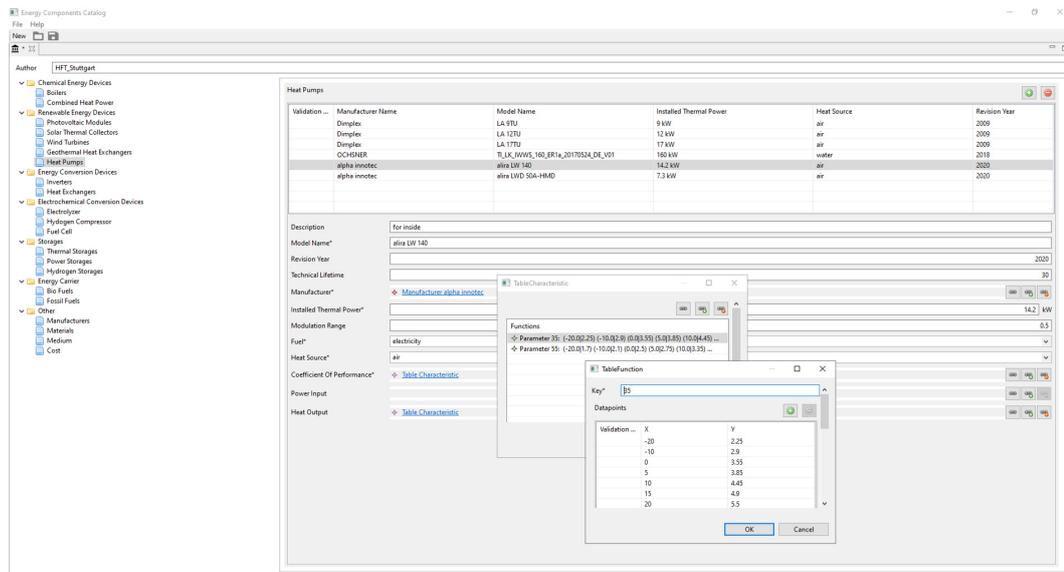


Abbildung 4.20: User-Interface der Energiesystemkomponenten-Bibliothek

In der Tabelle im oberen Teil der Abbildung 4.20 sind die zuvor im Viewmodel in Abbildung 4.19 definierten Attribute in der festgelegten Reihenfolge zu sehen. Hier ist eine Übersicht über alle vorhandenen Instanzen dieser Klasse gegeben. Wenn eine Instanz ausgewählt wird, sind alle im Modell definierten Attribute dieser Klasse unterhalb der Tabelle zu sehen. Durch eine im Modell angelegte Verknüpfung kann ein Hersteller (*manufacturer*) aus der Liste der bereits verfügbaren Hersteller ausgewählt oder aber eine neue Instanz angelegt und verknüpft werden. Für die als Funktion definierte Attribute *coefficientOfPerformance*, *heatOutput* und *powerInput* kann jeweils der Funktionstyp (quadratisch, exponentiell, Potenz, linear oder Tabelle) und die entsprechenden Parameter sowie der dazugehörige *key* eingetragen werden.

Technische und ökonomische Daten für die Energiesystemkomponenten-Bibliothek

Die technischen Daten der Komponenten sind von Herstellern aus Produktkatalogen oder Leistungsverzeichnissen entnommen. Das bedeutet, dass nur tatsächlich existierende Komponenten Teil der Energiesystemkomponenten-Bibliothek sind und z.B. keine generischen oder theoretischen Komponenten. Durch das für jede

Komponente im Modell vorhandene Attribut *revisionYear* kann angegeben werden, aus welchem Jahr der Datensatz stammt. So wird stets der aktuelle Stand der Technik abgebildet bzw. ältere Einträge sind leicht erkennbar.

Anders ist die Handhabung der Kosten der Komponenten im Datenmodell. Da es oftmals keine Preisliste zu den oben genannten Produktkatalogen der Hersteller gibt und sich außerdem die Preise der konkreten Komponenten schnell ändern können, ist im Datenmodell der Energiesystemkomponenten-Bibliothek nicht vorgesehen, Investitionen für jede einzelne Instanz anzugeben.

Stattdessen wurden aus verschiedenen, z.T. branchen-spezifischen Studien und Marktrecherchen spezifische und absolute Investitionen für verschiedene Leistungsgrößen der jeweiligen Komponenten recherchiert.

Mittels Regression wurden Funktionen für die spezifischen Investitionen der einzelnen Komponenten-Klassen definiert. Die Funktionen verlaufen dabei in allen Fällen degressiv, sind im Einzelfall aber im Verlauf unterschiedlich. In Abbildung 4.21 sind die einzelnen Datenpunkte (in dunkelblau) sowie die daraus abgeleitete exponentielle Funktion (hellblau) der leistungsabhängigen spezifischen Investitionen eines Holzpellet-Kessels zu sehen. Das Bestimmtheitsmaß der Funktion liegt bei 0,9616.

Neben den spezifischen Investitionen sind auch Kosten für Wartung und Inspektion sowie Personalaufwand für eine Bewertung der Gesamtkosten relevant. In der VDI Richtlinie 2067⁵ „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen“ [155] sind für verschiedene Erzeuger Kennwerte dafür zu finden. Diese Kosten sind anteilig auf die jeweilige Investition bei der Annahme einer typischen Nutzungsdauer bezogen und werden in der Datenbank hinterlegt.

Eine Fortschreibung oder Prognose der technischen und ökonomischen Entwicklung findet nicht statt, da hierzu keine verlässlichen Annahmen getroffen werden können. Dies ist vor allem für Komponenten relevant, bei denen in den letzten Jahren eine deutliche Entwicklung stattgefunden hat und vermutlich noch weiter

⁵ Richtlinie ist von 2012 und befindet sich derzeit in Überarbeitung

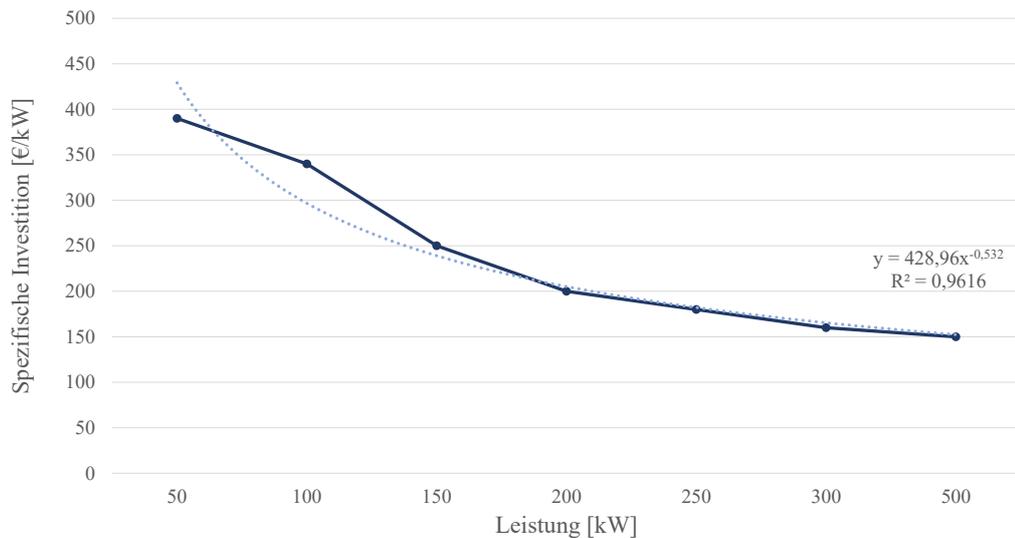


Abbildung 4.21: Funktion der spezifischen Investitionen für einen Holzpellet-Kessel

stattfinden wird, wie Wärmepumpen und Batteriespeicher oder aber für Komponenten, die erst relativ am Anfang ihrer Entwicklung stehen, wie z.B. Brennstoffzellen und Elektrolyseure. Bei anderen Komponenten wie z.B. Gaskesseln wird in den nächsten Jahren hingegen voraussichtlich keine deutliche Entwicklungsaktivität mehr stattfinden. Durch das zuvor beschriebene User-Interface der Bibliothek können auf einfache Weise Daten ergänzt oder aktualisiert werden, um der technischen Entwicklung Rechnung zu tragen. Die vorhandene Version der Datenbank kann einfach durch eine solche überarbeitete Version der Datenbank ersetzt werden, wenn das zugrunde liegende Datenmodell nicht geändert wird.

4.2.2 Internationale Gebäudephysik-Bibliotheken

Die in Kapitel 3.4.1 beschriebenen Bibliotheken sind spezifisch für Deutschland, da sie auf deutschen Normen und Datenbanken beruhen. Für die Anwendung von SimStadt für Stadtquartiere in anderen Ländern werden daher entsprechende nationale Datensätze bzw. Bibliotheken benötigt.

Im europäischen Kontext ist für die Gebäudephysik ein analoges Vorgehen zur deutschen Bibliothek möglich. Im TABULA Projekt [104] wurden für die meisten

europäischen Länder Datensätze angelegt, die gleich oder sehr ähnlich zur deutschen IWU-Bibliothek aufgebaut sind. Daher ist eine Integration dieser Daten über das bestehende Datenmodell der Gebäudephysik-Bibliothek einfach machbar und aufgrund der gleichen Struktur auch für unerfahrene Nutzer leicht zu verstehen und umzusetzen.

Im Rahmen eines Projektes wurden mit den TABULA Daten für die Niederlande eine neue Gebäudephysik-Bibliothek auf Basis des bestehenden Datenmodells erstellt. Die daraus generierte XML-Datei ist als open data auf GitLab verfügbar⁶. Dieses Verfahren ist leicht übertragbar. So können für alle Länder, die Daten im Rahmen des TABULA Projektes zur Verfügung gestellt haben, Gebäudephysik-Bibliotheken für die Nutzung in SimStadt erstellt werden. Im Anschluss kann der Wärmebedarf mit SimStadt und der jeweiligen nationalen Gebäudephysik-Bibliothek durchgeführt werden.

Bei der Nutzung von Daten aus Ländern, die nicht Teil von TABULA sind, muss die Struktur der Daten zunächst analysiert werden. Dann kann festgelegt werden, ob und mit welcher Methode die Daten in die bestehende Gebäudephysik-Bibliothek integriert werden können bzw. welche Anpassungen am Datenmodell nötig sind.

Für das Fallbeispiel New York City wurde im Rahmen dieser Arbeit eine neue Struktur der Gebäudephysik-Bibliothek erstellt. In der Studie mit dem Titel *One City Built to Last* [147] des *New York City Mayor's Office of Sustainability* werden acht verschiedene Gebäudetypen definiert (siehe Abbildung 4.22). Diese unterscheiden sich anhand der Nutzung (*residential* und *commercial*) sowie anhand der Baualterklasse (*pre-war*, *post-war* sowie *post-1980* (nur bei *residential*)). Außerdem gibt es einen Gebäudetypen, der sich durch Nutzung und Flächengröße definiert (*commercial, very large*). Da der Übergang von *pre-war* zu *post-war* nicht im Dokument definiert ist, wird für das weitere Vorgehen *pre-war* als „vor 1946“ definiert, *post-war* als „nach 1945“. Für jeden dieser Typen gibt es typische Bauteilaufbauten für Wand, Dach und teilweise Fenster mit den zugehörigen R-Werten⁷. Für Fußböden gibt es keine Angaben im Bericht, hier wird ein Holzfußboden mit einem U-Wert

⁶ <https://transfer.hft-stuttgart.de/gitlab/simstadt/building-physics-library-nl>

⁷ Der R-Wert ist der Kehrwert des U-Wertes und wird in den USA häufiger benutzt als der in Deutschland übliche U-Wert.

4.2 Datenmodelle und Entwicklung von Bibliotheken für die automatisierte Simulation

von $1,12 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ für alle Gebäude angenommen. Weitere fehlende Angaben wie z.B. Wärmekapazität der Gebäude, natürliche Luftwechselrate und Anteil der unbeheizten Fläche wurden aus der deutschen Wohngebäudetypologie nach IWU [105] übernommen. Die Fensteranteile der Gebäude wurden zwischen 25 % und 50 % angenommen.

PLUTO <i>building class</i> <i>codes</i>	Gebäudetypen aus <i>One City Built to Last</i>		PLUTO <i>building class</i> <i>codes</i>
<p>A0, A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9, B1, B2, B3, B9, C0, C3, C9, CM</p>	<p>ONE- TO FOUR-FAMILY HOMES</p>	<p>MULTI-FAMILY, PRE-WAR UP TO 7 STORIES</p>	<p>C1, C2, C4, C5, C6, C7, C8, H1, H2, H3, H4, H5, H6, H7, H8, H9, HB, HH, HR, HS, L1, L2, L3, L8, L9, R0, R1, R2, R3, R4, R9, RD, RH, RX, RZ, S0, S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9</p>
	<p>MULTI-FAMILY, POST-WAR GREATER THAN 7 STORIES</p>	<p>MULTI-FAMILY, POST-1980 GREATER THAN 7 STORIES</p>	
<p>E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E9, F1, F2, F4, F5, F8, F9, G0, G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7, G8, G9, GU, GW, I1, I2, I3, I4, I5, I6, I7, I8, I9, J1, J2, J3, J4, J5, J6, J7, J8, J9, K1, K2, K3, K4, K5, K6, K7, K8, K9, L1, L2, L3, L8, L9, M1, M2, M3, M4, M9, N1, N2, N3, N4, N9,</p>	<p>COMMERCIAL, PRE-WAR UP TO 7 STORIES</p>	<p>COMMERCIAL, PRE-WAR GREATER THAN 7 STORIES</p>	<p>O1, O2, O3, O4, O5, O6, O7, O8, O9, P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, R5, R7, R8, RA, RB, RC, RG, RI, RK, RM, RP, RS, RT, RW, T1, T2, T9, U0, U1, U2, U3, U4, U5, U6, U7, U8, U9, W1, W2, W3, W4, W5, W6, W7, W8, W9, Y1, Y2, Y3, Y4, Y5, Y6, Y7, Y8, Y9, Z1, Z2, Z3, Z4, Z5, Z7, Z8, Z9</p>
	<p>COMMERCIAL, POST-WAR GREATER THAN 7 STORIES (EARLY CURTAIN WALL)</p>	<p>COMMERCIAL, VERY LARGE</p>	

Abbildung 4.22: Gebäudetypen der Gebäudephysik-Bibliothek für New York City nach [147] inkl. zugeordneten PLUTO *building class codes*

Durch die vorgegebene Definition der Gebäudetypen nach Baualtersklasse und Stockwerkszahl ergeben sich offene Fragestellungen. So gibt es die definierten Wohngebäude-Typen „*pre-war, up to 7 stories*“ und „*post-war, greater than 7 stories*“. Wohngebäude, die zwar vor dem Krieg gebaut wurden, aber höher als sieben

Geschosse sind, oder Gebäude, die nach dem Krieg gebaut wurden, aber kleiner als sieben Geschosse sind, werden in der Typologie nicht berücksichtigt. Da solche Gebäude in der Realität aber durchaus vorkommen können, werden sie in der hier entwickelten Bibliothek trotzdem berücksichtigt und wie die entsprechenden Gebäude aus der gleichen Bauperiode behandelt, unabhängig von der Anzahl der Stockwerke.

Die Workflow-Schritte zum Preprocessing in SimStadt sind in der Reihenfolge *GeometricPreprocessor*, *PhysicsPreprocessor*, *UsagePreprocessor* angelegt. Das bedeutet, dass zunächst die Geometrie der Gebäude analysiert wird, in diesem Schritt werden auch die Gebäudetypen für jedes Gebäude definiert (siehe Kapitel 3.4). Diese folgen dabei den Definitionen der Gebäudephysik-Bibliothek von SimStadt. Erst im Anschluss wird im *PhysicsPreprocessor* auf die Gebäudephysik-Bibliothek zugegriffen. Das bedeutet, dass der Gebäudetyp zu diesem Zeitpunkt bereits bekannt sein muss.

Die Gebäudetypen für die Gebäudephysik-Bibliothek für New York City folgen allerdings einer anderen Klassifizierung. Daher muss eine neue Methode gefunden werden, den Gebäuden die Gebäudetypen aus [147] zuzuordnen. Außerdem werden dadurch Anpassungen am Datenmodell nötig.

In New York City werden Flächennutzungen und weitere geografische Daten in der PLUTO⁸ Datenbank verwaltet. In Appendix C im PLUTO Data Dictionary [47] werden diese Gebäudeklassen (*building class codes*) beschrieben. Diese Klassifizierung beschreibt die Nutzung inkl. detaillierter Unterklassen, wie der folgende Auszug verdeutlicht.

- A. One Family Dwellings
 1. Two Stories Detached
 2. One Story (Permanent Living Quarters)
 3. Large Suburban Residence
 4. City Residence

⁸ <https://www1.nyc.gov/site/planning/data-maps/open-data/dwn-pluto-mappluto.page>

5. Attached or Semi-Detached

- H. Hotels
- O. Office Buildings
- W. Educational Structures

Diese Art der Klassifizierung nach Gebäudenutzung wird in SimStadt erst im *UsagePreprocessor* vorgenommen (welcher erst im nächsten Schritt nach der Zuordnung des Gebäudetyps im *GeometricPreprocessor* folgt, siehe Kapitel 3.4.1). Um die PLUTO Datenbank aber dennoch als eine einheitliche Datenbasis nutzen zu können, werden daher den acht Gebäudetypen aus der Typologie nach [147] die jeweils passenden *building class codes* aus der PLUTO Datenbank manuell zugeordnet (siehe Abbildung 4.22).

Beim Wohngebäudetyp *One- to Four-Family Homes* lassen sich die PLUTO *building class codes* gut zuordnen, da hier i.d.R. eine Beschreibung der Anzahl der Haushalte (*families*) bzw. der Stockwerke in den Unterklassen enthalten ist. Die Anzahl der Stockwerke ist zum Teil impliziert, da in *walk-up apartments* und *elevator apartments* unterschieden wird. Die letzteren verfügen i.d.R. über mehr als sechs Stockwerke, da Gebäude ab einer Höhe von 75 feet (entspricht 22,9 m, die sich bei einer angenommenen Brutto-Stockwerkshöhe von 3,3 m in sieben Stockwerke aufteilen) seit 1968 mit einem Aufzug ausgestattet sein müssen [42]. Bei den beiden anderen Wohngebäudetypen kann eine solche Unterscheidung nicht mehr durchgeführt werden, ebenso wenig bei den Nichtwohngebäuden. Daher werden ihnen jeweils die gleichen PLUTO *building class codes* zugeordnet. Die weitere Unterscheidung kann hier nur über die aus der Geometrie im *GeometricPreprocessor* errechnete Stockwerksanzahl stattfinden. Wenn die Gebäudetypen durch eine Baualtersklasse definiert sind, wird das Baujahr der Gebäude ebenso bei der Zuordnung der Gebäudetypen berücksichtigt.

Der Gebäudetyp *Commercial, very large* ist in [147] durch eine minimale Nutzfläche des Gebäudes definiert. Da diese Information in SimStadt in diesem Workflowschritt ebenfalls noch nicht zur Verfügung steht, wird stattdessen das bekannte minimale Bruttovolumen zur Zuordnung genutzt. Dieses wird aus der vorgegebenen minimalen Fläche von 500.000 ft² und einer mittleren Stockwerkshöhe von

3,3 m errechnet und auf 150.000 m³ festgelegt. Um diese Annahmen zu bestätigen, wurden Flächen und Volumina von verschiedenen Gebäuden in Brooklyn analysiert. Die neu erstellte Bibliothek wurde erfolgreich in SimStadt eingebunden und für Wärmebedarfsanalysen in New York City verwendet [62, 63].

4.3 Simulation von Energiesystemen zur Wärmeversorgung in Quartieren

In der bisherigen Simulation mit SimStadt wurde der monatlich berechnete Endenergiebedarf über konstante Anlagen-Wirkungsgrade und Primärenergiefaktoren in einen Primärenergiebedarf konvertiert sowie über CO₂-Faktoren in Emissionen umgerechnet. Um Versorgungssysteme detaillierter dimensionieren, berechnen und vergleichen zu können, wurde im Rahmen dieser Arbeit zunächst ein Datenmodell zur Speicherung und Abfrage von Energiesystemkomponenten in einer Bibliothek sowie Simulationsmodelle von zukunftsfähigen Wärmeversorgungssystemen entwickelt. Zwei Methoden zur Dimensionierung der Komponenten wurden für die Simulationsmodelle entwickelt. Anschließend wurde ein Verfahren konzipiert, um die Simulationsmodelle automatisiert aus der Bibliothek parametrisieren und in einem Workflow-Schritt von SimStadt automatisch für alle Gebäude eines Quartiers berechnen zu können. Darüber hinaus wurde eine Methode entwickelt, um den Lösungsraum der Versorgungssysteme einzuschränken und auf wenige, für den Anwendungsfall geeignete, Systeme zu begrenzen.

Der berechnete stündliche Heizwärme- und Warmwasserbedarf (beschrieben in Kapitel 3.4 und 3.5) dient als Input in den Workflow zur Simulation von verschiedenen Versorgungssystemen in SimStadt. Darüber hinaus können Strombedarfe für Haushaltsstrom und Elektromobilität sowie die Stromerzeugung aus PV als Input in die Modelle eingehen. Das Schema in Abbildung 4.23 zeigt den Ablauf des neu entwickelten Workflow-Schritts. Nicht in der Abbildung dargestellt sind die bereits zuvor in SimStadt ablaufenden Schritte zu Berechnung der stündlichen Bedarfe. In der zuvor beschriebenen Energiesystemkomponenten-Bibliothek (siehe Kapitel 4.2.1) werden technische und ökonomische Parameter für verschiedene

Komponenten der Simulationsmodelle hinterlegt. Gleichzeitig werden Simulationsmodelle für verschiedene Energiesysteme erstellt, aus denen allgemeine Dateischablonen, sogenannte *Templates*, erstellt werden. Die passenden Parameter werden dann, abhängig von der Dimensionierung, die über das Graphical User Interface (GUI) erfolgt, bei jedem Simulationsdurchlauf in das Template geschrieben. Das parametrisierte Template wird dann automatisch aufgerufen und ausgeführt, die Ergebnisse werden als Textdatei ausgegeben.

Dieses Verfahren wird in den folgenden Kapiteln 4.3.2 bis 4.3.4 genauer beschrieben und in Kapitel 5.2 als SimStadt Workflow dargestellt. In mehreren, nacheinander zu durchlaufenden Simulationsdurchgängen können so verschiedene Szenarien für ein Quartier gewählt und die Ergebnisse verglichen werden.

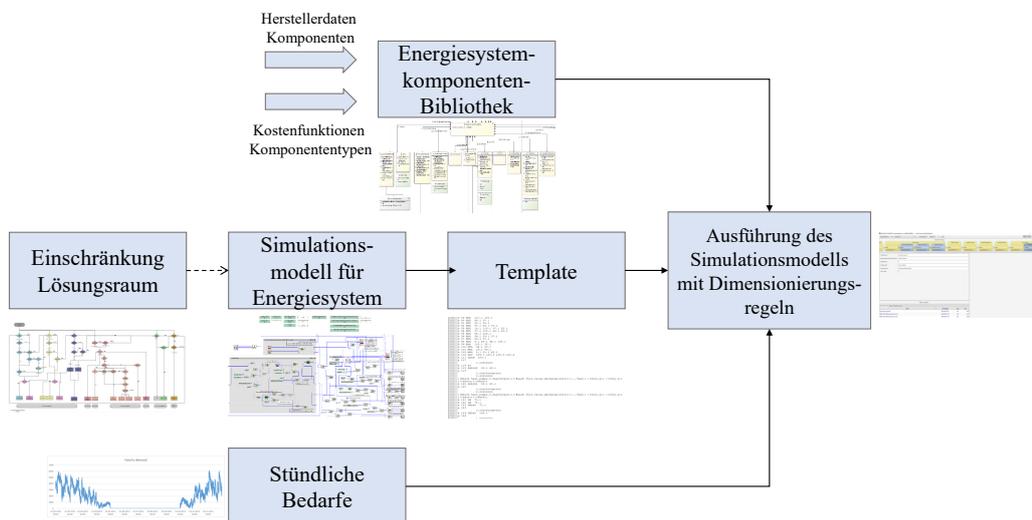


Abbildung 4.23: Schematische Darstellung des Workflow-Schritts in SimStadt zur Energiesystemsimulation

In Kapitel 3.1 wurden die Technologien und Systeme beschrieben, die von mehreren Studien als zukunftsfähig identifiziert wurden und damit Schlüsseltechnologien für die erneuerbare Energieversorgung im Jahr 2030 bzw. 2050 und darüber hinaus darstellen. Dies sind vor allem dezentrale Wärmepumpen-Systeme sowie netzgebundene Systeme, die durch verschiedene erneuerbare Wärmeerzeuger gespeist werden können. Es lassen sich zusammenfassend die folgenden zukunftsfähigen Wärmeversorgungstechnologien identifizieren:

- Dezentrale Wärmepumpe (Luft/Wasser, Sole/Wasser, Wasser/Wasser),
- dezentraler Biomassekessel,
- dezentrale Solarthermie mit und ohne Einspeisung ins Nah- bzw. Fernwärmenetz,
- zentrales Blockheizkraftwerk (BHKW) bzw. KWK in Verbindung mit Nah- bzw. Fernwärmenetz,
- zentrale Wärmepumpe (Sole/Wasser, Wasser/Wasser) in Verbindung mit Nah- bzw. Fernwärmenetz,
- zentraler elektrischer Kessel bzw. Heizstab in Verbindung mit Power-to-Heat.

Weitere mögliche Systeme wie Tiefengeothermie, Gas-Wärmepumpen sowie zentrale Solarthermie, die nicht übereinstimmend in den zuvor beschriebenen Studien als relevant für die zukünftige Wärmeversorgung identifiziert wurden, werden in den folgenden Betrachtungen nicht berücksichtigt. Der Fokus liegt auf den Technologien, die von allen betrachteten Studien als zukunftsfähig beschrieben wurden.

Aus diesen sechs Grund-Systemen (je drei zentrale und dezentrale Systeme) ergeben sich mehrere Sub-Systeme, etwa abhängig von der Wärmequelle für die Wärmepumpe oder der Betriebsweise (wärme- oder stromgeführt) des BHKWs. Darüber hinaus können auch einzelne dieser Technologien miteinander kombiniert werden, etwa um Grund- und Spitzlast aus verschiedenen Quellen abzudecken. Zur Erhöhung der Flexibilität können diese Technologien in Verbindung mit thermischen Pufferspeichern betrachtet werden.

Um aus der sich daraus ergebenden Vielzahl der möglichen Wärmeversorgungssysteme eine für den Untersuchungsrahmen passende Vorauswahl treffen zu können, wird zunächst, basierend auf den Rahmenbedingungen des zu untersuchenden Quartiers, der Lösungsraum an möglichen Versorgungsvarianten eingeschränkt (siehe folgendes Kapitel 4.3.1).

4.3.1 Einschränkung des Lösungsraums bei der Wahl der Versorgungsvarianten

Ein Entscheidungsproblem tritt dann auf, wenn eine Auswahl an mehreren Alternativen durch verschiedene Handlungsmöglichkeiten eingeschränkt werden kann. Dabei kann der Lösungsraum durch

- die intuitive Wahl einer gegebenen Möglichkeit,
- die Wahl einer bekannten, in der Vergangenheit realisierten und erfolgreichen Möglichkeit,
- die Übernahme einer Empfehlung eines Experten,
- eine zufällige Wahl einer Lösung,
- ein systematisches und rationales Vorgehen.

eingeschränkt werden [78].

Eine Entscheidung kann laut Grünig und Kühn [78] dann als rational gelten, wenn der Entscheidungsprozess sorgfältig und systematisch durchgeführt wird sowie die getroffene Entscheidung die folgenden vier Kriterien erfüllt:

1. Der Entscheidungsprozess ist zielgerichtet auf übergeordnete Ziele bezogen.
2. Basis des Entscheidungsprozesses sind möglichst vollständige und unabhängige Informationen. Dabei sind Aufwand und Nutzen einer aufwändigen Informationsbeschaffung abzuwägen.
3. Der Prozess ist systematisch und klar aufgebaut.
4. Der Prozess kann von Nicht-Beteiligten nachvollzogen werden.

Basierend auf den zuvor bestimmten zukunftsfähigen Wärmeversorgungssystemen und dem oben beschriebenen Vorgehen zur Lösung komplexer Entscheidungsprobleme, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Methodik erarbeitet, um die Auswahl der möglichen Versorgungstechnologien für zukunftsfähige Quartiere anhand der im Quartier gegebenen Rahmenbedingungen und Einschränkungen bereits zu Beginn der Planung reduzieren zu können. Diese Rahmenbedingungen werden über eine Checkliste abgefragt und in Abbildung 4.24 als Flussdiagramm

dargestellt. Die verschiedenen Versorgungstechnologien sind dabei farblich voneinander unterschieden. Dabei wurden die folgenden Technologien berücksichtigt:

- Fern-/Nahwärme (hellblau),
- Gaskessel, BHKW (gelb),
- Elektrolyseur mit oder ohne Brennstoffzelle inkl. Wasserstoff- oder Wärmeeinspeisung (rosa),
- elektrischer Kessel oder Heizstab (lila),
- Wärmetauscher in Abwasser oder Abwärme (rot),
- Wärmepumpe mit verschiedenen Wärmequellen (Fluss, Grundwasser, Erdkollektor, Erdsonde, Luft) (orange),
- Ölkessel (grau),
- feste Biomasse (grün),
- Solarthermie (ocker).

Zunächst werden mögliche Restriktionen für die verschiedenen Versorgungsvarianten definiert. Dies können sowohl räumliche als auch geologische oder strategische Parameter sein. So ist z.B. bei Fernwärme- und Gasnetzen die Entfernung zwischen Bestandsnetz und potentiellen Hausanschlüssen relevant. Falls die bestehende Distanz größer als 500 m ist, wird die Möglichkeit einer Erweiterung bzw. eines Neubaus des Netzes abgefragt. Bei einer ausreichenden räumlichen Nähe hingegen wird die Restlebensdauer des Bestandsnetzes sowie die noch vorhandene Kapazität und das Temperaturniveau abgefragt. Darüber hinaus ist die Wärmedichte im Quartier relevant. Wenn diese kleiner ist als $300 \text{ MWh/ha} \cdot \text{a}$, ist der Bau und Betrieb eines Wärmenetzes technisch und wirtschaftlich in der Regel nicht sinnvoll [83]. Weitere Restriktionen für andere Versorgungsvarianten sind z.B. Verfügbarkeit von Lagerplatz im Gebäude für Biomasse, geologische Kriterien wie Bodenart, Grabbarkeit und Wärmeleitfähigkeit des Bodens bei oberflächennaher Geothermie oder Einschränkungen des Lärm-, Immissions- und

Denkmalschutzes. Diese Informationen können z.B. bei der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) abgerufen werden.

Die Fragen können sich dabei sowohl auf das Quartier als Ganzes als auch auf die Gebäude im Quartier beziehen, je nachdem ob die Technologie als zentrales oder dezentrales System ausgeführt wird. So treten bei Wärmepumpen mit Wasser oder Sole als Energiequelle jeweils die gleichen Restriktionen zu Gewässerschutz oder Bodenbeschaffenheiten auf, wenn es sich um eine oder mehrere dezentrale Anlagen handelt oder um eine zentrale Anlage. Wenn Fragen aufgrund der Heterogenität des Quartiers nicht eindeutig beantwortet werden können, sollte das Quartier in kleinere Einheiten oder Teil-Quartiere aufgeteilt und damit das Flussdiagramm erneut durchlaufen werden.

Aufgrund der angegebenen Informationen bzw. Antworten auf die Abfragen können so einzelne Technologien ausgeschlossen bzw. ausgewählt werden. Wenn eine Technologie aufgrund einer entsprechenden Antwort als nicht geeignet eingestuft wird, wird der Nutzer automatisch zur nächsten Technologie geleitet. Grundsätzlich kann das Flussdiagramm von jeder beliebigen Stelle in der ersten Zeile gestartet werden. Wenn also ein Pfad bis zum Ende durchlaufen wird, wird bei der nächsten Farbe in der ersten Zeile erneut begonnen.

Alle Technologien, die zuvor in Kapitel 3.1 als zukunftsfähig identifiziert wurden, finden sich als Ziele der verschiedenen Pfade im Flussdiagramm wieder. Von allen theoretisch möglichen Technologien sind somit für einen konkreten Anwendungsfall nur noch diejenigen verfügbar, die für das untersuchte Quartier aufgrund seiner Restriktionen und Rahmenbedingungen in Frage kommen.

4.3.2 Simulationsmodelle für Energiesysteme

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, wird das Quartier als Betrachtungshorizont für die Simulation von verschiedenen Wärmeversorgungskonzepten gewählt. Eine große Herausforderung bei der Definition von Simulationsmodellen für Quartiere ist das Spannungsfeld zwischen Genauigkeit und Anwendbarkeit. Die Modelle sollen möglichst detailliert sein, aber trotzdem anwendbar auf mehrere hundert bis tausend Gebäude gleichzeitig, bei annehmbaren Simulationszeiten. Allegrini et al. [6]

fordern daher Tools, die auf einfachen, validierten Modellen basieren, um schnelle und verlässliche Ergebnisse für Stadtsimulationen in frühen Planungsphasen zu erhalten.

Auf diesem Ansatz fußen die im Folgenden vorgestellten Simulationsmodelle, die alle in der Simulationsumgebung INSEL⁹ erstellt wurden. INSEL ist ein frei verfügbares grafisches Simulationssystem zur Erstellung von Simulationsmodellen und Anwendungen, die auf den Bereich der erneuerbaren Energietechnologien spezialisiert ist.

Der konkrete Aufbau der Modelle wird in den folgenden beiden Kapiteln detailliert beschrieben. Grundsätzlich bestehen alle Modelle i.d.R. aus einem Grundlasterzeuger und einem Spitzenlasterzeuger sowie einem thermischen Speicher. Die verschiedenen Bedarfe (Raumwärme, Trinkwarmwasser, Haushaltsstrom, Strom für Mobilität) gehen als Input in die Modelle ein. Durch die Einbindung der Modelle in SimStadt können diese Inputs automatisch aus vorangegangenen Workflow-Schritten übernommen werden. Gleiches gilt für Modelle, bei denen Wetterdaten wie z.B. die Außentemperatur benötigt werden oder die eine mögliche Stromerzeugung durch PV berücksichtigen.

Der grundsätzliche Aufbau der zentralen und dezentralen Wärmeversorgungsmo-
delle ist weitgehend gleich, es werden jeweils aber andere Inputs berücksichtigt.

Die meisten der in den folgenden beiden Kapiteln beschriebenen Versorgungssysteme beinhalten neben dem bzw. den Wärmeerzeuger(n) jeweils einen thermischen Pufferspeicher. Dieser kann jedoch auch deaktiviert bzw. mit 0 m³ dimensioniert werden, wenn ein System ohne Speicher simuliert werden soll. Bevor im Detail auf die Systemmodelle eingegangen wird, soll daher zunächst die Modellierung des Speichers genauer beschrieben werden.

Modellierung des thermischen Speichers

Für die Berechnung der Geometrie des Speichers sind sein Volumen und seine Höhe relevant, die aus der Energiesystemkomponenten-Bibliothek bezogen werden

⁹ www.insel.eu

können. Im Anschluss ergeben sich daraus die weiteren geometrischen Parameter zu Berechnung der Speicherverluste. Neben den Geometrien sind ebenfalls die Vor- und Rücklauftemperaturen sowie die Raumtemperatur relevant.

Der Speicher wird als mehrschichtiger Zylinder, wovon eine Schicht Dämmmaterial ist, angenommen. Der Wärmestrom (=Verluste) durch den Mantel des Zylinders ist beschrieben in Formel 4.2 [82].

$$\dot{Q}_{Mantel} = \frac{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \Delta\vartheta_{ges}}{\frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2} + \dots} \quad (4.2)$$

mit

- \dot{Q}_{Mantel} Wärmestrom Mantel [W]
- l Länge des Zylinders (hier: Höhe des Speichers) [m]
- $\Delta\vartheta_{ges}$ Temperaturdifferenz zwischen Speicher und Raum [K]
- λ_i Wärmeleitfähigkeit der Schicht [$\frac{W}{m \cdot K}$]
- d_i Durchmesser der Schicht [m]

Indices 1...n: Schichtbezeichnungen

Der Wärmestrom (=Verluste) durch Boden und Decke des Zylinders ist in Formel 4.3 [82] für eine Wand mit zwei Schichten beschrieben.

$$\dot{Q}_{Decke,Boden} = \frac{\Delta\vartheta \cdot A}{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2}} \quad (4.3)$$

mit

- $\dot{Q}_{Decke,Boden}$ Wärmestrom durch Decke bzw. Boden [W]
- $\Delta\vartheta_{ges}$ Temperaturdifferenz zwischen Speicher und Raum [K]
- A Fläche Decke bzw. Boden [m^2]
- s_i Dicke der Schicht [m]
- λ_i Wärmeleitfähigkeit der Schicht [$\frac{W}{m \cdot K}$]

Indices 1...n: Schichtbezeichnungen

Abbildung 4.25 zeigt einen Ausschnitt aus dem Modell für die Berechnung des Energieinhaltes des thermischen Speichers in der INSEL Umgebung. Hier wird der Energieinhalt des Speichers nach Formel 4.4 [123] berechnet. Die mittlere Speichertemperatur ergibt sich aus der Differenz zwischen Vor- und Rücklauf­temperatur des Systems. Der Energieinhalt wird zur Weiterverwendung im Modell von kJ in kWh umgerechnet.

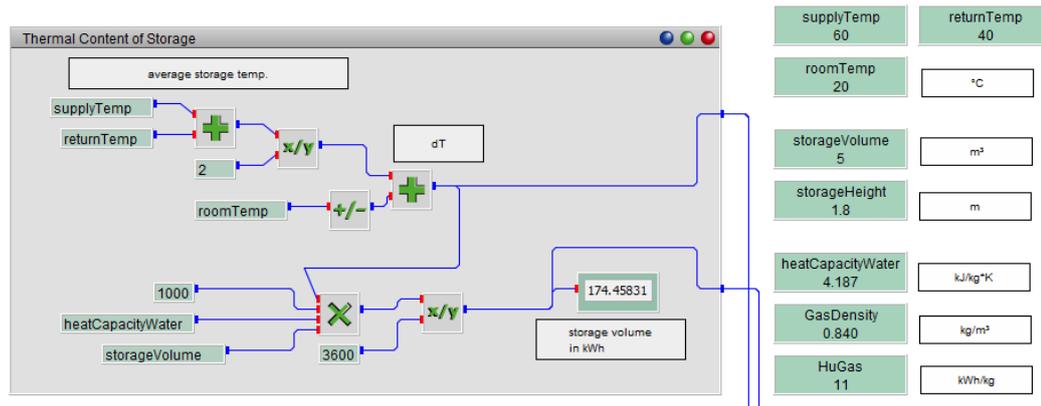


Abbildung 4.25: Berechnung der Verluste des thermischen Speichers in INSEL

$$Q_{SP} = m \cdot c \cdot (\vartheta_{SP} - \vartheta_A) \quad (4.4)$$

mit

Q_{SP} Energieinhalt Speicher [kJ]

m Masse [kg]

c spezifische Wärmekapazität [$\frac{kJ}{kg \cdot K}$]

ϑ_{SP} mittlere Speichertemperatur [K]

ϑ_A Außentemperatur [K]

Die Variablen rechts in Abbildung 4.25 folgen in der Benennung den Attributen der Energiesystemkomponenten-Bibliothek und sind hier mit *default* Werten versehen. Bei der Erstellung des Templates (siehe Kapitel 4.3.3) wird an ihrer Stelle ein Bezug zur Energiesystemkomponenten-Bibliothek (siehe Kapitel 4.2.1) bzw. der GUI von SimStadt hergestellt und diese *default* Werte durch die jeweils passenden Werte aus der Bibliothek ersetzt.

Zentrale Wärmeversorgungssysteme

Die Definition eines zentralen Wärmeversorgungssystem ist im Rahmen dieser Arbeit, dass Wärme an einem zentralen Ort erzeugt und mit einem Netzwerk zu den Verbrauchern gebracht wird.

Für die folgenden zentralen Wärmeversorgungssysteme wurden Simulationsmodelle in INSEL erstellt:

- Wärmegeführtes BHKW, Gaskessel, Speicher,
- Drei wärmegeführte BHKWs in Kaskade, Gaskessel,
- Biomassekessel, Gaskessel, Speicher,
- Wärmepumpe (Wasser/Wasser oder Sole/Wasser), Gaskessel, Speicher.

Die erste Komponente ist jeweils der Grundlastherzeuger, der als zweites genannte Gaskessel ist der Spitzenlastherzeuger. Je nach gewählter Systemkonfiguration oder räumlichen Restriktionen kann dieser jedoch auch ignoriert werden bzw. mit 0 kW dimensioniert werden, so dass eine monovalente Versorgung durch den ersten Erzeuger simuliert werden kann. Analog kann auch der Speicher (wie im vorigen Kapitel beschrieben) auf 0 m³ dimensioniert werden, um ein System ohne Speicher zu simulieren.

Das System, welches hier im Detail beschrieben werden soll, ist ein wärmegeführtes BHKW mit einem Gaskessel zur Abdeckung der Spitzenlast [164, 163]. Der Wärmebedarf bestimmt bei einem wärmegeführten BHKW dessen Einsatz. Beide Erzeuger werden mit Gas betrieben, zusätzlich ist ein thermischer Pufferspeicher vorhanden. Ein Wärmenetz verbindet die Verbraucher mit den Erzeugern und dem Speicher. Ein Schema des Systems ist in Abbildung 4.26 zu sehen.

Der stündliche Wärmebedarf aller Gebäude wird addiert und geht als ein Lastgang in das Modell ein. Die Verluste des Wärmenetzes werden als zusätzlicher Bedarf berücksichtigt.¹⁰ Die Summe beider Lastgänge stellt die Bedarfsdeckungsanfrage

¹⁰ Die Netzverluste werden nicht innerhalb des Modells bestimmt, sondern können extern berechnet und als Input in das Modell eingelesen werden.

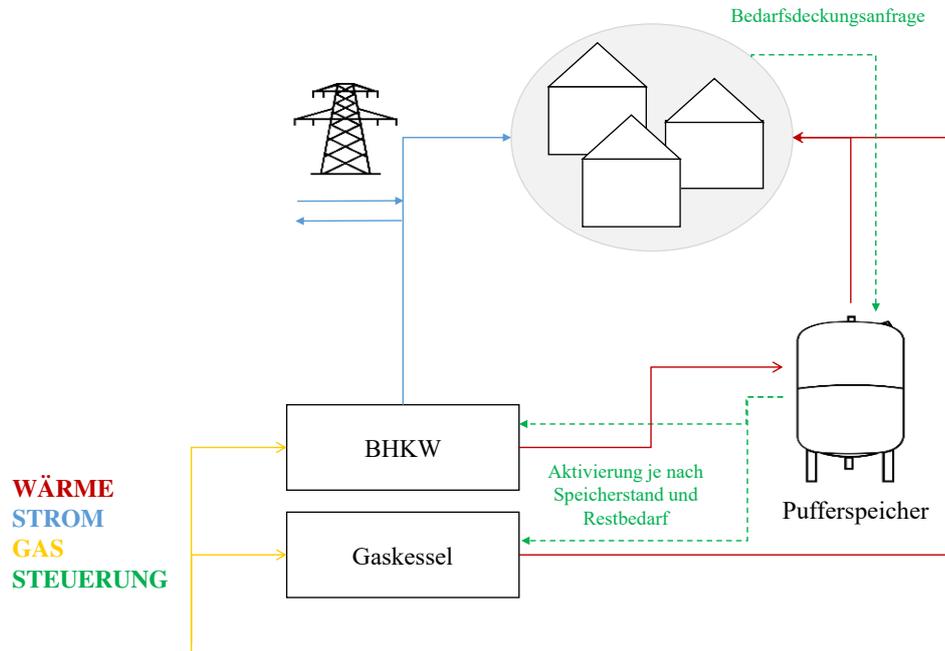


Abbildung 4.26: Schema des zentralen Versorgungssystems BHKW, Gaskessel und Speicher

an den Speicher dar. Wenn der Speicherinhalt zum Zeitpunkt der Bedarfsdeckungsanfrage ausreicht, um den Bedarf zu decken, wird dieser direkt durch den Speicher gedeckt, ohne dass das BHKW oder der Gaskessel aktiviert werden. Wenn der Bedarf größer ist als der aktuelle Speicherinhalt, wird dieser zunächst entleert und die restliche benötigte Wärmemenge je nach dessen Höhe entweder durch das BHKW, den Gaskessel oder durch beide Erzeuger gemeinsam bereitgestellt wird. Dabei wird das BHKW nur dann aktiviert, wenn die vom BHKW erzeugte Wärme entweder vollständig zur Bedarfsdeckung genutzt werden kann oder die vorhandene Speicherkapazität ausreicht, um die ggf. nicht direkt benötigte Wärme zu speichern. Das BHKW wird immer in Volllast betrieben. Wenn der Wärmebedarf zu gering ist, um das BHKW zu aktivieren oder die vorhandene Wärmemenge aus BHKW und/oder Speicher nicht ausreicht, um den Bedarf zu decken, wird der Gaskessel aktiviert. Der Gaskessel erzeugt dabei immer nur so viel Wärme, wie direkt benötigt wird, er speist also nicht in den Speicher ein.

Die Komponenten sind jeweils über ihre nominale Leistung in kW im Modell abgebildet, zusätzlich werden Informationen zur elektrischen und thermischen Effizienz des BHKWs sowie der Gesamteffizienz des Gaskessels benötigt. Relevante Angaben zum Speicher sind das Volumen in m^3 sowie Höhe und Durchmesser des Speichers. Außerdem finden sich material- bzw. brennstoffabhängige Konstanten, wie z.B. der Heizwert des verwendeten Erd- oder Biogases oder die Wärmekapazität von Wasser, im Modell. Darüber hinaus werden Vor- und Rücklauftemperaturen der Heizung benötigt.

Zusätzlich können im Modell Inputs zu Strombedarfen für Haushalt und Elektromobilität sowie Stromerzeugung aus PV berücksichtigt werden. Die Stromerzeugung des BHKWs kann somit für jeden Zeitschritt mit anderen Inputs verglichen werden und so eine Aussage zu Strombilanz und Eigenstromnutzung getroffen werden. Darüber hinaus können im Modell CO_2 -Emissionen und Brennstoffkosten basierend auf der jeweils produzierten Wärme- bzw. Strommenge der Systeme sowie den entsprechenden Kennzahlen berechnet werden.

In Abbildung 4.27 ist ein Ausschnitt aus dem INSEL Modell des in Abbildung 4.26 schematisch dargestellten Modells zu sehen. In der Abbildung nicht zu sehen ist die zuvor in Kapitel 4.3.2 beschriebene Berechnung der Speicherverluste. Am linken unteren Rand der Abbildung kann man eine blaue Linie sehen, die aus der Abbildung führt; hier schließt sich die Berechnung der Speicherverluste im selben Modell an. Im oberen Teil der Abbildung sind die verwendeten Variablen sowie deren Einheiten zu sehen. Die Benennung der Variablen erfolgt hier nach der Struktur der Energiesystemkomponenten-Bibliothek, die in Kapitel 4.2.1 beschrieben ist.

Abbildung 4.28, die den stündlichen Wärmebedarf und die Wärmeerzeugung der Stunden 6880 bis 6930 eines Jahres zeigt, verdeutlicht die Regelung der Komponenten im Modell anhand eines fiktiven Beispielsystems. Dargestellt ist der Wärmebedarf als Summe aller Gebäude inkl. Netz- und Speicherverluste (blau), die durch das BHKW erzeugte Wärme (orange), der Inhalt des thermischen Speichers in kWh (gelb), sowie die vom Gaskessel erzeugte Wärme (grün).

Das BHKW hat hier im Modell eine angenommene thermische Nennleistung von $264 \text{ kW}_{\text{th}}$, der Speicher ein Volumen von 11 m^3 (das entspricht 255 kWh bei einer

4.3 Simulation von Energiesystemen zur Wärmeversorgung in Quartieren

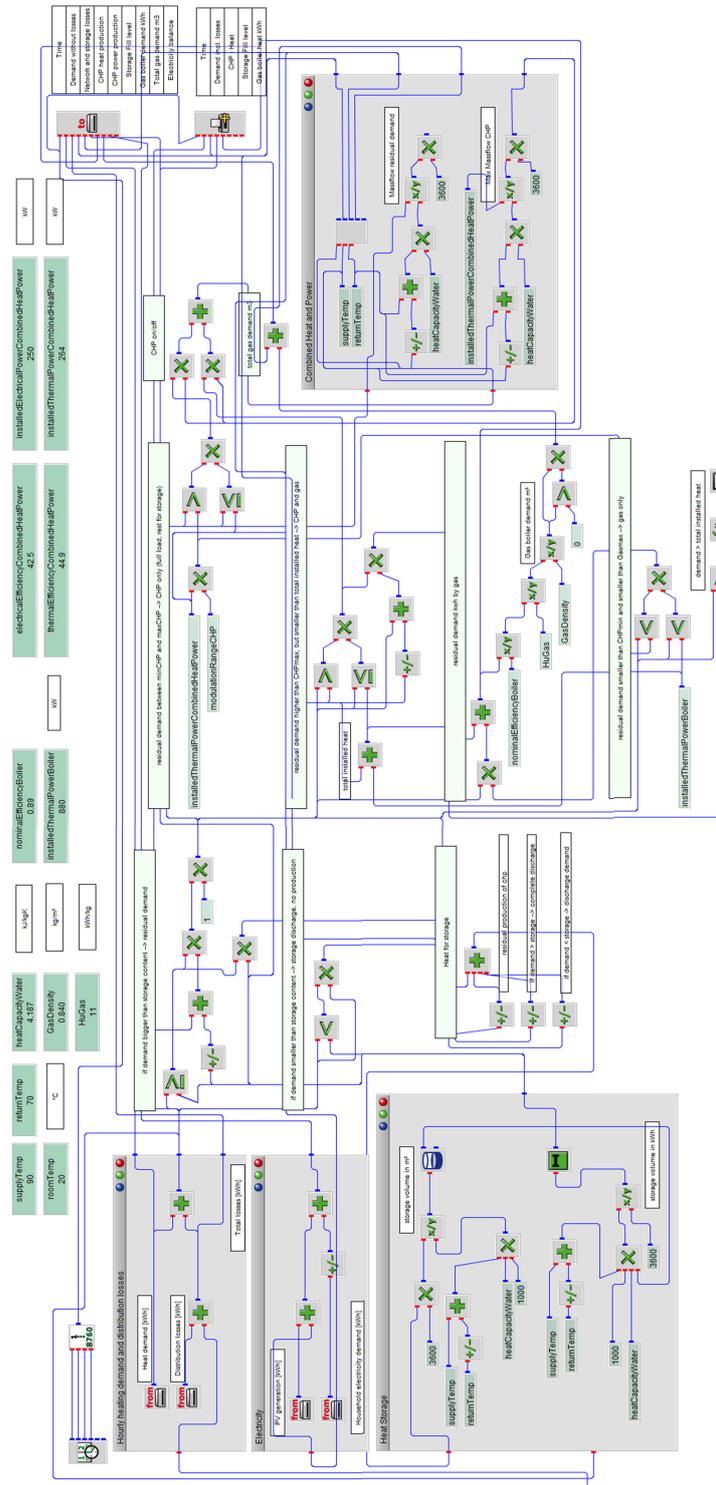


Abbildung 4.27: Ausschnitt aus dem INSEL Modell des zentralen Versorgungssystems BHKW, Gaskessel und Speicher

4 Methoden zur Modellierung von urbanem Wärmebedarf und Versorgungsoptionen

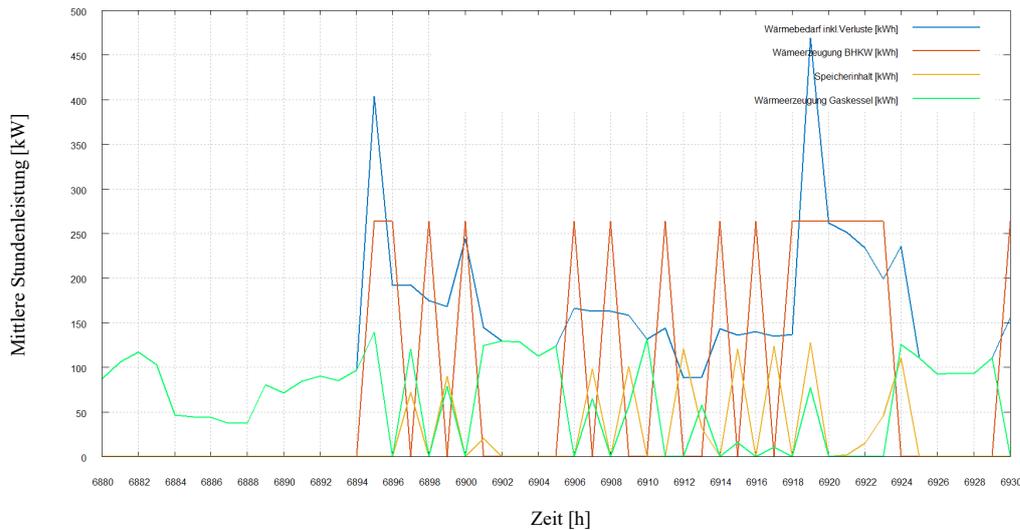


Abbildung 4.28: Output des zentralen Versorgungssystems BHKW, Gaskessel und Speicher für Stunde 6880 bis Stunde 6930

Temperaturdifferenz von 20 K zwischen Vor- und Rücklauf­temperatur). Zu Beginn des betrachteten Zeitraums ist der Speicher leer, der Bedarf ist mit 116 kWh aber zu gering, um das BHKW zu starten, so dass der Bedarf komplett durch den Gaskessel gedeckt wird. In Stunde 6865 steigt der Bedarf auf 404 kWh an, so dass das BHKW mit der vollen Leistung von 264 kW_{th} Wärme produziert, die darüber hinausgehende Residuallast von 140 kWh wird vom Gaskessel bereitgestellt. In der darauffolgenden Stunde geht der Bedarf zurück, der Gaskessel schaltet ab und die vom BHKW produzierte Wärme, die nicht direkt verbraucht wird, wird eingespeichert.

Die Werte, die für jede Stunde berechnet und als Output in eine Textdatei geschrieben werden, können innerhalb des Modells individuell festgelegt werden. In diesem Fall sind die folgenden Outputs definiert:

- Wärmeerzeugung BHKW [kWh],
- Stromerzeugung BHKW [kWh],
- Gasbedarf BHKW [m³],
- Wärmeerzeugung Gaskessel [kWh],

- Gasbedarf Gaskessel [m³],
- Speicherstand [kWh],
- Stromüberschuss bzw. -defizit [kWh].

Zusätzlich werden als Kontrollgrößen und zur weiteren Berechnung die Inputdaten zu Bedarfen und Netzwerkverlusten wieder in die Ausgabedatei geschrieben. Alle berechneten Ergebnisse können auch als Diagramm ausgegeben werden, entweder für den kompletten Jahresverlauf oder für einzelne Monate, Wochen oder Tage im Detail, wie in Abbildung 4.28 beispielhaft zu sehen.

Das Layout des Wärmenetzes wird in SimStadt anhand des Straßenverlaufs modelliert, zusätzlich werden Vor- und Rücklauftemperaturen des Systems in der GUI vom Nutzer angegeben. SimStadt verfügt über eine Schnittstelle zum Programmsystem STANET¹¹, mit dem Ver- und Entsorgungsnetze im Detail modelliert, simuliert und analysiert werden können. Um die verschiedenen Verluste abhängig von der Außentemperatur berücksichtigen zu können, werden mit STANET die stündlichen Wärmeverluste des Netzes für drei Fälle bzw. Typtage berechnet:

- Sommer, bei Außentemperaturen $> 15\text{ °C}$,
- Winter, bei Außentemperaturen $< 5\text{ °C}$,
- Übergangszeit, bei Außentemperaturen $> 5\text{ °C}$ und $< 15\text{ °C}$.

Um Temperaturschwankungen und die Trägheit des Netzes zu berücksichtigen, wird zunächst für jede Stunde des Jahres die mittlere Außentemperatur der letzten 24 Stunden berechnet. Anschließend wird ein stündlicher Lastgang generiert, der aus den drei temperaturabhängigen Kennwerten zusammengesetzt ist. Im Anschluss geht dieser Lastgang als zusätzlicher Input in das Simulationsmodell ein.

Die weiteren zu Beginn des Kapitels aufgelisteten Systeme sind in großen Teilen analog zum hier beschriebenen BHKW-System modelliert. Das zweite aufgeführte System stellt eine Variante des ersten Modells dar, bei dem insgesamt drei wärmegeführte BHKWs in Kaskade modelliert sind. Das bedeutet, dass der Betrieb

¹¹ www.stafu.de

der einzelnen BHKWs je nach Bedarf gesteuert ist und somit die drei Einheiten flexibel einzeln zu- und abgeschaltet werden können. Außerdem wird in diesem Modell der Modulationsbereich der BHKWs berücksichtigt. Dies führt dazu, dass das BHKW flexibel in einem Bereich zwischen Mindest- und Maximalleistung betrieben werden kann. Wenn der Bedarf unterhalb dieser Mindestleistung liegt, bleibt das BHKW aus. Aufgrund dieser flexiblen Steuerung wird kein thermischer Speicher benötigt.

Da die Input-Daten der Bedarfe aus SimStadt auf stündlicher Basis vorliegen, wird auch in den Systemmodellen auf Stundenbasis gerechnet. Zur Bestimmung der daraus folgenden etwaigen Ungenauigkeiten wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Sensitivitätsanalyse für das zweite beschriebene Systemmodell der wärmegeführten BHKWs in Kaskade und Gaskessel mit zwei verschiedenen zeitlichen Auflösungen der Input-Daten des Wärmebedarfs durchgeführt. Der stündlich summierte Bedarf ist bei beiden Datensätzen identisch. Der Zeitschritt im Simulationsmodell lässt sich beliebig anpassen und kann z.B. auf 15 Minuten eingestellt werden, wenn die Input-Daten in der entsprechenden Auflösung vorliegen. In Tabelle 4.4 sind die Simulationsergebnisse des Modells zu sehen, einmal mit dem Input des Wärmebedarfs in stündlicher Auflösung und einmal mit 15-minütiger Auflösung. Ebenfalls in der Tabelle zu sehen sind die jeweiligen Betriebsstunden der einzelnen BHKWs und des Gaskessels sowie die Abweichungen zwischen den beiden Simulationsdurchgängen.

Die Abweichung bei der erzeugten Wärme von BHKW 1 und BHKW 2 zwischen beiden Simulationsdurchgängen liegt bei 0,23 %, die Abweichung bei der Anzahl der Betriebsstunden liegt bei 0,03 bzw. 0,30 %, wobei beim Simulationsdurchgang mit der Auflösung von einer Stunde jeweils eine längere Betriebszeit festzustellen ist. Etwas größer sind die Unterschiede bei BHKW 3, welches nur bei sehr hohem Wärmebedarf aktiviert wird, mit einer Abweichung zwischen den beiden Simulationsdurchgängen von 1,22 % bei der Wärmemenge bzw. 1,60 % bei den Betriebsstunden. Die erzeugte Wärmemenge des Gaskessels erhöht sich bei der zeitlichen Auflösung von 15 Minuten um 3,09%, die Betriebsstunden um 0,44%.

In Abbildung 4.29 sind die Ergebnisse der beiden Simulationsdurchgänge grafisch gegenübergestellt. Der obere Teil der Abbildung zeigt die Ergebnisse für den Wär-

4.3 Simulation von Energiesystemen zur Wärmeversorgung in Quartieren

Tabelle 4.4: Vergleich der Simulationsergebnisse bei Zeitschritten von 1 Stunde sowie 15 Minuten und Abweichungen zwischen den beiden Simulationsdurchgängen

	1 h		15 Min.		Abweichung	
	Summe [MW]	Betriebs- zeit [h]	Summe [MW]	Betriebs- zeit [h]	Summe	Betriebs- zeit
Wärmebedarf	20.847		20.847		0,00%	
Verluste	312		312		0,00%	
BHKW 1						
Wärme	9.271	8.759	9.250	8.757	-0,23%	-0,03%
BHKW 2						
Wärme	5.676	5.525	5.663	5.509	-0,23%	-0,30%
BHKW 3						
Wärme	3.691	3.694	3.646	3.635	-1,22%	-1,60%
BHKW 1-3						
Strom	19.640	8.759	19.559	8.757	-0,41%	-0,03%
Gaskessel						
Wärme	2.521	5.113	2.599	5.135	3,09%	0,44%

mebedarf (blau), die aufsummierte Wärmeerzeugung aller drei BHKWs (orange) sowie die Wärmeerzeugung des Gaskessels (gelb) bei einem Zeitschritt von 15 Minuten für den Abschnitt von Minute 148.000 bis Minute 152.000. Im unteren Teil der Abbildung sind für den selben Zeitraum (Stunde 2466 bis Stunde 2533, was knapp drei Tagen Mitte März entspricht) die entsprechenden Ergebnisse bei einem Zeitschritt von einer Stunde zu sehen.

Für jeden Zeitschritt wird jeweils neu bestimmt, welche BHKWs in Betrieb sind. Dies führt dazu, dass die Taktung der BHKWs und des Gaskessels beim Zeitschritt von 15 Minuten höher ist, als beim Zeitschritt von einer Stunde. Insgesamt ist der Unterschied der Ergebnisse für die BHKW- und Gaskessel-Einsätze zwischen dem Zeitschritt von einer Stunde und dem Zeitschritt von 15 Minuten relativ gering, so dass aufgrund von kürzerer Rechenzeit und einfacherer Handhabung fortan

4 Methoden zur Modellierung von urbanem Wärmebedarf und Versorgungsoptionen

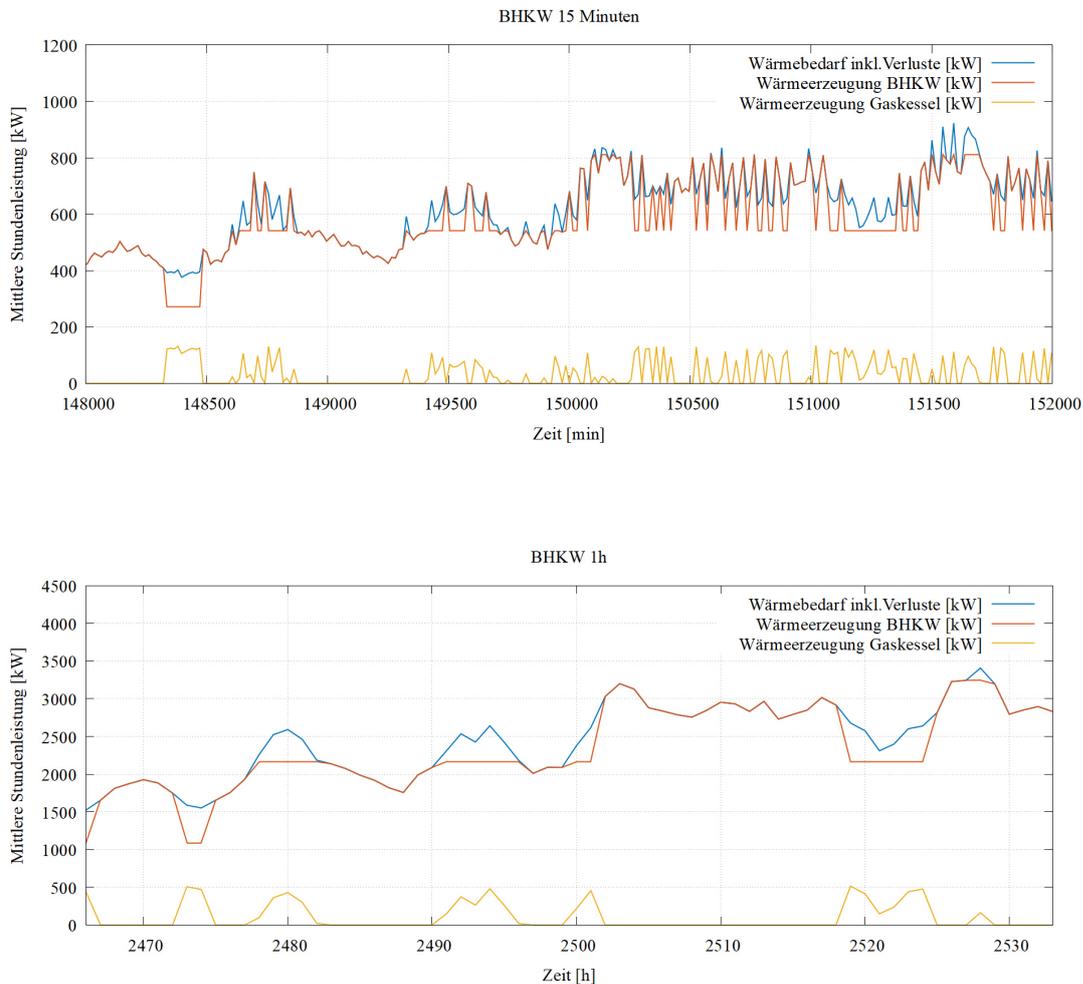


Abbildung 4.29: Output des Systems mit drei BHKWs in Kaskade und Gaskessel für zwei Simulationdurchgänge mit 15-minütiger (oben) bzw. stündlicher (unten) Auflösung

der Zeitschritt von einer Stunde als Standard in den Simulationsmodellen genutzt wird.

Der Unterschied beim dritten System bestehend aus Biomassekessel, Gaskessel und Speicher ist in der Betriebsweise des Biomassekessels zu finden. Um einen sogenannten Gluterhalt des Kessels, bei dem eine starke Rauchentwicklung stattfindet, zu vermeiden, wird eine Mindestleistung des Biomassekessels berücksichtigt, die nicht unterschritten werden darf. Diese ist in der Regel bei etwa 35 % der Nominalleistung. Für das Gesamtsystem bedeutet dies, dass der Bedarf ebenso wie beim ersten BHKW-System zunächst aus dem Speicher gedeckt wird.

Wenn der Speicherinhalt allerdings nicht ausreicht, werden zwei Fälle unterschieden, nämlich ob der Bedarf kleiner oder größer ist, als die Mindestleistung des Biomassekessels beträgt. Wenn er kleiner ist, wird der Gaskessel aktiviert. Wenn er größer ist, geht der Biomassekessel in Betrieb und produziert genau so viel Wärme, wie benötigt wird. Wenn der Bedarf größer ist, als die Nennleistung des Biomassekessels, gehen beide Kessel in Betrieb. Damit ist die Steuerung ähnlich zum zweiten BHKW Modell, wo drei BHKW-Module in Kaskade hintereinander geschaltet sind.

Das zentrale Wärmepumpen Modell ist analog zum Modell der dezentralen Wärmepumpe definiert und wird im folgenden Kapitel beschrieben.

Dezentrale Wärmeversorgungssysteme

Für die folgenden dezentralen Wärmeversorgungssysteme wurden Simulationsmodelle in INSEL erstellt:

- Wärmepumpe (Luft/Wasser oder Wasser/Wasser oder Sole/Wasser), Gaskessel, Speicher,
- Biomassekessel, Speicher.

In Abbildung 4.30 ist ein dezentrales System mit einer Wärmepumpe, einem Gaskessel und einem thermischen Speicher schematisch dargestellt. Die Wärmepumpe wird mit Strom und Umweltwärme betrieben, der Gaskessel wird mittels eines Gasanschlusses versorgt. Die Umweltwärme zum Betrieb der Wärmepumpe kann dabei aus verschiedenen Quellen kommen. Die Steuerung des Systems ist analog zu den im vorigen Kapitel 4.3.2 beschriebenen zentralen Systemen, allerdings auf Einzelgebäudeebene: Der Lastgang des Gebäudes stellt eine Bedarfsdeckungsanfrage an den Speicher dar. Wenn der Speicherinhalt zum Zeitpunkt der Anfrage ausreicht, um den Bedarf zu decken, wird dieser direkt durch den Speicher gedeckt ohne dass die Wärmepumpe aktiviert wird. Wenn der Bedarf dagegen zu hoch bzw. der Speicherstand zu niedrig ist, wird die Wärmepumpe aktiviert. Wenn die Wärmemenge von Wärmepumpe und Speicher nicht ausreicht, um den restlichen Bedarf zu decken, wird der Gaskessel aktiviert.

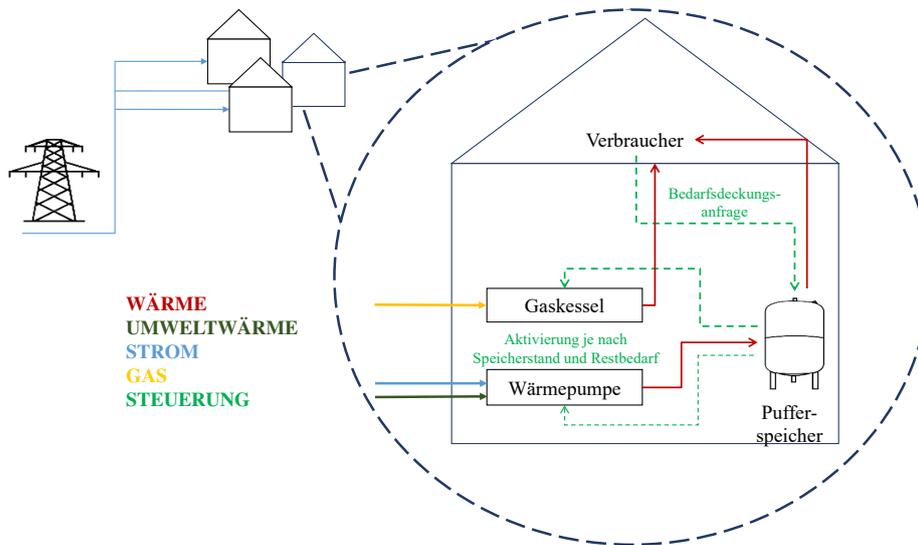


Abbildung 4.30: Schema des dezentralen Versorgungssystems mit Wärmepumpe, Gaskessel und Speicher

Die temperaturabhängigen Werte für COP und Wärmeproduktion der Wärmepumpe werden im Modell als zweidimensionales Polygon berücksichtigt, abhängig von Vorlauf- und Quelltemperatur. Die Anzahl der Knoten ist dabei beliebig anpassbar je nach Datenlage der verwendeten Wärmepumpen. Zwischen den Punkten des Polygons wird eine zweidimensionale lineare Interpolation durchgeführt. Abhängig von der Wärmequelle (Luft, Wasser oder Sole) wird ein stündlich aufgelöstes Temperaturprofil eingelesen.

Output aus diesem Modell sind die folgenden Zeitreihen:

- Wärmeerzeugung Wärmepumpe [kWh],
- Strombedarf Wärmepumpe [kWh],
- Wärmeerzeugung Gaskessel [kWh],
- Gasbedarf Gaskessel [m³],
- Speicherstand [kWh],
- Stromüberschuss bzw. -defizit [kWh].

Die von SimStadt errechnete PV-Stromerzeugung sowie der Strombedarf aus Haushalt und ggf. Elektromobilität für jedes Einzelgebäude kann mit dem Strombedarf der Wärmepumpe auf stündlicher Basis im Modell verrechnet werden. So kann z.B. der Deckungsanteil des Strombedarfs der Wärmepumpe durch die Stromproduktion aus PV [61] berechnet werden.

Um die Ergebnisse eines solchen vereinfachten Modells mit detaillierteren Modellierungen zu vergleichen, wurden zwei Varianten des Systems einer dezentralen Wärmepumpe mit thermischem Speicher erstellt und verglichen. Das detaillierte Modell bildet ein bestehendes reales System eines Einzelgebäudes nach und ist mit den Messdaten dieses Gebäudes validiert. Es berücksichtigt getrennte Speicher für Heizung und Warmwasser, die Steuerung ist über einen komplexen 2-Punkt-Regler gesteuert. Das vereinfachte Modell hingegen nimmt ideal durchmischte Speicher und eine konstante Vorlauf- und Rücklauf-temperatur an. Die Abweichung der Gesamterzeugung auf Jahresebene zwischen den beiden Modellvarianten liegt bei 2,2 %, die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe unterscheidet sich um 0,1 zwischen dem detaillierten Modell (3,9) und dem vereinfachten Modell (4,0) [135]. Die Nutzung des detaillierten Modells ist daher vor allem für die genaue Analyse des Zusammenspiels von Bedarfen und Erzeugung sowie Speicherung für einzelne Tage interessant; bei einer Betrachtung größerer Zeiträume bis zu einem Jahr ist das vereinfachte Modell mit seinen kürzeren Rechenzeiten hingegen geeigneter.

Das zweite Modell für eine dezentrale Wärmeversorgung ist ein Biomassekessel mit thermischem Speicher. Die Regelung der Komponenten in diesem Modell folgt dem gleichen Prinzip wie zuvor beim Modell der zentralen Erzeugung aus Biomasse, bei der hier im dezentralen Fall gegebenen monovalenten Versorgung fällt allerdings der Spitzenlasterzeuger weg.

4.3.3 Erstellung von Templates aus den Modellen

Aus den zuvor in Kapitel 4.3.2 beschriebenen INSEL Simulationsmodellen für zentrale und dezentrale Energieversorgungssysteme werden im nächsten Schritt Dateischablonen, sogenannte *Templates* generiert. Diese Templates beschreiben die grafischen Modelle in Textform. Die genutzte Blöcke und deren Verbindungen im

Modell sind hier beschrieben, ebenso wie die Pfade für gelesene und geschriebene Dateien. In Abbildung 4.31 sind mehrere Ausschnitte aus einem in Text konvertierten INSEL Modell der dezentralen Wärmepumpe mit Gaskessel und Speicher zu sehen, die im Folgenden beschrieben werden.

```

a 279 b 149 READ
    280 p 149
    281 | | | 1.00000000
    282 | | | 1.00000000
    283 | | | 'C:\Users\verena.weiler\Documents\2. Referenzenergiesysteme\3. INSEL Model
    284 | | | le\HP_Gasboiler_Storage\Input_HD.txt'
    285 | | | '*'
    286 b 150 CUM 62.1
    287 b 151 WRITE 136.1 148.1 62.1 149.1 125.1 69.1 57.1 77.1 120.1
    288 p 151
    289 | | | 1.00000000
    290 | | | 0.00000000E+000
    291 | | | '\Output_HP_gasboiler_storage.txt'
    292 | | | '*'
    293 b 152 EXPG 129.1 28.1

b 64 b 24 CONST
    65 p 24
    66 | | | 9.00000000
    67 b 25 CONST
    68 p 25
    69 | | | 58.00000000
    70 b 26 CONST
    71 p 26
    72 | | | 0.00000000E+000
    73 b 27 CONST
    74 p 27
    75 | | | 20.00000000
    76 b 28 CONST
    77 p 28
    78 | | | 2.00000000

c 210 b 136 HOY 8.1 8.2 8.3 8.4
    211 b 137 LN 71.1
    212 b 138 LN 65.1
    213 b 139 NOP 132.1
    214 b 140 NOP 76.1
    215 b 141 POLYG2 25.1 147.1
    216 p 141
    217 | | | 0.00000000E+000
    218 | | | 24.00000000
    219 | | | 35 -20.0 2.2
    220 | | | 35 -10.0 4.9
    221 | | | 35 -7.0 5.3
    222 | | | 35 -5.0 5.2
    223 | | | 35 0.0 4.3
    224 | | | 35 2.0 4.4
    225 | | | 35 5.0 6.5
    226 | | | 35 7.0 7.4
    227 | | | 45 -20.0 3.4
    
```

Abbildung 4.31: Drei Ausschnitte aus einem in Text konvertierten INSEL Modell

Generell wird jeder Block *b* im Modell durch eine fortlaufende Nummer eindeutig identifiziert und mit einer hinter der Nummer stehenden Abkürzung beschrieben, z.B. CONST für *constant*, CUM für *cumulation* oder LN für den natürlichen Logarithmus. Nach dieser Abkürzung wird ggf. eine für diesen Block relevante Verbindung zu einem oder mehreren weiteren Blöcken angegeben. In Abbildung 4.31 c hat z.B. der Block 136 HOY mehrere Verbindungen zu Block 8: die Inputs

von Block 136 werden durch die Outputs eins bis vier des Block 8 definiert. Ebenso ist Block 137 LN mit dem ersten Output von Block 71 verbunden. Manche Blöcke sind durch Parameter p genauer definiert, wie z.B. in Abbildung 4.31 b die Konstanten, die im Modell jeweils durch einen *default* Wert beschrieben werden. In Abbildung 4.31 a sind zwei Verbindungen zu externen Dateien über je einen READ und einen WRITE Block zu sehen. Beide Blöcke haben je zwei Parameter die angeben, welche Werte der Datei gelesen werden sollen (*number of values to be read per record* und *number of records to be skipped on the first call*), darüber hinaus ist der genaue Dateipfad spezifiziert, der entweder absolut oder relativ sein kann. Bei einem relativen Pfad muss sichergestellt werden, dass sich die Datei im gleichen Ordner befindet wie das Modell.

Die Erstellung und der Aufbau eines Templates aus einem solchen Modell wird anhand der zuvor beschriebenen Ausschnitte des Modells erklärt. In Abbildung 4.32 sind die zu Abbildung 4.31 korrespondierenden Stellen des zugehörigen Templates zu sehen.

```

a 202 b 134 READ
    203 p 134
    204           3 % which column: 1ghi, 2dhi, 3Ta
    205           0 % no header
    206           '{{WeatherProcessor.location}}/hourly_GHI_DHI-Ta.prn' %outside air temp
    207
    208 b 135 READ
    209 p 135
    210           2 % which column: 1hoy, 2heat demand, 3load duration curve
    211           2 % skip two lines of header
    212           '{{HourlyHeatDemand.location}}/{{building.gmlId}}_hourly_demand.prn'
    213           '**'

b 22 b 8 CONST
    23 p 8
    24           {{step.getReturnTemperature}} %from GUI
    25 b 9 CONST
    26 p 9
    27           3600
    28 b 10 CONST
    29 p 10
    30           {{backup_system.installedThermalPower.number.get}} %from energycomponents lib
    31 b 11 CONST
    32 p 11
    33           {{step.getSupplyTemperature}} %from GUI

c 259 b 141 CUM 107.1
    260 b 142 POLYG2 35.1 134.3 % Heat pump : {{best_heat_pump.modelName}}
    261 p 142
    262           0
    263           {{best_heat_pump.datapoints_count}}
    264 {{#each best_heat_pump.heatOutput.functions}} {{#each this.datapoints}} {./key} {{this.x}} {{this.y}}
    265 {/each} {/each}
    266 b 143 POLYG2 35.1 134.3
    267 p 143
    268           0
    269           {{best_heat_pump.datapoints_count}}
    270 {{#each best_heat_pump.coefficientOfPerformance.functions}} {{#each this.datapoints}} {./key} {{this.x}} {{this.y}}
    271 {/each} {/each}
    272 b 144 EXPG 120.1 15.1
    273 b 145 LE 91.1 32.1
  
```

Abbildung 4.32: Drei Ausschnitte aus dem Template eines INSEL Modells

Zunächst werden in Abbildung 4.32 a Ergebnisse aus vorherigen Workflow-Schritten von SimStadt aufgerufen. In diesem Beispiel wird von Block 134 READ die Datei *hourly_GHI_DHI_Ta.prn* gelesen, die im Ordner *WeatherProcessor.location* liegt. Diese Datei wird vom vorgelagerten SimStadt Workflow-Schritt *Weather Processor* geschrieben und kann daher hier referenziert werden. Diese Datei besteht aus drei Spalten: Globalstrahlung, diffuse Horizontalstrahlung und Lufttemperatur. Da hier im Modell die dritte Spalte benötigt wird, ist der erste Parameter des Blocks 3. Da die Datei keine Überschriften hat, müssen keine Zeilen übersprungen werden, daher ist der zweite Parameter 0. Ebenso wird in Block 135 READ die Datei des stündlichen Heizwärmebedarfs *building.gmlId_hourly_demand.prn* eingelesen. Im vorangehenden SimStadt Workflow-Schritt *Hourly Heat Demand* wird für jedes Gebäude eine Datei mit dem stündlichen Wärmebedarf geschrieben, welche immer einen Dateinamen bestehend aus der individuellen GML ID des Gebäudes und dem Zusatz *_hourly_demand.prn* erhält. So kann SimStadt für jedes Gebäude die jeweils richtige Datei des Wärmebedarfs zuordnen und im Template verwenden. In dieser Datei werden wie zuvor auch mehrere Spalten geschrieben, von der hier die zweite Spalte eingelesen werden soll. Die Spalten haben zwei Überschriften (*header*), die übersprungen werden sollen. Dies wird über die Parameter des READ Blocks definiert.

Weiterhin werden im Template in Abbildung 4.32 b Teile der zuvor im Modell konstanten Variablen mit Werten aus der in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Energiesystemkomponenten-Bibliothek verknüpft. Dafür wird im Template die Variable, die benötigt wird, beschrieben, hier *backup_system.installedThermalPower.number.get*. Dadurch wird beim Ausführen des Modells das entsprechende Attribut *installedThermalPower* der definierten Komponente des *back-up systems* (Gaskessel) aus der Datenbank in das Template geschrieben. Darüber hinaus gibt es Variablen wie Vor- und Rücklauftemperaturen, die in der SimStadt GUI im aktuellen Workflow-Schritt vom Nutzer eingegeben bzw. als *default* Werte vorgegeben sind.

Weitere Informationen, die aus der Datenbank der Energiesystemkomponenten-Bibliothek in das Template geschrieben werden, sind die Werte der temperaturabhängigen COPs und Heizleistungen der jeweils verwendeten Wärmepumpe. In Abbildung 4.32 c wird in Block 142 POLYG2 das Abrufen der Informationen aus der Energiesystemkomponenten-Bibliothek in Form einer Datentabelle

beschrieben. Dabei wird zunächst die Anzahl der Datenpunkte bestimmt, also gezählt wie viele Wertepaare der Wärmepumpe in der Datenbank vorhanden sind (*best_heat_pump_datapoints_count*). Anschließend werden hier die Datenpunkte des *heatOutput* und analog dazu in Block 143 die Datenpunkte des *coefficientOfPerformance* in den zuvor beschriebenen Polygon Block POLYG2 geschrieben. Vor jedem Wertepaar (*this.x, this.y*) wird darüber hinaus auch der *key*, also die in der Datenbank angegebenen Vorlauftemperatur, in das Template geschrieben.

Bei einem dezentralen Versorgungssystem wird dieses allgemeine Template für jedes einzelne Gebäude nacheinander mit den entsprechenden Werten verknüpft. Anschließend wird INSEL von SimStadt aufgerufen und jedes der nun individuell parametrisierten Modelle in INSEL simuliert. Die Methode, mit der die jeweils passenden Komponenten bzw. deren Werte bestimmt werden, wird im folgenden Kapitel 4.3.4 beschrieben. Für die verschiedenen zuvor beschriebenen zentralen und dezentralen Energiesysteme liegt jeweils ein allgemeines Template vor. Der Nutzer kann über ein drop-down Menü in der SimStadt GUI auswählen, welches dieser Systeme simuliert werden soll.

4.3.4 Dimensionierung und Parametrisierung der Simulationsmodelle

Ziel ist die automatische Parametrisierung der Modelle, ohne dass der Anwender detaillierte Angaben zu den jeweiligen Komponenten und deren Regelung für einen einzelnen Simulationsdurchlauf machen muss. Es stehen hierbei zwei Möglichkeiten zur Parametrisierung der Modelle zur Verfügung, die im Folgenden genauer beschrieben werden. In beiden Fällen ist das Ergebnis das automatische Befüllen des zuvor beschriebene Templates des Energiesystems für jedes Gebäude (bei dezentralen Systemen) bzw. für das gesamte Quartier (bei zentralen Systemen) mit den passenden Werten.

Regelbasierte Dimensionierung

Ein regelbasiertes System ist eine Form eines Expertensystems oder wissensbasierten Systems [88]. Bestandteile sind dabei eine Wissensbasis, eine Anzahl von

Regeln sowie eine Inferenzmaschine, auch Schlussfolgerungsmaschine genannt. Nutzer werden dabei unterstützt, Probleme wie ein Experte lösen zu können.

Im vorliegenden Fall der Dimensionierung und Auswahl geeigneter Komponenten für ein System auf Regelbasis wird der *modus ponens* für die Inferenz gewählt, also die Abtrennungsregel in der Form „Wenn A, dann B“. Die Wissensbasis ist dabei die zuvor beschriebene Energiesystemkomponenten-Bibliothek, ein Beispiel für Regeln im vorliegenden System ist die Festlegung der INSEL Modelle, ihrer Komponenten und deren Beziehung zueinander.

In der Praxis werden die Wärmeerzeuger i.d.R. entweder nach einer zu erreichenden Zahl von Vollbenutzungsstunden ausgelegt, oder anhand des Wärmemengen- bzw. Lastanteils, welchen der Erzeuger abdecken soll. Da für die Berechnung der Vollbenutzungsstunden einer Komponente die von ihr erzeugte Wärme bekannt sein muss, diese aber ein Ergebnis der hier beschriebenen Systemmodelle ist, wird stattdessen der Lastanteil zur Dimensionierung herangezogen.

Die meisten der zuvor in Kapitel 4.3.2 beschriebenen Systemmodelle enthalten zwei Erzeuger sowie einen thermischen Speicher. Dabei ist je einer der beiden Erzeuger als Grund- bzw. Spitzenlasterzeuger definiert. Der Grundlasterzeuger wird dabei zuerst zur Bedarfsdeckung herangezogen. Erst wenn der Bedarf zu hoch ist, um durch den Grundlasterzeuger allein bereitgestellt werden zu können, wird der Spitzenlasterzeuger aktiviert. Um eine möglichst allgemein anwendbare und auf jedes beliebige Wärmeerzeugungssystemmodell übertragbare Dimensionierung der Komponenten zu gewährleisten, werden in der SimStadt GUI nur wenige, vom konkreten ausgewählten System unabhängige, Parameter vom Nutzer gefordert. Bei der regelbasierten Dimensionierung wird daher in der SimStadt GUI der Anteil abgefragt, den der Grundlasterzeuger an der Gesamtlast abdecken soll (x %). Der verbleibende Anteil (100-x %) wird dann durch den zweiten Erzeuger im Modell abgedeckt. Wenn es nur einen Erzeuger im Modell gibt, wird mit 100 % Bedarfsdeckung durch den Grundlasterzeuger gerechnet.

Daraus ergibt sich die folgende Abtrennungsregel: „Wenn der gegebene Anteil an der Spitzenlast x % ist, dann errechnet sich daraus ein Zielwert für die nominale Leistung y und damit ist der passende Erzeuger aus der Datenbank jener mit der geringsten Differenz zum Zielwert y“.

Die Dimensionierung des thermischen Speichers wird bei der Planung oftmals anhand der Stunden durchgeführt, die der Speicher die mittlere Last des Gebäudes bzw. des Netzes abdecken soll. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Energieversorger bei zu hohem Bedarf im Stromnetz Wärmepumpen für bis zu zwei Stunden am Stück abschalten dürfen, um die Netze zu entlasten. Der Pufferspeicher dient also zur Überbrückung dieser Sperrzeiten. Die Regel lautet somit: „Wenn die Anzahl an zu überbrückenden Stunden x ist, dann errechnet sich daraus sowie aus der mittleren Last eine zu speichernde Wärmemenge y ; der passende Speicher aus der Datenbank ist der mit der geringsten Differenz zu y “. Die mittlere Last wird dabei nur aus den Stunden des Jahres berechnet, in denen die Last größer 0 kW ist.

Für die regelbasierte Dimensionierung der Templates werden zusammenfassend die folgenden Angaben benötigt:

- Anteil des Haupterzeugers an der Spitzenlast in %,
- Anzahl Stunden, die der thermische Speicher die mittlere Last überbrücken soll in h,
- Vor- und Rücklauftemperaturen des Systems in °C.

Aus diesen Angaben werden dann die entsprechend benötigten Komponentengrößen errechnet, was hier an einem Beispiel eines dezentralen Systems, bestehend aus einer Wärmepumpe als Haupterzeuger, einem Spitzenlastkessel sowie einem thermischen Speicher, erläutert werden soll. Die folgenden Angaben sind Beispielwerte und können beliebig variiert werden.

Ein Gebäude hat eine angenommene Spitzenlast von 16,2 kW. Bei einer Nutzerangabe für die Abdeckung der Spitzenlast durch den Haupterzeuger von 40 % ergibt sich eine Zielgröße für die Wärmepumpe von $16,2 \text{ kW} \cdot 0,4 = 6,5 \text{ kW}$ und eine Zielgröße für den Gaskessel als Nebenerzeuger von $16,2 \text{ kW} \cdot 0,6 = 9,7 \text{ kW}$.

Basierend auf dem mittleren stündlichen Wärmebedarf bei einem Bedarf $> 0 \text{ kWh}$ und der Nutzerangabe zur Überbrückung der mittleren Last durch den Speicher von drei Stunden, der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf von 10 K und der spezifischen Wärmekapazität von Wasser von $4,187 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ errechnet sich

das benötigte Speichervolumen nach Formel 4.5. Bei einer mittleren Last von 5 kW ergibt sich so ein Ziel-Speichervolumen von 1,3 m³.

$$m = \frac{Q}{c \cdot \Delta T} \quad (4.5)$$

mit

m Masse [m³]

Q Wärmemenge [kWh]

c spezifische Wärmekapazität Wasser $\frac{J}{kg \cdot K}$

ΔT Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf [K]

Dimensionierung mit genetischem Algorithmus

Alternativ kann die Dimensionierung der einzelnen Komponenten des Wärmezeugungssystems mit einer Optimierungsmethode erfolgen. Grundsätzlich soll bei einem Optimierungsmodell die Zielfunktion maximiert oder minimiert und dabei ggf. eine Reihe von Nebenbedingungen berücksichtigt werden, um so eine optimale Lösung für ein Problem zu erhalten. Die Zielfunktion nimmt dabei i.d.R. eine betriebs- oder volkswirtschaftliche Sichtweise ein, Nebenbedingungen können z.B. technische Restriktionen sein [106]. Mittels verschiedener mathematischer Algorithmen kann der Lösungsweg gesucht werden, der die Zielfunktion erfüllt und dabei die Nebenbedingungen berücksichtigt.

Lineare Programme können Probleme aus reellen Zahlen mittels linearen Funktionen wie zum Beispiel dem Simplex-Verfahren [56] lösen. Bei gemischt-ganzzahligen linearen Programmen müssen die Variablen zumindest teilweise ganzzahlig sein. Hier können viele verschiedene Methoden zur Lösung unterschieden werden. Mit dem häufig angewandten *branch-and-bound* Verfahren wird z.B. ein komplexes Problem in mehrere Teil-Probleme zerlegt. Für diese sollen jeweils passende Schranken gefunden werden, außerhalb derer nicht weiter nach einer Lösung gesucht wird [114]. Dennoch ist bei diesen Verfahren die Rechenzeit relativ hoch, bis eine Lösung gefunden werden kann.

Daneben gibt es bei nicht-linearen Problemen eine Reihe an heuristischen und meta-heuristischen Verfahren für deren Lösung. Heuristische Verfahren sind dabei spezielle Lösungen für einzelne konkrete Probleme, während meta-heuristische Verfahren für verschiedene Probleme genutzt werden können. Sie alle haben das Ziel, eine möglichst gute Lösung zu finden, ohne dass garantiert werden kann, dass diese das Optimum darstellt [113]. Sie können unterteilt werden in populationsbasierte und auf einzelnen Individuen basierende Methoden [168]. Genetische Algorithmen (GA) als Teil der populationsbasierten Methoden versuchen mit Strategien der natürlichen Evolution nach Charles Robert Darwin, Lösungen für die formulierten Probleme zu finden. Diese Methode wurde zunächst in den 1960er Jahren beschrieben. Als Maß für die Zielerreichung dient beim GA die Fitness-Funktion, deren Maximum erreicht werden soll. Alle zur Verfügung stehenden Parameter werden zufällig und mehrfach variiert. Im ersten Schritt wird eine Population an Funktionen gebildet, die unterschiedliche Parameter hat. Von dieser Population werden dann die geeignetsten Funktionen anhand ihrer Fitness-Funktion ausgewählt. Diese wiederum werden neu kombiniert, geklont und mutiert, so dass neue Funktionen entstehen, die erneut aufgrund der Fitness-Funktion bewertet und ausgewählt werden. Die Raten für Mutationen (zufällige Veränderung von Parametern) und Re-Kombinationen, Populationsgrößen und der Anteil an Funktionen, die für die nächste Evolution ausgewählt werden, können frei bestimmt werden. Dies hat Auswirkungen auf die Rechenzeit. Nach jeder Evolution werden die Verbesserungen in Bezug auf die Fitness-Funktion geringer.

Der genetische Algorithmus ist für eine Vielzahl von Optimierungsproblemen geeignet [97] und ist das in der Energiesystemoptimierung am häufigsten genutzte meta-heuristische Verfahren [3]. Aufgrund ihres Designs sind GA leicht an verschiedene Probleme anpassbar [37]. Im Vergleich zu anderen Optimierungsverfahren kann die gesuchte Lösung mittels eines GA darüber hinaus in relativ kurzen Rechenzeiten erreicht werden [96]. So verwenden Koutroulis et al. genetische Algorithmen, um die optimale Dimensionierung von Photovoltaik- und Windgeneratorsystemen für einen Privathaushalt zu finden [96], Xu et al. beziehen zusätzlich Wasserkraft mit Pumpspeichieranlagen mit ein und wenden ihr System auf ein abgelegenes, netzunabhängiges Gebiet an [166]. Bernal-Agustin et

al. verwenden evolutionäre Algorithmen, um ein komplexes Photovoltaik-Wind-Diesel-Batterien-Wasserstoff-System zu entwerfen und zu dimensionieren [18]. Alle diese Studien konzentrieren sich auf die Dimensionierung von Stromerzeugungssystemen und nicht auf Wärmeerzeugungssysteme im Gebäudebereich. Außerdem berücksichtigen die meisten Studien nur die aktuellen Rahmenbedingungen und verwenden z.B. keine Prognosen für zukünftige Bedingungen und Entwicklungen, um ein optimal dimensioniertes Energiesystem zu entwerfen, das die jährlichen Gesamtkosten in der Zukunft reduziert.

Weitere, häufig im Bereich der Energiesystemoptimierung genutzte Verfahren sind Particle Swarm Optimization (PSO) und Ant Colony Optimization (ACO) [3]. Dabei ist die PSO zwar aufgrund des einfacheren Algorithmus schneller, es kann dabei jedoch vermehrt zum Konvergieren in einem lokalen Optimum kommen [137]. Die ACO benötigt i.d.R. länger um ein Optimum zu finden, dafür kann der Algorithmus auf Veränderungen in Echtzeit reagieren [137].

In der vorliegenden Arbeit wird die Methode des genetischen Algorithmus genutzt. Er wird im Rahmen dieser Arbeit eingesetzt, um die optimale Größe der verschiedenen Komponenten eines Wärmeerzeugungssystems im Simulationsmodell zu finden. Mit der DEAP Toolbox¹² [67] für Python können die zuvor beschriebenen, für den Algorithmus relevanten, Parameter wie Zielfunktion, Populationsgröße und Mutationsrate variiert werden. Das Ergebnis ist schließlich die auf die Zielfunktion bezogene optimale Größe, also hier die optimale Nominaleistung einer Komponente bzw. das optimale Volumen des Speichers.

Aus Sicht des Python Skripts ist das INSEL Modell eine sogenannte blackbox, d.h. die Funktionen und Gleichungen des Simulationsmodells sind nicht einsehbar. Methoden wie die lineare Optimierung können in Verbindung mit solchen Modellen nicht angewandt werden, da hierfür die Gleichungen innerhalb der Modelle gelöst werden können müssen. Stattdessen werden mit dem GA die Parameter der Simulationsmodelle in mehreren Simulationsdurchläufen variiert. Es wird für jede Komponente ein Zielbereich angegeben, innerhalb dessen der Zielwert liegen muss, also in diesem Fall eine minimale und eine maximale Größe der jeweiligen Komponenten. Lösungen außerhalb dieses Bereichs werden nicht zugelassen. Der

¹² <https://deap.readthedocs.io/en/master/index.html>

Vorteil, wenn die Gleichungen nicht fest in den Modellen integriert sind, ist eine erhöhte Transparenz für den Nutzer und eine einfachere Erweiterung z.B. um weitere Modelle [87].

Aus der Vielzahl der möglichen Lösungen für die Größe einer Komponente soll mithilfe des genetischen Algorithmus schließlich diejenige gefunden werden, die das gegebene Ziel am besten erfüllt. Das Ziel ist hier die Erreichung der geringsten möglichen Gesamtsystemkosten.

In Kapitel 5.3.2 wird der genetische Algorithmus in Python mit dem in Kapitel 4.3.2 beschriebenen INSEL Modell verknüpft und auf eine Fallstudie angewandt. Für jede Generation werden die jeweiligen zu optimierenden Parameter in das INSEL Modell geschrieben, das Modell wird anschließend ausgeführt. Nun wird die Fitness der Ergebnisse bewertet und die Parameter in einer weiteren Simulation des Modells so verändert, dass eine höhere Fitness in dieser nächsten Generation erreicht werden kann.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist die Priorität nicht bei der Erreichung eines globalen Optimums, welches bei meta-heuristischen Verfahren wie dem genetischen Algorithmus nicht immer gefunden werden kann. Vielmehr findet der GA eine Region mit vielen guten Lösungen, die sich jeweils nur in geringem Maße voneinander unterscheiden [37]. Bei der hier vorgenommenen Modellierung von Energiesystemen kann es darüber hinaus immer kleinere Modellungenauigkeiten geben, die das vermeintlich gefundene globale Optimum verfälschen könnten [27].

4.3.5 Kostenberechnung

Abhängig von der installierten Leistung einer konkreten Komponente ergibt sich die erforderliche Investition. In Kapitel 4.2.1 wurde das Vorgehen zur Definition der entsprechenden Funktionen beschrieben.

Die Annuität der kapitalgebundenen Investitionen ergibt sich nach VDI 2067 [155]. Gemeinsam mit den jährlichen betriebsgebundenen Wartungskosten über die gesamte Lebensdauer abhängig von der Investition, ergeben sich nach Formel 4.6 die jährlichen Gesamtkosten je Komponente.

$$f_{Komponenten} = \sum_k A_{N,K,k} + \sum_k f_{w+inst.,k} \quad (4.6)$$

Für die Komponenten-Dimensionierung mit genetischem Algorithmus muss bei einer Optimierung auf Gesamtkosten (bestehend aus fixen und variablen Kosten) eine entsprechende Zielfunktion aufgestellt werden. Formel 4.7 zeigt die Zielfunktion, welche sich aus drei weiteren Formeln (4.6, 4.8 und 4.9) zusammensetzt. Die Kosten der Komponenten werden durch Formel 4.6 beschrieben, Formel 4.8 beschreibt die Energiekosten des Systems, welche sich aus der Brennstoff- bzw. Strommenge $Q_{i,in}$ und dem Preis $p_{i,in}$ des jeweiligen Energieträgers zusammensetzt. Darüber hinaus werden Erlöse aus der Stromeinspeisung in Höhe von $Q_{i,out}$ mit der Vergütung $p_{i,out}$ berücksichtigt.

$$f_{ges} = f_{Komponenten} + f_{Energie} + f_{CO_2} \quad (4.7)$$

$$f_{Energie} = \sum_k Q_{k,in} \cdot p_{k,in} - \sum_k Q_{k,out} \cdot p_{k,out} \quad (4.8)$$

In Formel 4.9 werden die Kosten für CO₂-Emissionen gesondert betrachtet. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Kosten für CO₂-Emissionen nicht bereits in den Kosten für die Energieträger beinhaltet sind, sondern stattdessen separat berechnet werden. p_{CO_2} ist dabei der Preis pro Tonne CO₂, $E_{CO_2,i}$ ist der jeweilige spezifische CO₂-Faktor des Energieträgers.

$$f_{CO_2} = p_{CO_2} \cdot \sum_k Q_{k,in} \cdot E_{CO_2,n} \quad (4.9)$$

5 Anwendung der entwickelten Methoden

Die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Methoden, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurden, werden nun im Folgenden auf mehrere Fallstudien angewandt. Dabei kommen in den Fallstudien jeweils verschiedene Methoden zum Einsatz.

5.1 Wärmebedarfssimulation mit zusätzlichen Datenquellen

In Kapitel 4.1.1 wurde die entwickelte Methode beschrieben, mit der bei unzureichender Datenlage oder komplett fehlenden Informationen zum Baujahr der Gebäude in einem Quartier oder einer Stadt diese Daten aus frei verfügbaren Datenquellen beschaffen, den Gebäuden zugewiesen sowie daraus neue CityGML Dateien erzeugt werden können. Im Folgenden wird die Anwendung dieser Methode auf die Fallstudie Rainau beschrieben [171].

Rainau ist eine Gemeinde im baden-württembergischen Ostalbkreis mit etwa 3.300 Einwohnern, die CityGML Datei enthält 892 Gebäude. Diese wurde zunächst mit Informationen zu Baujahr und Nutzung angereichert, die von der Gemeinde selbst bereitgestellt wurden (Referenzfall). Eine Übersicht zur Anzahl der Gebäude je Altersklasse ist in Abbildung 5.1 in blau zu sehen. Hier sind neben der CityGML Datei mit den Daten aus der Gemeinde auch die Informationen aus den drei CityGML Dateien abgebildet, die mit Daten basierend auf zwei verschiedenen Quellen angereichert wurden (IWU-Datenbank sowie zwei Durchgänge mit den Zensus-Daten) zu sehen.

Auffällig sind vor allem die Abweichungen in den ersten beiden Altersklassen, in die laut Gemeindedaten nur sehr wenige Gebäude fallen, denen bei der Nutzung der IWU-Statistik als Datenquelle aber eine sehr hohe Anzahl der Gebäude zugeordnet wurden. Auch bei Verwendung der Zensus-Daten wird eine höhere Anzahl Gebäude diesen beiden Klassen zugewiesen, allerdings deutlich weniger

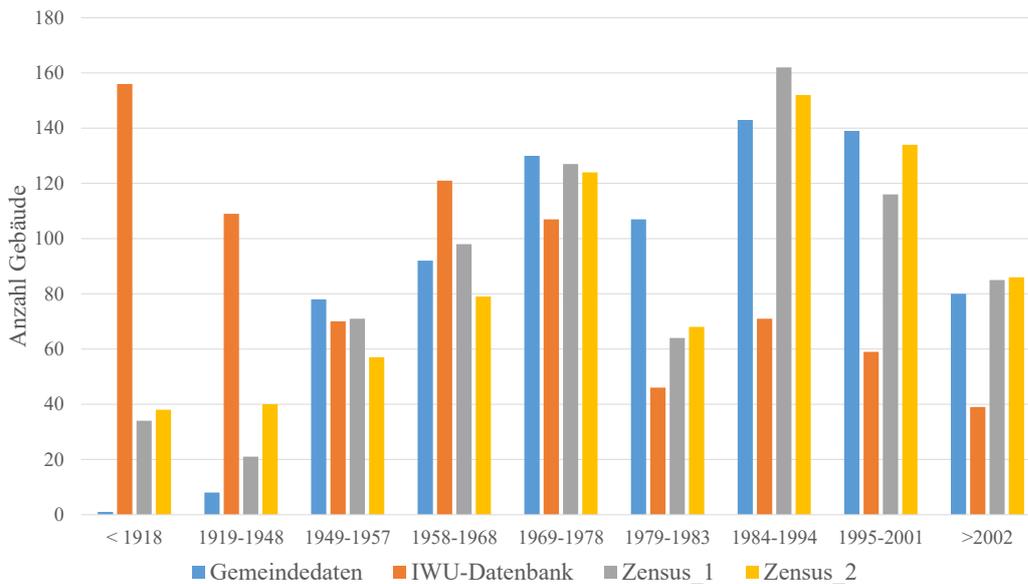


Abbildung 5.1: Ergebnisse für Fallstudie Rainau: Anzahl Gebäude je Altersklasse laut Gemeindedaten, laut Zuordnung nach IWU-Datenbank sowie zwei Durchgängen mit Zensus-Daten

als bei Nutzung der IWU-Datenbank. In den folgenden Altersklassen ähneln sich alle vier Fälle, mit Abweichungen von den Gemeindedaten v.a. bei Nutzung der IWU-Statistik. Ab der Altersklasse 1979-1983 divergieren insbesondere wieder die Verteilungen basierend auf den IWU-Daten von denen der Gemeindedaten, wobei in dieser Altersklasse auch deutliche Unterschiede zwischen Gemeinde und Zuordnung nach Zensus zu finden sind, die sich in den folgenden Altersklassen wieder reduzieren.

In Abbildung 5.2 sind die Auswirkungen der verschiedenen Zuordnungsmethoden auf den spezifischen Heizwärmebedarf in Rainau zu sehen. Der Heizwärmebedarf wurde mit SimStadt simuliert, siehe Kapitel 3.4. Die Heizwärmebedarfe der Altersklassen ab 1949 unterscheiden sich in Summe nicht stark, auch die Verteilung auf die Gebäudetypen zeigt keine auffälligen Unterschiede. In der Altersklasse mit den ältesten Gebäuden (Baujahr < 1918) finden sich bei den Gemeindedaten ausschließlichen EFH mit einem hohen spezifischen Heizwärmebedarf, bei der Simulation basierend auf den anderen Datenquellen findet sich eine Mischung aus verschiedenen Gebäudetypen mit geringeren Werten. Beim Vergleich der beiden Durchläufe mit den Zensus-Daten fällt auf, dass in Zensus_1 in der Altersklasse

1919-1948 keine MFH zu finden sind. Dies liegt daran, dass bei der Zuordnung der Baujahre zu den Gebäuden der Gebäudetyp nicht berücksichtigt werden konnte und daher zufällig alle 21 Gebäude in dieser Altersklasse nicht dem Gebäudetyp MFH entsprechen, sondern ausschließlich EFH und RH diesen Baujahren zugeordnet wurden.

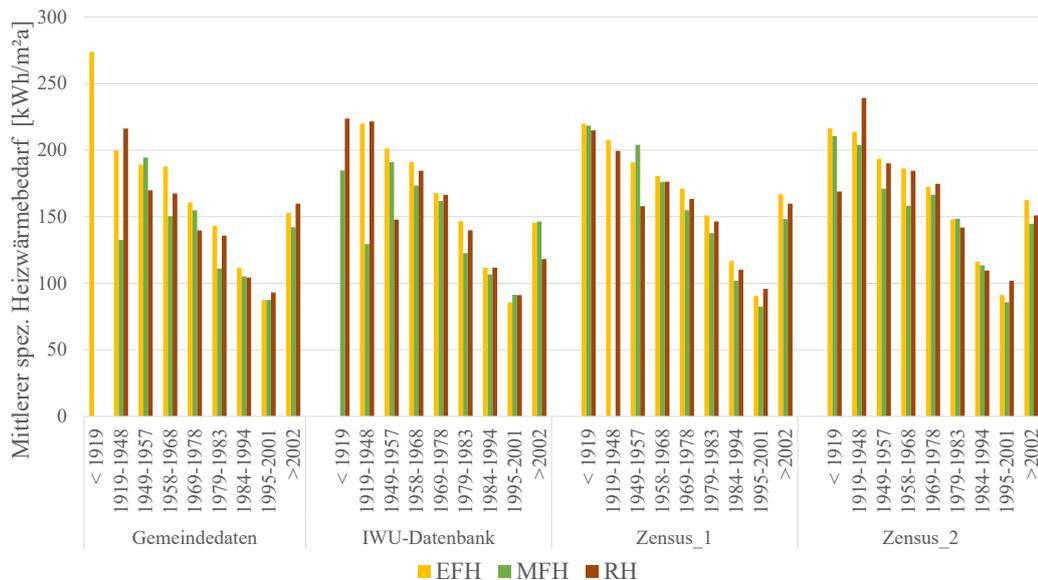


Abbildung 5.2: Ergebnisse für Fallstudie Rainau: spezifischer Heizwärmebedarf je Altersklasse laut Gemeindedaten, Zuordnung nach IWU-Datenbank sowie zwei Durchgängen mit Zensus-Daten

Bei einem Vergleich des Heizwärmebedarfs von individuellen Gebäuden kann es zu deutlichen Abweichungen zwischen den verschiedenen CityGML Dateien und dem Referenzfall geben. In Rainau liegt die maximale Abweichung eines Einzelgebäudes bei 235 %, welches laut Gemeindedaten im Jahr 2000 erbaut wurde, bei der Zuordnung des Baujahrs aufgrund der IWU-Daten allerdings mit dem Baujahr 1830 versehen wird.

Wenn man den Gesamtwärmebedarf der Gemeinde, der jeweils mit den drei neu erzeugten CityGML Dateien berechnet wurde, mit dem Referenzfall der Gemeindedaten vergleicht, zeigen sich zwischen der Zuordnung nach IWU-Datenbank und dem Referenzfall Abweichungen von in Summe 23 %. Diese hohe Abweichung kann mit lokalen Besonderheiten der Fallstudie Rainau im Vergleich zur deutschlandweiten Entwicklung des Gebäudebestands erklärt werden: fast alle

Gebäude in Rainau wurden nach 1919 gebaut. Die Abweichung der beiden Durchläufe mit den Zensus-Daten zum Referenzfall belaufen sich auf jeweils 6,5 % und 4,5 %. Hier sind die lokalen Gegebenheiten von Rainau berücksichtigt, da sich die Zensus-Daten allein auf diese Gemeinde beziehen.

Die Methodik wurde auf eine weitere Fallstudie in der Gemeinde Walheim im Landkreis Ludwigsburg angewandt. Hier sind die Abweichungen des Wärmebedarfs bei der Zuordnung nach IWU-Statistik zu jenem basierend auf den Gemeindedaten mit 8 % deutlich geringer. Dies kann ebenfalls mit der lokalen Bauungsstruktur erklärt werden, die eher der deutschen IWU-Statistik entspricht als bei der ersten Fallstudie Rainau.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Anwendung der deutschlandweiten IWU-Statistik oft nicht ausreichend ist, da sie nicht die individuelle Stadtentwicklung berücksichtigt. Vor allem Zerstörungen im Zweiten Weltkrieg sowie gesteigerte Bauaktivität in der Nachkriegszeit können sich von Fall zu Fall stark unterscheiden. Solche Entwicklungen werden in den Daten des Zensus auf Gemeindeebene berücksichtigt. Daher sind diese Daten den IWU-Statistiken vorzuziehen, auch wenn sie keinen Bezug zu Gebäudetypen oder Flächen haben.

Die in Kapitel 4.1.1 beschriebene Methode zur Bestimmung fehlender oder ungenauer Attribute bezieht sich auf das Attribut *function*, also die Gebäudenutzung. Um zu überprüfen, in wie weit sich Informationen aus OSM zur Anreicherung von CityGML Dateien eignen, wurde das innerstädtische Quartier Stöckach in Stuttgart näher betrachtet. Die verwendete CityGML Datei des Gebietes, angereichert mit ALKIS Codes, umfasst insgesamt 1.260 Gebäude und besteht zu 53 % aus Wohngebäuden, teilweise mit einer Nebennutzung für Geschäfte oder Büros, 13 % Industrie, 6 % Büro- und Verwaltung sowie 4 % Verkaufsgeschäften, die restlichen 8 % bestehen hauptsächlich aus Bildungs- und Veranstaltungsgebäuden, Sportstätten und Restaurants. 16 % der Gebäude sind unbeheizt. Einige Gebäude stehen unter Denkmalschutz oder besitzen erhaltenswerte Fassaden.

Oftmals kann über eine Vor-Ort Begehung oder auch die genaue Betrachtung des Gebiets in Satellitenkarten ein erster Eindruck über die tatsächliche Nutzung der Gebäude gewonnen werden. So ist in Abbildung 5.3 ein beispielhafter Vergleich der Nutzung von jeweils zwei Gebäuden zu sehen, rechts die Informationen aus

der GML Datei inkl. ALKIS Codes sowie POIs aus OSM, links Aufnahmen von Google Earth bzw. Google Street View.

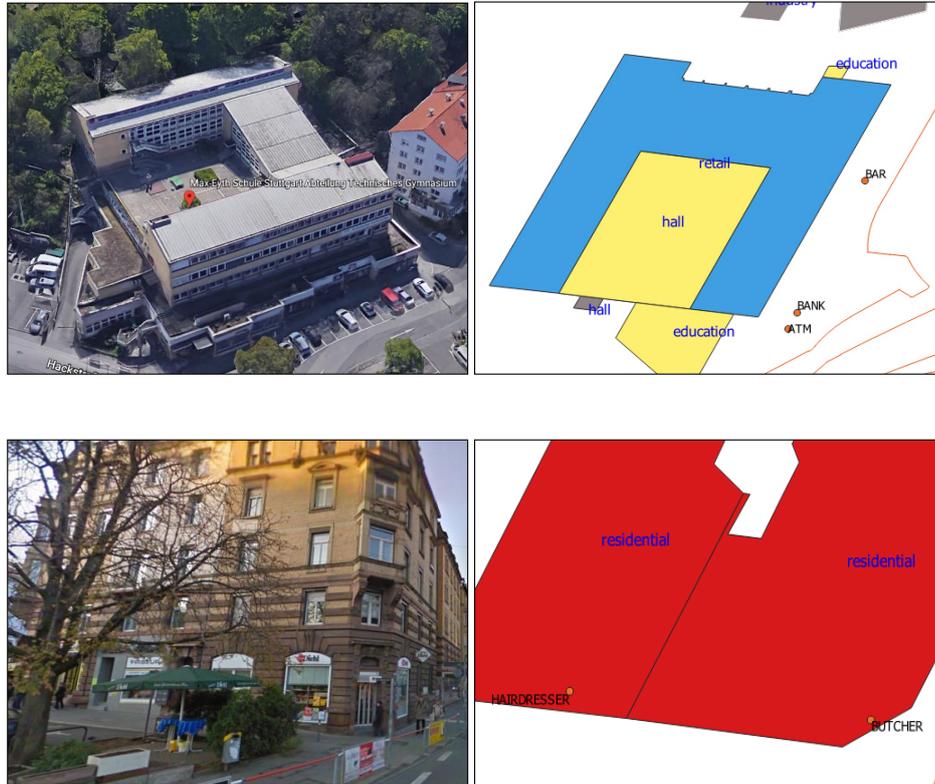


Abbildung 5.3: Vergleich der Gebäudenutzung aus verschiedenen Quellen: Google Earth bzw. Google Street View (links), CityGML inkl. ALKIS Codes sowie POIs aus OSM (rechts)

Im oberen Teil der Abbildung ist ein Gebäude zu sehen, das als Schule und Sporthalle mit vorgelagerten Geschäften im vorderen Teil des Gebäudes genutzt wird. In der CityGML Datei (farblich hervorgehoben mit Beschriftung in blau) werden die Anteile dieser verschiedenen Nutzungen falsch wiedergegeben und eine Geschäftsnutzung (*retail*) in blau für einen großen Teil des Grundrisses angenommen. Rechts daneben finden sich als beschriftete Punkte in schwarz die Bezeichnungen der POIs aus OSM. Sie zeigen an, dass sich im vorgelagerten Teil des Gebäudes eine Bank und eine Bar befinden. Im unteren Teil von Abbildung 5.3 sieht man in der Google Earth Ansicht links zwei Wohngebäude, welche im Erdgeschoss jeweils verschiedene Geschäfte beherbergen. Rechts in der Darstellung der Informationen aus ALKIS wird nur die Nutzung *residential*, also eine reine Wohnnutzung, für

beide Gebäude angegeben. Bei den POIs aus OSM ist jeweils ein *hairdresser*, also ein Frisör, und ein *butcher* (Metzger) hier verortet.

Bei einem Vergleich der jeweils in OSM und in der CityGML angezeigten Nutzung von Gebäuden im gesamten Untersuchungsgebiet können weitere Unterschiede ausgemacht werden. So ist hervorzuheben, dass die Nutzungen in OSM detaillierter sind als in der CityGML inkl. ALKIS Codes. Während in der CityGML manche Gebäude nur als Geschäftsgebäude beschrieben werden, unterscheiden die POIs aus OSM 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 ALKIS die Nutzung „Wohnhaus“ definiert, also eine reine Wohnnutzung, laut OSM ist aber an den Koordinaten ein Frisör, Bekleidungsgeschäft oder ein Restaurant. Dies bedeutet i.d.R. eine Mischnutzung durch eine Gewerbeinheit im Erdgeschoss mit darüber liegender Wohnnutzung. 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 sind in OSM genauer und reichen von *kiosk* über *restaurant* zu *hotel*. Eine Übersicht der Abweichungen mit Beispielen dazu findet sich in Abbildung 5.4.

Generell können hier drei Fälle beobachtet werden. Entweder ist die sekundäre Nutzung eines Gebäudes in ALKIS nicht berücksichtigt, sie ist nur unspezifisch als „Geschäft“ abgebildet oder ein Nichtwohngebäude wird nur verallgemeinert als „Geschäftsgebäude“ bezeichnet.

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 (siehe Kapitel 4.1.1). Die POIs können jedoch stets eindeutig dem richtigen Gebäude zugeordnet werden. Die weiteren POIs sind hier nicht relevant und beschreiben z.B. Briefkästen oder öffentliche Toiletten.

5.2 SimStadt Workflow zur Berechnung von Wärmeversorgungssystemen

OSM Daten mit POI (58 fclasses, davon 37 energetisch relevante Kategorien) hier: 28 verwendet				CityGML Datei inkl. AX_Gebaeudefunktion laut ALKIS (> 250 Werte, davon >200 energetisch relevant) hier: 10 verwendet	
osm_id	code	fclass	name	GMLId	ALKIS code / ALKIS Bezeichnung
417694951	2101	pharmacy	Stöckach Apotheke	DEBW522AA000328d8	1010 Wohnhaus
1773601659	2005	post_office	Deutsche Post	DEBW522AA0000b4c7	1010 Wohnhaus
1687405309	2304	pub	Bonnie & Clyde	DEBW522AA00020bfe	1010 Wohnhaus
1725517691	2304	pub	Villa Berg	DEBW522AA00027795	1010 Wohnhaus
1725517692	2301	restaurant	Vinayaga	DEBW522AA00023672	1010 Wohnhaus
→ Sekundäre Nutzung der Gebäude in ALKIS nicht abgebildet					
1773583877	2561	hairdresser	Hair Express	DEBW522AA0001da5b	1123 Wohn- und Geschäftsgebäude
1773676357	2401	hotel	Hotel Köhler	DEBW522AA00014412	1123 Wohn- und Geschäftsgebäude
2146156991	2083	kindergarten	Early Bird	DEBW522AA000333da	1123 Wohn- und Geschäftsgebäude
1805200186	2503	kiosk	Sandras Kiosk BWPPost ServicePoint	DEBW522AA0000dfc	1123 Wohn- und Geschäftsgebäude
1773588870	2568	laundry	Lange	DEBW522AA0001da5b	1123 Wohn- und Geschäftsgebäude
→ Sekundäre Nutzung der Gebäude in ALKIS nur allgemein als „Geschäft“ abgebildet					
1404763976	2541	car_dealership	Autohaus von der Weppen	DEBW522AA00042772	2050 Geschäftsgebäude
1773601651	2511	convenience	Erdi BioMarkt	DEBW522AA0001da5c	2050 Geschäftsgebäude
4411510989	2505	department_store	Secondhand Kaufhaus	DEBW522AA0003defa	2050 Geschäftsgebäude
→ „Geschäftsgebäude“ in ALKIS für deutlich unterschiedliche Nutzungen verwendet					

Abbildung 5.4: Vergleich der angegebenen Nutzungen in OSM und ALKIS für die Fallstudie Stuttgart-Stöckach

Für das Beispielgebiet mit insgesamt 1.054 beheizten Gebäuden konnten mit dieser Methode bei 92 Gebäuden zusätzliche Informationen zur Gebäudenutzung 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 einen Vorteil bedeuten. Bei einer weiteren Untersuchung für das gleiche Beispielgebiet, in der u.a. Simulation und gemessene Daten des Wärmebedarfs verglichen wurden, konnten bei dieser Gebäudeart die höchsten Abweichungen festgestellt werden [26].

5.2 SimStadt Workflow zur Berechnung von Wärmeversorgungssystemen

Die in Kapitel 4.2 und 4.3 beschriebenen Methoden zur Erstellung von Energiesystemkomponenten-Bibliothek und INSEL Templates sowie der Dimensionierung und Parametrisierung der Templates, sollen nun in einem SimStadt Workflow-

Schritt miteinander verknüpft werden, um eine automatische Simulation zu ermöglichen.

Der gesamte, im Rahmen dieser Arbeit definierte Workflow ist so aufgebaut, dass alle im neuen Workflow-Schritt *Energy System Template* benötigten Ergebnisse aus vorgelagerten Workflow-Schritten bereits zur Verfügung stehen. Der Workflow besteht folglich aus diesen Workflow-Schritten:

- *Import CityGML*
- *Create SimStadt Model*
- *Preprocessing (Geometric Preprocessor, Physics Preprocessor, Usage Preprocessor)*
- *Weather Processor*
- *Irradiance Processor*
- *Monthly Energy Balance*
- *Hourly Heat Demand*
- *Photovoltaik Potential (optional)*
- *Energy System Template*
- *List of Energy Systems*

In Abbildung 5.5 ist der neue Workflow-Schritt *Energy System Template* sowie ein Teil der vorgelagerten Schritte des Gesamt-Workflows abgebildet.

Links sind die Einstellungen und Eingabemöglichkeiten zum aktuell gewählten Energiesystem zu sehen. Die allgemeinen Templates der Systemmodelle sind im Workflow-Schritt hinterlegt und können durch den Nutzer ausgewählt werden. Darüber hinaus ist die Datenbank der Energiesystemkomponenten-Bibliothek hinterlegt. Es kann an dieser Stelle aber auch eine individuell erweiterte Datei eingelesen werden, z.B. wenn zusätzliche Komponenten benötigt werden, die bisher nicht in der Datenbank enthalten sind. Weiterhin kann der Name der geschriebenen Datei(en) festgelegt werden. In der *default* Einstellung, die hier für ein dezentrales

5.2 SimStadt Workflow zur Berechnung von Wärmeversorgungssystemen

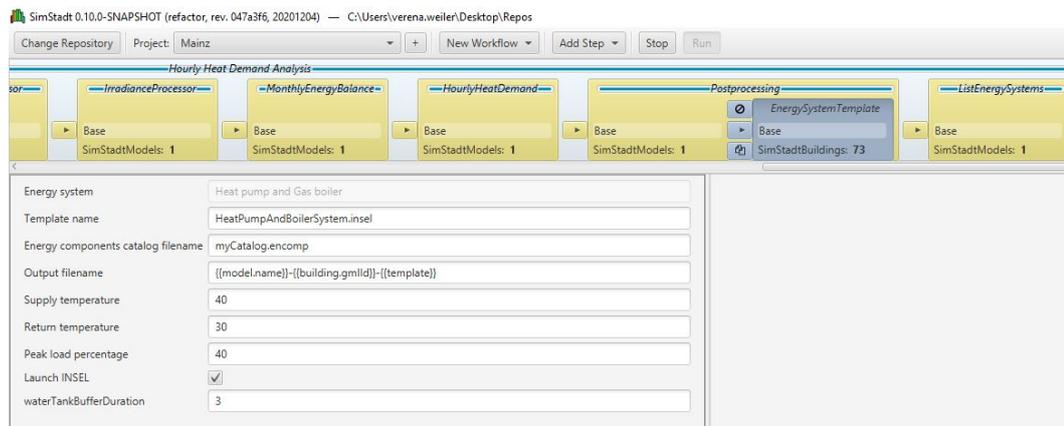


Abbildung 5.5: SimStadt Workflow-Schritt zur Berechnung eines Wärmeversorgungssystems

System zu sehen ist, wird jede Datei nach dem Schema *model.name-building.gmlId-template* (Name des CityGML Modells, Gebäude GML-ID und Template Name) bezeichnet. So ergibt sich für jedes Gebäude eine eindeutig identifizierbare Output Datei. Weiterhin gibt es einige Angaben, die der Nutzer zur regelbasierten Dimensionierung des Systems bereitstellen muss. Dies sind Vor- und Rücklauftemperaturen des Systems, den Anteil der Spitzenlast, welchen der Haupterzeuger im System bereitstellen soll und wie viele Stunden der thermische Pufferspeicher die mittlere Last bereitstellen können soll. Diese Informationen werden bei der regelbasierten Dimensionierung sowohl für zentrale als auch für dezentrale Systeme benötigt. Bei dezentralen Systemen beziehen sich die Angaben jeweils auf ein System in jedem Gebäude, bei zentralen Systemen auf das Gesamtsystem.

Diese Zielwerte für Haupt-, Nebenerzeuger sowie thermischem Speicher werden für jedes Gebäude bestimmt und damit die jeweils passende Komponente aus der Datenbank der Energiesystemkomponenten-Bibliothek gesucht. Wenn es keine exakte Entsprechung der gesuchten Leistung bzw. des gesuchten Volumens in der Datenbank gibt, wird die Komponente ausgewählt, deren Leistung bzw. Volumen die geringste Abweichung zum Zielwert hat. Im Fall der Dimensionierung des Beispielgebäudes aus Kapitel 4.3.4 werden die folgenden Komponenten gewählt:

*Best HeatPump for 16.2 kW * 40 % (6.5 kW) is AIR 7 C11A with 6.8 kW.*

*Best Boiler for 16.2 kW * 60 % (9.7 kW) is atmoTECexclusive VC 104/4-7A with 10 kW.*

Best WaterTank for 1.3 m³ (t = 3h, $\delta T = 10C$) is PS-T 1500 with 1.5 m³.

Die Daten dieser Komponenten werden über die Verknüpfung der Attribute in Energiesystemkomponenten-Bibliothek und Template automatisch an die entsprechenden Stellen des Templates geschrieben, und damit aus dem Template wieder ein ausführbares INSEL Modell (.insel) generiert. INSEL wird im Anschluss von SimStadt aufgerufen, das INSEL Modell ausgeführt und die definierten Ergebnisse in die Output Datei (.txt) geschrieben.

Dieser Vorgang wird nacheinander für jedes einzelne Gebäude in der CityGML Datei durchlaufen, d.h. für jedes Gebäude wird ein Template mit Werten befüllt, das zugehörige INSEL Modell erzeugt sowie eine Output Datei geschrieben.

Analog funktioniert dieser Vorgang auch für die Dimensionierung und Auslegung der zentralen Wärmeversorgungsoptionen. Der Nutzer wählt das entsprechende zentrale System in der SimStadt GUI aus und macht anschließend Angaben zu Vorlauf- und Rücklauftemperaturen des Netzes, zum Anteil der Spitzenlast, die der Haupterzeuger decken soll und zur Anzahl der Stunden, die der Speicher den mittleren Wärmebedarf puffern soll. Die zuvor im Workflow-Schritt *Hourly Heat Demand* berechneten stündlichen Wärmebedarfe aller Gebäude werden dort addiert um einen Gesamtlastgang des zu untersuchenden Quartiers zu erhalten. Dieser wird bei der Dimensionierung der Komponenten berücksichtigt und die entsprechenden Werte aus der Energiesystemkomponenten-Bibliothek werden automatisch in das Template geschrieben.

5.3 Fallstudien zur Simulation von Versorgungssystemen

Die in Kapitel 4.2 und Kapitel 4.3 entwickelten Modelle und Methoden werden im Folgenden auf drei Fallstudien angewandt.

Das System eines zentralen Biomasse- und Gaskessels mit Nahwärmenetz wird auf eine Fallstudie in Mainz¹ angewandt. Das System kann anhand von vorliegenden Messdaten zu Wärmeverbrauch und -erzeugung validiert werden [158, 159].

In der Plusenergie-Neubausiedlung „Vordere Viehweide“ wird das System mit dezentralen Wärmepumpen und thermischen Speichern simuliert. Darüber hinaus wird hier ein Vergleich zwischen einer Dimensionierung der Erzeuger mit der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten regelbasierten Methode und der Dimensionierung mit genetischem Algorithmus gezeigt [162].

Ein Teilquartier des derzeit in Planung befindlichen Rosensteinquartiers dient als dritte Fallstudie². Es wird auf dem nach der Fertigstellung von Stuttgart21 freiwerdenden Areal in zentraler Lage der Stuttgarter Innenstadt entstehen. Hier wird zunächst die Methode zur Einschränkung des Lösungsraums angewandt, um daraus folgend ein Biogas-BHKW-System mit Spitzenlast-Gaskesseln und thermischen Pufferspeichern zu dimensionieren und zu simulieren.

5.3.1 Simulation und Validierung Biomassekessel und Gaskessel mit Nahwärmenetz in Mainz

Bei der Fallstudie in Mainz handelt sich um ein Quartier mit 65 Gebäuden, welches sich aus einer Reihenhaussiedlung aus den frühen 2010er Jahren sowie verschiedenen teilsanierten Gewerbegebäuden, überwiegend aus den 1960er und 1970er Jahren, zusammensetzt. Das Quartier repräsentiert ein typisches gemischt-genutztes Stadtrandquartier in Deutschland. Das 3D CityGML Modell des Quartiers ist in Abbildung 5.6 zu sehen.

Für das Quartier liegen Messdaten des Wärmeverbrauchs, bestehend aus Wärme für Raumheizung und Trinkwarmwasser, in jährlicher Auflösung vor. Zum Zwecke der Anonymisierung sind die Daten der Wohngebäude für je drei Gebäude zusammengefasst. Da bei der Messung keine getrennte Erfassung der Wärme für

¹ Diese Fallstudie ist Teil des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungsprojektes SimStadt 2.0. Die hier beschriebenen Ergebnisse finden sich zum Teil auch im Abschlussbericht des Projektes wieder.

² Diese Fallstudie ist Teil des vom BMWi geförderten Forschungsprojektes NEQModPlus. Die hier beschriebenen Ergebnisse finden sich zum Teil auch im Abschlussbericht des Projektes wieder.

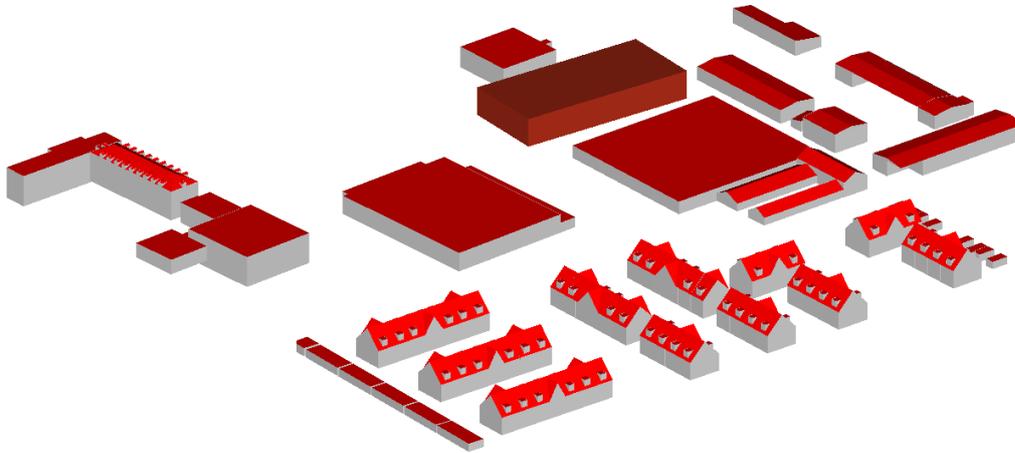


Abbildung 5.6: CityGML Modell der Fallstudie Mainz, Repräsentation im FZK Viewer

Warmwasser und Raumwärme erfolgt, wird zur Validierung der Simulationsdaten ein Anteil von 20 % für Warmwasser am Gesamtwärmeverbrauch angenommen [167, 170]. Neben der vorliegenden jährliche Auflösung der Messdaten werden zur Validierung auch zeitlich höher aufgelöste Daten benötigt. Da diese jedoch nicht verfügbar sind, wurden die jährlichen Verbräuche nach der in Kapitel 3.4.2 beschriebenen Methode in stündliche Lastgänge abhängig von der Außentemperatur umgerechnet. Da der gemessene Wärmeverbrauch auch die Wärme zur Bereitstellung von Trinkwarmwasser enthält, die im Vergleich zum Raumwärmeverbrauch nicht stark abhängig von der Außentemperatur ist, wurde der angenommene Anteil von 20 % des gemessenen Gesamtwärmebedarfs als über das Jahr konstant bleibender Wärmeverbrauch zur Trinkwarmwassererwärmung angenommen.

Bei Durchführung der Wärmebedarfs-Simulation mit SimStadt und DHWcalc mit Wetterdaten von 2017 sowie anschließendem Vergleich mit den vorliegenden Messdaten aus dem selben Jahr ergibt sich zunächst eine Abweichung des Gesamtbedarfs von 16 %. Da die vorliegenden CityGML Dateien keine Information über Sanierungen enthalten, wurde die bestehende Teilsanierung der Gewerbegebäude zunächst nicht berücksichtigt. Bei Annahme einer konventionellen Sanierung dieser Gebäude nach [105], welche laut Experten vor Ort dem Sanierungszustand der

Gebäude in etwa entspricht, reduziert sich die Abweichung zwischen Simulation und Messdaten auf 6 %.

Die Gebäude des Quartiers werden über ein Nahwärmenetz versorgt, welches durch einen zentralen Biomassekessel sowie einen Ölkessel gespeist wird. Das in Kapitel 4.3.2 beschriebene Modell eines Systems mit Biomassekessel und Gaskessel zur Abdeckung der Spitzenlast ohne thermischen Speicher wird im Folgenden auf die Fallstudie angewandt. Das real vorliegende System wird im Modell durch Übernahme der installierten Leistungen und Effizienzen der Komponenten abgebildet. Darüber hinaus kann durch Veränderung der vom Brennstoff abhängigen Parameter im Modell ein Wechsel des verwendeten Energieträgers von Gas zu Öl abgebildet werden. Messdaten liegen für das Jahr 2017 für beide Erzeuger in täglicher Auflösung vor.

In Tabelle 5.1 sind die Ergebnisse der Systemsimulation sowie die Messdaten getrennt nach Erzeugern sowie die zuvor beschriebenen Mess- und Simulationsdaten des Wärmebedarfs³ aufgeführt. Dabei werden beide Simulationsdurchgänge, vor und nach Berücksichtigung der Sanierung der Gewerbegebäude (Sim1 bzw. Sim2), dargestellt. Darüber hinaus ist jeweils die prozentuale Abweichung der Simulation von den Messdaten angegeben.

Es ist zu erkennen, dass die Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Werten vom ersten zum zweiten Simulationsdurchgang sowohl für den Bedarf als auch für die Erzeugung zurückgehen. Die Abweichung bei der Erzeugung liegt im zweiten Simulationsdurchgang für beide Erzeuger zusammen bei -6 %, wobei die Erzeugung aus dem Biomassekessel um 10 % überschätzt, die Erzeugung aus dem Gaskessel hingegen um 3 % unterschätzt wird.

Die angegebenen Netzverluste wurden aus der Differenz zwischen dem netzseitigen Wärmemengenzähler und dem Gesamtverbrauch der Gebäude errechnet. Die simulierten Netzverluste basieren auf Berechnungen in STANET, die nicht im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, sondern Teil des Forschungsprojektes SimStadt 2.0 sind. Die Zuordnung der berechneten Netzverluste der Typtage ist in Kapitel 4.3.2 beschrieben.

³ Für eine einfachere Lesbarkeit und Übersichtlichkeit wird hier sowohl für die gemessenen Verbrauchswerte als auch simulierten Bedarfswerte das Wort *Bedarf* gewählt.

Tabelle 5.1: Jährlicher Vergleich der gemessenen und simulierten Werte für Bedarf und Erzeugung in MWh für das Jahr 2017 für die Fallstudie Mainz

	Mess	Sim1	Abw1	Sim2	Abw2	Sim3	Abw3
Netzverluste	230	312	35 %	312	35 %	230	0 %
Bedarf	1.399	1.719	23 %	1.356	-3 %	1.399	0 %
Raumwärme							
Bedarf	350	312	-11 %	312	-11 %	350	0 %
Trinkwarmwasser							
Bedarf	1.749	2.032	16 %	1.668	-5 %	1.748	0 %
gesamt							
Erzeugung	1.288	1.738	35 %	1.423	10 %	1.482	15 %
Biomasse							
Erzeugung	822	605	-26 %	557	-3%	496	-40 %
fossil							
Erzeugung	2.110	2.343	11 %	1.980	-6 %	1.978	-6 %
gesamt							

Bei einem Vergleich auf monatlicher Basis in Tabelle 5.2 zeigt sich, dass die Simulation den Bedarf vor allem in den Wintermonaten überschätzt und in den Monaten der Übergangszeit zwischen März und Mai sowie im September und Oktober unterschätzt. Im Sommer, wenn fast ausschließlich Wärme zur Warmwasserbereitung benötigt wird, sind die Abweichungen zwischen Messdaten und Simulation mit -11 bis -18 % geringer. Hier ist jedoch zu beachten, dass die Messdaten des Verbrauchs nur in jährlicher Auflösung vorliegen und hier zu Vergleichszwecken u.a. anhand der Außentemperatur zu einem stündlichen Lastgang disaggregiert und anschließend zu Monatswerten aufsummiert wurden. Die tatsächliche zeitliche Aufteilung des vorliegenden Jahreswertes kann in der Realität davon abweichen.

Die Summe der simulierten Erzeugung aus Biomassekessel und Gaskessel wird ebenfalls vor allem im Winter sowie zusätzlich teilweise im Sommer überschätzt. In der Übergangszeit wird die simulierte Erzeugung unterschätzt. Diese Beobach-

Tabelle 5.2: Monatlicher Vergleich der gemessenen und simulierten Werte für Bedarf und Erzeugung in MWh für das Jahr 2017 für die Fallstudie Mainz

Monat	Bedarf gemessen	Bedarf simuliert	Abw.	Erzeugung gemessen	Erzeugung simuliert	Abw.
Jan	331	439	33 %	414	468	13 %
Feb	216	236	9 %	262	261	0 %
Mrz	168	110	-34 %	220	137	-38 %
Apr	162	80	-51 %	172	106	-38 %
Mai	80	28	-65 %	96	54	-44 %
Jun	34	28	-18 %	50	52	5 %
Jul	32	28	-13 %	44	53	20 %
Aug	32	28	-11 %	53	53	1 %
Sep	85	26	-69 %	99	52	-48 %
Okt	129	78	-40 %	148	104	-30 %
Nov	219	252	15 %	246	279	13 %
Dez	260	334	28 %	305	362	19 %
Summe	1.749	1.668	-5 %	2.110	1.980	-6%

tungen decken sich mit den zuvor beschriebenen Abweichungen der gemessenen und simulierten Werte für den Bedarf, mit einer geringeren Ausprägung bei den Abweichungen der Erzeugung.

Die Differenz zwischen den simulierten Bedarfs- und Erzeugerwerten bilden die Netzverluste, die in die Simulation als zusätzlicher Bedarf eingehen, d.h. es wird jederzeit genau so viel Wärme erzeugt, wie durch die Summe aus simuliertem Bedarf und simulierten Netzverlusten benötigt wird. Zwischen gemessenem Bedarf inkl. errechneten Netzverlusten und gemessener Erzeugung hingegen liegt eine Differenz von 7 %.

Um den Einfluss der Wärmebedarfs-Simulation auf die Ergebnisse der Erzeuger-Simulation bewerten zu können, wurde ein erneuerter Simulationsdurchlauf (Sim3 in Tabelle 5.1 sowie Tabelle 5.3) mit dem in Stunden umgerechneten Lastgang

des gemessenen Wärmeverbrauchs als Input in das Systemsimulationsmodell durchgeführt.

Tabelle 5.3: Monatlicher Vergleich der gemessenen und simulierten Werte für Bedarf und Erzeugung in MWh für das Jahr 2017 für die Fallstudie Mainz, bei Verwendung der gemessenen Verbrauchsdaten als Input ins Systemsimulationsmodell

Monat	Erzeugung gemessen	Erzeugung simuliert	Abw.
Jan	414	351	-15 %
Feb	262	234	-11 %
Mrz	220	188	-15 %
Apr	172	181	5 %
Mai	96	100	4 %
Jun	50	53	6 %
Jul	44	51	17 %
Aug	53	51	-3 %
Sep	99	104	5 %
Okt	148	148	0 %
Nov	246	237	-3 %
Dez	305	279	-8 %
Summe	2.110	1.978	-6 %

Hier gibt es keine Abweichungen beim Bedarf, da die Messdaten als Input ins Modell eingehen und es somit keinen simulierten Bedarf gibt. Die prozentuale Abweichung bei der Erzeugung ist in der Jahressumme gleich wie bei der zuvor durchgeführten Simulation (Sim2), bei der Verteilung auf die einzelnen Monate zeigt sich hingegen eine Veränderung. In den Übergangsmonaten im Frühling und Herbst liegen die Abweichungen zwischen -15 und 5 %, im Sommer wird die simulierte Erzeugung leicht überschätzt (6 bzw. 17 % im Juni und Juli). Im Winter unterschätzt die Simulation die Erzeugung um bis zu 15 %.

Unter der Annahme, dass die Erzeugung dem Bedarf folgt, kann davon ausgegangen werden, dass die hier angewandte Methode zur Ermittlung von stündlichen

Werten aus dem gemessenen Jahresverbrauch sich nicht vollständig mit den tatsächlich auftretenden stündlichen Verbrauchswerten deckt. Darüber hinaus kann die Abweichung mit der Verteilung der Netzverluste zusammenhängen, die in den Wintermonaten in der Realität deutlich über den simulierten Werten liegen kann.

Trotz dieser Einschränkungen lässt sich auf eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und realem System schließen. Beim Vergleich der stündlichen Werte der Gesamterzeugung zwischen Simulation und Messung liegt das Bestimmtheitsmaß bei $R^2 = 92\%$, der Normalized Root Mean Square Error (NRMSE) liegt bei 11% . In Abbildung 5.7 sind Messung und Simulation für das Jahr 2017 in stündlicher Auflösung zu sehen.

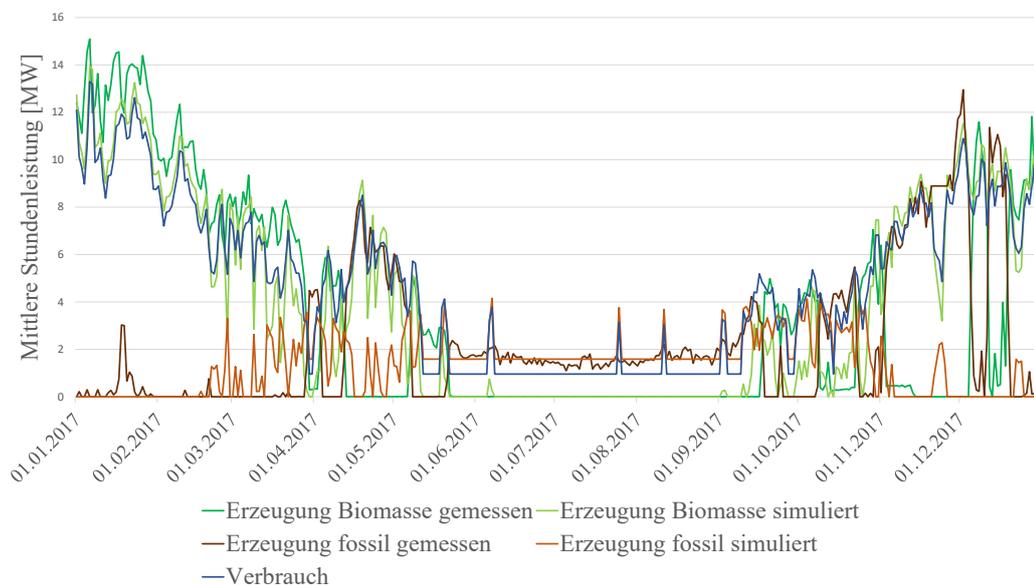


Abbildung 5.7: Erzeugung gemessen (Biomasse: dunkelgrün, fossil: braun) und simuliert (Biomasse: hellgrün, fossil: orange) sowie gemessener Verbrauch (blau) für das Biomassensystem in der Fallstudie Mainz

Dabei ist zu erkennen, dass in den ersten etwa drei Monaten des Jahres die simulierte Erzeugung des Biomassekessels ziemlich genau dem Verbrauch folgt, die Differenz besteht in den hier nicht abgebildeten höheren Netzverlusten. Die Messdaten des Biomassekessels folgen ebenfalls dem Verlauf, allerdings mit leichten Abweichungen. Dies ist z.B. Ende Januar zu sehen, als die Erzeugung aus dem Biomassekessel zurückgeht und gleichzeitig der fossile Kessel mehr Wärme

produziert. Am 27.02. geht die simulierte Erzeugung aus dem Biomassekessel zurück, dafür erzeugt der fossile Kessel an diesem Tag deutlich mehr Wärme als zuvor. Bei genauerer Betrachtung des Verbrauchs dieses Tages ist zu erkennen, dass er zu den meisten Stunden unter der für den Biomassekessel relevanten Grenze von 35 % der installierten Leistung liegt und daher die Versorgung durch den Gaskessel übernommen wird. Ähnliches ist Ende März bzw. Anfang April zu sehen, als sowohl die simulierte als auch die gemessene Erzeugung des Biomassekessels aufgrund des niedrigen Tagesverbrauchs von knapp einer MWh zurück geht und dieser vorwiegend durch den fossilen Kessel gedeckt wird. Mitte April bis Mitte Mai zeigt sich ein Lastgang mit ähnlichem Verlauf und Höhe wie zuvor im März, allerdings ist zum späteren Zeitpunkt der Biomassekessel nicht in Betrieb und stattdessen produziert der fossile Kessel die benötigte Wärmemenge. In der Simulation hingegen teilen sich Biomassekessel und fossiler Kessel je nach konkreter Anforderungshöhe die Wärmeproduktion. Dies kann auf eine individuelle Steuerung der Komponenten zu diesem Zeitpunkt zurückgeführt werden.

Wie bereits zuvor beschrieben, wurde ein konstanter Warmwasserverbrauch aus den vorhandenen Messdaten angenommen. Dieser im Sommer einzige Verbrauch wird in der Simulation ebenso wie in den Messdaten nahezu ausschließlich vom fossilen Erzeuger versorgt. Einzelne Spitzen in den Sommermonaten ergeben sich durch die Kopplung der Verteilung der jährlichen Verbrauchswerte für Heizwärme an die Außentemperatur, wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben.

In der folgenden Übergangszeit ist der Verbrauch zum Teil zu gering für die Aktivierung des Biomassekessels. Daher wechselt in der Zeit zwischen Ende September und Anfang November die Verteilung der Erzeugung auf die beiden Erzeuger sowohl in der Simulation als auch bei den Messdaten immer wieder. Im Dezember reduziert sich trotz hohem Verbrauch die Erzeugung des gemessenen Biomassekessels an zwei Zeitpunkten deutlich. Zum Ende des Monats produziert der Biomassekessel über mehrere Tage nahezu keine Wärme. Dies kann auf eine Wartung oder Fehlfunktion des Kessels zurückgeführt werden. In der Simulation stellt in diesem Zeitraum weiterhin der Biomassekessel den Hauptanteil der benötigten Wärme bereit.

Generell können Abweichungen zwischen Messdaten und Simulation wie in den beiden Übergangszeiten in Frühling und Herbst sowie im Dezember an manuellen Einstellungen des realen Systems liegen. So kann z.B. durch manuellen Betrieb der Biomassekessel weiterhin auf einer entsprechend hohen Leistung belassen werden, wenn etwa aufgrund der Witterung zu erwarten ist, dass die Abschaltung des Kessels nur sehr kurz wäre. Dies kann der Grund für die konstante Produktion des Biomassekessels vom 21. bis 26. November sein, obwohl zeitgleich der Verbrauch stark zurückgeht. In der Simulation verschiebt sich die Erzeugung hier vom Biomassekessel zum fossilen Kessel.

5.3.2 Dimensionierung und Simulation dezentraler Wärmepumpen in Wüstenrot

Die Kommune Wüstenrot im Landkreis Heilbronn in Baden-Württemberg hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2020 ihren gesamten Energiebedarf aus erneuerbaren Energieträgern bereitzustellen. Die Plusenergie-Neubausiedlung „Vordere Viehweide“ umfasst derzeit 20 Einfamilienhäuser, die mit Wärmepumpen beheizt werden und über PV-Kollektoren auf den Dächern verfügen. Darüber hinaus sind thermische und z.T. elektrische Speicher in den Gebäuden installiert. Ein intelligentes Lademanagement steuert die Komponenten und sorgt so für ein flexibles und optimiertes Gesamtsystem. Die Wärmequelle bzw. Wärmesenke der Wärmepumpen ist ein kaltes Nahwärmenetz mit angeschlossenem Agrothermie-Kollektorfeld. Diese innovative Geothermieanlage erlaubt die gleichzeitige Nutzung als landwirtschaftliche Fläche. Im Winter dient das Kaltwärmenetz als Wärmequelle, im Sommer kann es zur Kühlung der Gebäude genutzt werden. Die Temperatur des Netzes schwankt im Jahresverlauf zwischen 4 und 17 °C. Aufgrund des geringen Unterschieds zur Vorlauftemperatur von 35 °C für die Flächenheizungen der Gebäude mit hohem Energiestandard (KfW 55 oder besser) ist eine effiziente Versorgung auf diesem niedrigen Temperaturniveau möglich [121]. In Abbildung 5.8 ist ein Schema des Gesamtsystems, bestehend aus Gebäuden, Kollektor und Netz, zu Beginn des begleitenden Forschungsprojektes EnVisaGe im Jahr 2012 zu sehen.

Die tatsächliche Bebauung unterscheidet sich leicht von dieser Darstellung. Da das Neubaugebiet erst in den letzten Jahren bebaut wurde, sind noch nicht alle

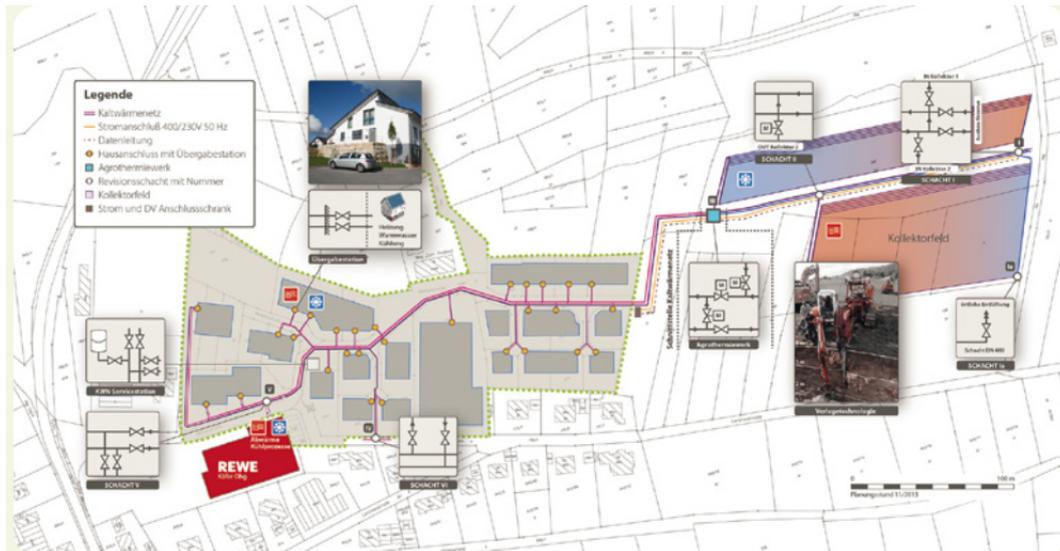


Abbildung 5.8: Schematische Darstellung des Neubaugebiets „Vordere Viehweide“ in Wüstenrot [121]

Gebäude im CityGML Modell des Landesamtes verfügbar. Daher wurde im Rahmen dieser Analyse ein georeferenziertes 3D Modell der 20 Wohngebäude des Gebiets „Vordere Viehweide“ in SketchUp⁴ auf Basis von frei verfügbaren Luftaufnahmen und Grundrissen erstellt, mit dem GEORES⁵ plug-in für SketchUp als CityGML Datei exportiert und mit den Attributen *function* und *yearOfConstruction* versehen. Diese 20 Gebäude sind in Abbildung 5.9 in der SketchUp Oberfläche dargestellt. Von den 20 Gebäuden wurden elf Gebäude mit der besten Datenlage zu installierter PV und weiteren vorhandenen Komponenten für die folgenden Berechnungen ausgewählt.

Zunächst wird für die ausgewählten Gebäude der Wärmebedarf für Raumheizung, der Strombedarf sowie das PV-Potenzial auf den Gebäudedächern mit SimStadt ermittelt. Die Ergebnisse dazu sind in Tabelle 5.4 aufgeführt. Die stündlichen Trinkwarmwasserbedarfs-Profile, die für die Anlagensimulation verwendet werden, werden individuell für jedes Gebäude mit DHWcalc erzeugt, wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben. Alle Gebäude haben dabei den gleichen jährlichen Warmwasserbedarf, da dieser vom Gebäudetyp abhängt, der in allen Fällen ein Einfamilienhaus ist.

⁴ <https://www.sketchup.com/de>

⁵ <https://github.com/GeoplexGIS/geores>

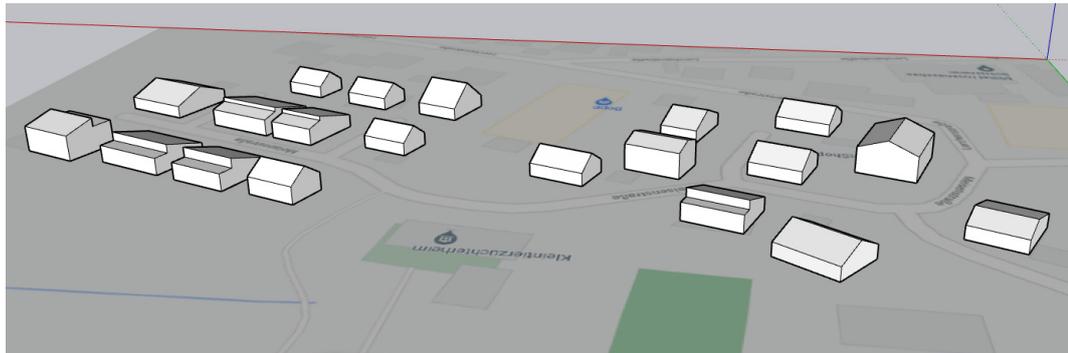


Abbildung 5.9: 3D Modell der Gebäude der Fallstudie Wüstenrot in SketchUp

Tabelle 5.4: Ergebnisse des jährlichen gebäudespezifischen Bedarfs für Heizwärme, Warmwasser und Strom sowie PV-Stromerzeugung und installierte PV-Leistung für die Fallstudie Wüstenrot

Gebäude ID	Wärmebedarf [kWh]	TWW-Bedarf [kWh]	Strombedarf [kWh]	PV-Stromerzeugung [kWh]
ID001	13.820	7.277	14.257	16.840
ID002	7.447	7.277	3.657	10.510
ID009	7.802	7.277	4.319	8.500
ID010	4.662	7.277	3.082	7.980
ID012	11.082	7.277	5.436	9.510
ID019	9.119	7.277	4.963	7.160
ID020	5.478	7.277	3.389	7.980
ID021	4.241	7.277	2.144	5.980
ID022	6.602	7.277	4.815	12.220
ID024	9.308	7.277	4.238	10.360
ID025	4.420	7.277	2.202	7.980

Das INSEL Modell für das System der dezentralen Wärmepumpe mit Gaskessel zur Abdeckung der Spitzenlast sowie thermischem Speicher, beschrieben in Kapitel 4.3.2, wird auf alle Gebäude der Fallstudie angewandt. Zusätzlich wurde ein bisher noch nicht im zuvor beschriebenen Modell vorhandener Batteriespeicher eingefügt, um das in den Gebäuden vorhandene System möglichst realistisch

abzubilden. Dafür wurde das Batteriespeicher Modell von Baudo und Vaglio [14, 152] verwendet.

In dieser Fallstudie sollen die beiden in Kapitel 4.3.4 beschriebenen Möglichkeiten - regelbasierte Dimensionierung sowie Dimensionierung mittels genetischem Algorithmus - zur Dimensionierung der Systemkomponenten angewandt und verglichen werden.

Zusätzlich zu Auswertung und Vergleich der gewählten Komponentengrößen je Gebäude aufgrund der Anwendung der beiden Dimensionierungsmethoden sollen in dieser Fallstudie auch weitere Indikatoren wie CO₂-Emissionen, Investitionen sowie bedarfs- und betriebsgebundene Kosten auf Gebäudeebene ausgewertet werden.

Die im Modell angenommenen variablen, nominalen Kosten für Gas und Strom sind neben den jeweiligen CO₂-Emissionsfaktoren sowie den Kosten für CO₂-Emissionen und der angenommenen Einspeisevergütung für den überschüssigen Photovoltaik-Strom in Tabelle 5.5 zu sehen. Um die Ergebnisse nicht nur von aktuellen Preisen und Kennwerten abhängig zu machen, wurden die weiteren Berechnungen jeweils mit zwei verschiedenen Datensets für das Jahr 2020 und das Jahr 2050 durchgeführt.

Tabelle 5.5: Annahmen zu Energieträgerkosten, CO₂-Emissionsfaktoren und Einspeisevergütung für 2020 und 2050

	2020		2050	
	Preis	CO ₂ -Emissionen	Preis	CO ₂ -Emissionen
CO ₂	25 €/t	-	220 €/t	-
Strom	0,33 €/kWh	401 g/kWh	0,33 €/kWh	0 g/kWh
Erdgas	0,05 €/kWh	247 g/kWh	0,09 €/kWh	247 g/kWh
Einspeisevergütung	0,03 €/kWh	-	0,084 €/kWh	-

Für 2020 wird ein CO₂-Preis von 25 €/t angenommen, ein Erdgas-Preis von 0,05 €/kWh sowie ein Strom-Preis von 0,33 €/kWh. Die Einspeisevergütung liegt bei 0,03 €/kWh, was dem mittleren Strompreis in 2020 an der Leipziger Börse

entspricht. Dieser Preis ist bei älteren Systemen realistisch, da sie nicht länger von einer zuvor festgesetzten Einspeisevergütung profitieren. Der CO₂-Preis steigt in 2050 auf 220 €/t [91]. Der Preis für Erdgas steigt leicht auf 0,09 €/kWh [58]. Darüber hinaus wird angenommen, dass das Stromnetz bis 2050 vollständig dekarbonisiert ist, wie es von der Europäischen Kommission [64] geplant ist. Dies führt zu Emissionen für die Stromerzeugung von 0 g/kWh. Die Einspeisevergütung für aus Photovoltaik erzeugten Strom wird mit 0,084 €/kWh angenommen, was auf dem prognostizierten durchschnittlichen Börsenstrompreis für 2050 basiert.

Die Gesamtkosten werden wie in Kapitel 4.3.5 beschrieben für jedes Gebäude berechnet. Tabelle 5.6 zeigt die angenommenen spezifischen Investitionen der Komponenten, ausgehend von komponentenspezifischen Kennlinien (siehe Kapitel 4.2.1).

Tabelle 5.6: Annahmen zu Investitionen, Lebensdauer und Wartungskosten der Komponenten für 2020 und 2050

Komponente	2020		2050		Wartungskosten [%]
	Investition	Lebensdauer	Investition	Lebensdauer	
Wärmepumpe	1.001 €/kW	20	1.540 €/kW	20	3,5
Gaskessel					
inkl. Kamin	900 €/kW	20	900 €/kW	20	3,5
Thermischer					
Speicher	2.800 €/m ³	20	2.800 €/m ³	20	3,0
Batterie	500 €/kWh	15	400 €/kWh	15	2,3

Für das Szenario 2020 sind Fördermittel aus verschiedenen deutschen Investitionsprogrammen enthalten. 35 % der spezifischen Investitionen für Wärmepumpen werden gefördert durch das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) und 200 €/kWh für elektrische Batteriespeicher werden durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg bereitgestellt. Im Jahr 2050 werden keine Förderungen mehr angenommen, die Investitionen sind hier analog zu den Vollkosten ohne Förderung in 2020.

Bei der regelbasierten Dimensionierung werden die in 4.3.4 beschriebenen Parameter „Anteil an Spitzenlast“ und „Anzahl Stunden, die der thermische Speicher die mittlere Last puffern soll“ genutzt, die in der SimStadt GUI angegeben werden können. Der Batterie-Speicher wird abhängig von der installierten PV der jeweiligen Gebäude dimensioniert. Die konkreten Parameter für die Dimensionierungsregeln sind abhängig von der Fallstudie und dem zu untersuchenden Szenario folgendermaßen gewählt:

- Anteil der Spitzenlast, der durch die Wärmepumpe gedeckt wird: 70 %,
- Anteil der Spitzenlast, der durch den Gaskessel gedeckt wird: 30 %,
- Anteil des Warmwasserbedarfs, der zur Dimensionierung der Wärmeerzeugungskomponenten herangezogen wird: 30 %,
- Anzahl Stunden, die der thermische Speicher den mittleren Warmwasserbedarf puffern soll: 24 h,
- Verhältnis von installierter PV [kWp] zu Batteriegröße [kWh]: 1:1 [65, 24].

Aufgrund des hohen Gebäudestandards und dem folglich sehr hohen Anteil des Wärmebedarfs zur Trinkwarmwassererwärmung am Gesamtwärmebedarf wird hier optional nicht der gesamte Wärmebedarf zur Trinkwarmwassererwärmung zur Dimensionierung der Wärmeerzeugungskomponenten herangezogen.

Bei der Komponenten-Dimensionierung mit genetischem Algorithmus müssen kleinere Anpassungen am Systemmodell vorgenommen werden, da diese Methode aktuell nicht in den SimStadt Workflow aus Abbildung 4.23 in Kapitel 4.3 integrierbar ist, sondern direkt nach der Zusammenführung von INSEL Modell und Bedarfsprofilen manuell mittels eines Python-Skriptes stattfindet. Da die benötigten Daten wie z.B. Wärmeleistung und COP der Wärmepumpe in diesem Fall nicht aus der Energiesystemkomponenten-Bibliothek ins Modell Template geschrieben werden, müssen sie im Modell selbst hinterlegt werden. Dafür werden die Kennwerte aller in der Datenbank verfügbaren Sole/Wasser Wärmepumpen bei einer Vorlauftemperatur von 35 °C in die beiden POLYG2 Blöcke des INSEL Modells geschrieben. Je nach der durch den genetischen Algorithmus festgelegten installierten Leistung werden die entsprechenden Kennwerte der

passenden Komponenten aus dem Block ausgelesen und ggf. zwischen diesen linear interpoliert.

Die Anzahl der zu durchlaufenden Generationen sowie die Populationsgröße beim genetischen Algorithmus werden zwischen zehn und 100 in 20er-Schritten variiert. Die Rekombinationsrate wurde in 0,1er-Schritten von 0,6 bis 1,0 verändert [37], die Mutationswahrscheinlichkeit in Schritten von 0,1 von 0,1 bis 0,5 [27]. Der genetische Algorithmus wurde für jede Parameterkombination dreimal durchgeführt, um den Einfluss von zufälligen Ergebnissen zu verringern. Dies kann vor allem dann vorkommen, wenn die Anzahl der Generationen oder der Populationsgröße klein ist.

Die Ergebnisse der Anwendung beider Dimensionierungsmethoden für die Fallstudie Wüstenrot werden im Folgenden beschrieben. Tabelle 5.7 zeigt die Größen der Komponenten sowie die jährlichen Gesamtkosten je Gebäude für die beiden Szenarien 2020 und 2050 für die regelbasierte Dimensionierung.

Tabelle 5.7: Ergebnisse der regelbasierten Dimensionierung für das Wärmepumpensystem inkl. jährlichen Gesamtkosten f_{ges} für die Szenarien 2020 und 2050 für die Fallstudie Wüstenrot

	Wärme- pumpe [kW]	Gaskessel [kW]	Thermischer Speicher [m ³]	Batterie [kWh]	$f_{ges,2020}$ 2020 [€]	$f_{ges,2050}$ 2050 [€]
ID001	16	7	0,65	16	7.660	7.650
ID002	12	5	0,46	10	4.127	4.106
ID009	13	5	0,47	8	4.587	4.816
ID010	10	4	0,37	8	3.421	3.480
ID012	12	5	0,57	9	4.811	4.951
ID019	11	5	0,51	7	4.445	4.692
ID020	10	4	0,40	8	3.543	3.601
ID021	9	4	0,36	6	3.000	3.134
ID022	11	5	0,43	12	4.198	4.047
ID024	11	5	0,52	10	4.228	4.222
ID025	11	5	0,37	8	3.641	3.757

Da die Wärmepumpe als Hauptsystem zur Wärmeerzeugung durch das Template vordefiniert ist, ist sie immer größer als der Gaskessel, der nur die Spitzenlasten bereitstellt. 94 % des Wärmebedarfs wird durch die Wärmepumpe gedeckt. Der PV-Eigenverbrauchsanteil liegt im Durchschnitt aller Gebäude bei 60 %, was vor allem durch den großen elektrischen Speicher in den Systemen ermöglicht wird.

Beim Vergleich der jährlichen Gesamtkosten in den Jahren 2020 und 2050 sind die Werte ähnlich, Änderungen reichen von -4 bis +6 % bei einzelnen Gebäuden. Die jährlichen Investitionen steigen aufgrund des Wegfalls der Subventionen für Wärmepumpe und Batterie um bis zu 12 % in 2050, während die variablen Kosten aufgrund des dekarbonisierten Stromnetzes und der daraus resultierenden hohen Reduzierung der CO₂-Kosten um bis zu 36 % gesenkt werden.

Die folgenden Tabellen 5.8 und 5.9 zeigen die durch den genetischen Algorithmus festgelegten Komponentengrößen sowie die jährlichen Gesamtkosten für das Szenario 2020 sowie das Szenario 2050.

Tabelle 5.8: Ergebnisse der Dimensionierung mit genetischem Algorithmus für das Wärmepumpensystem inkl. jährlichen Gesamtkosten $f_{ges,2020}$ für das Szenario 2020 für die Fallstudie Wüstenrot

	Wärmepumpe [kW]	Gaskessel [kW]	Thermischer Speicher [m ³]	Batterie [kWh]	$f_{ges,2020}$ 2020 [€]
ID001	12	1	1,3	6	5.374
ID002	7	11	0,7	3	3.211
ID009	9	1	1,0	3	2.844
ID010	7	14	0,7	2	3.347
ID012	7	7	0,7	3	3.417
ID019	10	6	0,9	3	3.813
ID020	12	0	1,3	3	3.086
ID021	7	1	0,8	2	2.009
ID022	10	2	0,9	3	3.016
ID024	9	2	0,9	3	2.926
ID025	7	1	0,8	2	1.935

Im Vergleich zur regelbasierten Dimensionierung sind die Wärmepumpen bei der Dimensionierung mit genetischem Algorithmus meist kleiner und die Gaskessel größer dimensioniert. Dies ist auf die geringeren Investitionen sowie Energiekosten bei dem Betrieb eines Gaskessels zurückzuführen. Die Gaskessel werden hauptsächlich für die Spitzenlasten eingesetzt, 91 % der gesamten bereitgestellten Wärme wird von den Wärmepumpen produziert. Die thermischen Speicher sind in der Regel mehr als doppelt so groß im Vergleich zur regelbasierten Dimensionierung, die optimierten Batteriespeichergrößen sind hingegen deutlich kleiner. Der über alle Gebäude gemittelte PV-Eigenverbrauchsanteil beträgt bei dem Szenario 2020 46 %. Die mittleren jährlichen Gesamtkosten je Gebäude reduzieren sich durch die optimierte Dimensionierung um 27 % gegenüber der regelbasierten Dimensionierung.

Die optimierte Dimensionierung der Komponenten für das Szenario 2050 ist in Tabelle 5.9 aufgeführt. Das Verhältnis zwischen Wärmepumpe und Gaskessel verschiebt sich trotz des Gaspreis-Anstiegs leicht zu Gunsten des Gaskessels. Dies liegt zum einen an den um 35 % gestiegenen Investitionen für Wärmepumpen aufgrund des Auslaufens der Förderung und zum anderen daran, dass Gas nach wie vor nur zu einem geringen Teil (11 % der gesamten bereitgestellten Wärme) zur Spitzenlastdeckung eingesetzt wird und der Gaspreis daher nur eine untergeordnete Rolle spielt. Aufgrund der niedrigeren Preise für Batterien im Jahr 2050, trotz Wegfall der Förderung, verdoppeln sich die elektrischen Speichergrößen. Dadurch erhöht sich die PV-Eigenverbrauchsquote auf 54 %.

Der größte Unterschied zwischen regelbasierter und optimierter Dimensionierung sind die jährlichen Gesamtkosten für jedes Gebäude, die im Fall der regelbasierten Dimensionierung höher sind; im Szenario für 2020 liegt die Abweichung bei 27 % und beim Szenario für 2050 bei 21 %. Dies ist zu erwarten, da der genetische Algorithmus mittels der Zielfunktion die Komponentengrößen bestimmt und auswählt, welche die niedrigsten jährlichen Gesamtkosten verursachen.

Vergleicht man die installierte Wärmeleistung von Wärmepumpe und Gaskessel in beiden Dimensionierungsmethoden, so ist die Wärmepumpe bei der regelbasierten Dimensionierung stets größer als der Gaskessel. Dies ist eine Bedingung des gewählten Systemmodells, da in einem System mit zwei Wärmeerzeugern stets

Tabelle 5.9: Ergebnisse der Dimensionierung mit genetischem Algorithmus für das Wärmepumpensystem inkl. jährlichen Gesamtkosten für das Szenario 2050 für die Fallstudie Wüstenrot

	Wärmepumpe [kW]	Gaskessel [kW]	Thermischer Speicher [m ³]	Batterie [kWh]	$f_{ges,2050}$ 2020 [€]
ID001	8	10	0,7	14	5.424
ID002	10	3	0,7	7	3.264
ID009	9	1	1,0	7	3.194
ID010	9	10	0,7	5	3.392
ID012	7	7	0,6	9	3.596
ID019	7	13	0,5	8	4.199
ID020	8	15	0,7	5	4.008
ID021	7	1	0,6	2	2.264
ID022	10	2	0,9	3	3.209
ID024	11	0	0,8	9	3.456
ID025	7	1	0,5	4	2.075

eine der Komponenten als Haupt- und eine als Spitzenlastherzeuger festgelegt ist. Im Gegensatz dazu ist beim genetischen Algorithmus das Verhältnis der beiden Komponenten nicht vordefiniert. Daher wird automatisch die wirtschaftlich bessere Variante als Hauptherzeuger gewählt, was sowohl der Gaskessel als auch die Wärmepumpe sein kann. Unterschiede in den gebäudespezifischen Lasten oder die verschiedenen Größen der PV-Anlagen können hier ausschlaggebend für die Dimensionierung sein. Es kann aber auch Zufall sein, welche Kombination gewählt wird, wenn die Ergebnisse nahe beieinander liegen. Eine große Wärmepumpe mit einem kleinen Gaskessel kann unter den jeweils gegebenen Rahmenbedingungen sehr ähnliche Kosten verursachen als eine kleine Wärmepumpe mit großem Gaskessel.

Die Regeln für die regelbasierte Dimensionierung basieren auf Erfahrungen von Experten, die mit den entsprechenden Randbedingungen wie Preisen für Energie-

träger, Investitionen für Komponenten oder technisch sinnvollen Betriebsweisen gekoppelt sind.

Mit diesen Regeln und der einfachen Variation der benötigten Angaben können verschiedene Szenarien (z.B. unterschiedliche Anteile der Haupterzeugers an der Spitzenlast) nacheinander simuliert und die Ergebnisse verglichen werden. Nach jeder Anpassung ist ein neuer Simulationsdurchlauf notwendig. Dabei sollten die Komponenten und Systemzusammenhänge dem Anwender ausreichend bekannt sein, um eine sinnvolle regelbasierte Dimensionierung vornehmen zu können.

Der Vorteil des regelbasierten Ansatzes ist, dass er zusätzlich externe Faktoren berücksichtigen kann, die vom gewählten Optimierungsmodell und der Zielfunktion nicht direkt abgebildet werden können. So ist die Zielfunktion beim genetischen Algorithmus auf die Reduzierung der Gesamtkosten festgelegt. Mögliche Mindestanforderungen für den Anteil erneuerbarer Energien oder CO₂-Emissionsziele aufgrund von Gesetzen, ebenso wie technische Anforderungen etwa an eine Mindestanzahl von Betriebsstunden der Systemkomponenten können hier aufgrund der Modellstruktur nicht berücksichtigt werden.

Wenn sich die Randbedingungen aus Preisen und Emissionen jedoch in der Zukunft ändern, gelten möglicherweise nicht mehr die gleichen Regeln wie in der Vergangenheit. Hinzu kommt, dass für noch nicht etablierte Systemkombinationen und Komponenten wie z.B. Elektrolyseure und Brennstoffzellen noch keine Regeln allgemein verfügbar sind. Für solche Anwendungsfälle ist die Nutzung eines Optimierungsalgorithmus sinnvoll. Zu beachten ist hierbei allerdings, dass die gesetzten Randbedingungen keine Beeinflussung des möglichen Ergebnisses darstellen dürfen. So kann etwa zur Reduktion der Rechenzeit ein Zielkorridor für die Anlagengrößen der Komponenten angegeben werden. Hier ist es wichtig, keine sinnvollen Lösungen auszuschließen. In diesem Zusammenhang kann eine regelbasierte Dimensionierung der Komponenten als erster Schritt von Vorteil sein, um eine plausible Größenordnung der Komponenten sicherzustellen. Es kann darüber hinaus empfehlenswert sein, die Optimierung bei konkreterer Systemplanung und detaillierteren Randbedingungen erneut durchzuführen, um den Einfluss der veränderten Bedingungen berücksichtigen zu können.

Die Dimensionierung der Komponenten mit genetischem Algorithmus und anschließende Systemsimulation in INSEL nimmt deutlich mehr Rechenzeit in Anspruch als die regelbasierte Auslegung und Simulation. Während die regelbasierte Auslegung und Simulation mit SimStadt und INSEL (inkl. Berechnung des PV-Potenzials, des Wärme- und des Strombedarfs) nur 25 Sekunden für alle elf Gebäude benötigt, dauert ein Optimierungslauf (bei der die Lastgänge bereits extern vorliegen) auf dem selben Rechner für die gleichen elf Gebäude 3 Stunden. Dies ist akzeptabel, wenn es sich um kleinere Quartiere handelt. Für die Betrachtung größerer Quartiere oder Gemeinden stellt die große Rechenzeit allerdings ein Problem dar. Daher ist diese Methode eine sinnvolle Option vor allem für die detaillierte Systemdimensionierung einer kleineren Anzahl von Gebäuden, bei der die Rechenzeit annehmbar ist.

5.3.3 Systemauswahl und Simulation zentraler Versorgung mit BHKWs und Gaskesseln im Rosensteinviertel

Im neuen Rosensteinquartier, welches auf dem durch das Infrastrukturprojekt Stuttgart21 freiwerdenden, 85 Hektar großen Gelände in zentraler Lage in Stuttgart entstehen soll, möchte die Landeshauptstadt Stuttgart ein „klimagerechtes“ Quartier entwickeln. Dafür wurde im Jahr 2018 ein zweistufiger Planungswettbewerb ausgelobt, bei dem über 50 internationale Konsortien aus Stadtplanern, Landschaftsarchitekten, Verkehrs- und Energieplanern teilgenommen haben. Der Auslobungstext der Stadt Stuttgart beschreibt die Ziele für ein Energiekonzept im Quartier folgendermaßen: *„Die Stadt strebt die Realisierung des Plusenergieniveaus und damit ein klimaneutrales Stadtquartier an. Der trotz höchster energetischer Anforderungen notwendige Energiebedarf der zukünftigen Bebauung ist vor allem durch am Standort oder in der unmittelbaren Nähe verfügbare Energie aus erneuerbaren Quellen zu decken. Ist es nicht möglich den kompletten Energiebedarf im Gebiet zu decken, kann die notwendige Restwärme über das Fernwärmenetz bezogen werden. Voraussetzung ist jedoch, dass die Energiebilanz des Quartiers und die Fernwärme klimaneutral sind. Die Realisierung fossiler Energieerzeugungsanlagen ist im neuen Quartier auszuschließen.“* [100] Insgesamt soll in dieser sehr zentralen Lage Wohnraum für mindestens 14.000 Einwohner entstehen, zusätzlich soll etwa ein Drittel des Umfangs der

geschaffenen Gebäudeflächen für Gewerbenutzungen zur Verfügung stehen. Außerdem sollen große Neubauten wie ein Kongresszentrum, ein Museumsgebäude sowie Schulen, soziale Einrichtungen und Sportanlagen im Quartier entstehen. In Abbildung 5.10 ist eine Überflugperspektive des Ende 2019 bestimmten Siegerentwurfs zu sehen.



Abbildung 5.10: Überflugperspektive des Siegerentwurfs für das neue Rosensteinquartier (www.asp-stuttgart.de/portfolio-items/internationaler-wettbewerb-rosenstein-stuttgart)

Das gesamte Rosensteinquartier ist in mehrere Teil-Quartiere unterteilt. Eines davon ist das annähernd dreieckige Rosensteinviertel, in Abbildung 5.10 links des Parks und oberhalb des geschwungenen Grüngürtels zu sehen. Auf Basis der Erläuterungen und der Geometrien des Siegerentwurfs wurde an der HFT Stuttgart ein 3D CityGML Modell des Rosensteinviertels erstellt und unter der CC BY 4.0 Lizenz veröffentlicht.⁶ Abbildung 5.11 zeigt eine Visualisierung dieses Modells.

⁶ <https://transfer.hft-stuttgart.de/gitlab/rushikesh.padsala/rosensteinquartier>

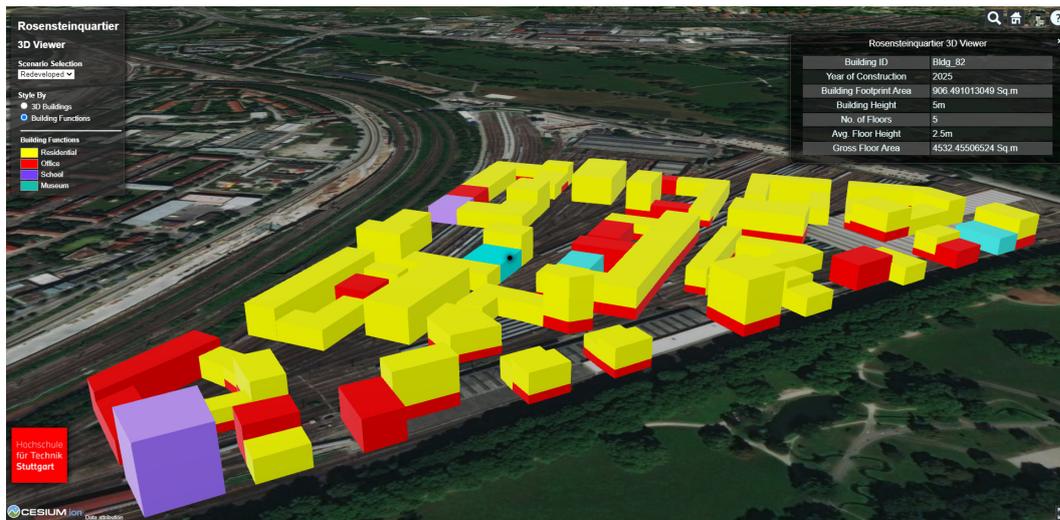


Abbildung 5.11: 3D Visualisierung des CityGML Modells, basierend auf dem Siegerentwurf für das Rosensteinviertel

Die unterschiedlichen Farben repräsentieren dabei die Nutzungen, gelb steht für Wohnnutzung, rot für Gewerbe und Büros, lila für Schulen sowie blau für Museen und kulturelle Einrichtungen. Die Flächen der einzelnen Nutzungen wurden ebenfalls aus dem Auslobungstext entnommen. 50 % der Flächen für Gewerbe und Büros wurden als Sekundärnutzung zu Wohngebäuden hinzugefügt, 50 % als reine Nichtwohngebäude angenommen. Die Schul- und Museumsgebäude sind ebenfalls reine Nichtwohngebäude. Tabelle 5.10 schlüsselt die Flächen im Rosensteinviertel nach Wohn- und Nichtwohnflächen auf und zeigt die Anzahl der Haushalte auf.

Tabelle 5.10: Kennzahlen des Siegerentwurfs Rosensteinviertel (Anzahl Haushalte basierend auf einer Annahme von 70 m² und 2 Personen pro Haushalt)

Wohnfläche	290.000
Nichtwohnfläche	130.334
Anzahl Haushalte	4.143

Aufgrund der Angaben im Auslobungstext und den regionalen Gegebenheiten wurde mithilfe des in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Flussdiagramms der mögliche Lösungsraum der Versorgungssysteme eingeschränkt. Da die Energieversorgung aus fossilen Quellen ausgeschlossen ist und Fernwärme nur zur Deckung eines

eventuellen Rest-Wärmebedarfs dienen soll, sind diese Energiequellen nicht geeignet. Gas- und Fernwärmenetz sowie Stromnetz sind allerdings in unmittelbarer Nähe des Neubaugebiets vorhanden. Aufgrund der hohen Wärmedichte von ca. 130 MWh/ha·a ist der Neubau eines Nahwärmenetzes zur Verteilung von Wärme möglich. Die Verlegung eines Nahwärmenetzes in einem Neubauquartier ist dabei grundsätzlich mit weniger finanziellem Aufwand verbunden als in einem Bestandsquartier. Da die Zieltemperatur des Heizungsvorlaufs in den Niedrigenergiegebäuden bei unter 45 °C liegt, ist eine Versorgung über Wärmepumpen eine grundsätzliche Option. Laut dem Kartendienst der LUBW⁷ sprechen keine lokalen Bedingungen gegen die Verlegung von Erdkollektoren oder Erdsonden, bzw. müssen im Einzelfall geprüft werden. Darüber hinaus befindet sich laut den Karten der Stadtentwässerung Stuttgart ein Abwasserkanal in unmittelbarer Nähe zum geplanten Quartier. Da es sich um ein zentral gelegenes innerstädtisches Quartier handelt, ist eine effiziente Ausnutzung der begrenzt vorhandenen Flächen wichtig, wodurch ein Biomassensystem mit großem Lager unrealistisch scheint.

Schlussfolgernd aus diesen Betrachtungen wird daher eine zentrale Wärmeerzeugung und Verteilung der Wärme mittels eines Nahwärmenetzes untersucht. Die Wärmeerzeugung erfolgt dabei durch mehrere Biogas-BHKWs und Spitzenlast-Gaskessel, die ebenfalls mit Biogas betrieben werden. Somit kann der Vorgabe zum klimaneutralen Stadtquartier entsprochen werden. Zusätzlich sorgt der Anschluss an das bestehende Fernwärmenetz für eine Erhöhung der Versorgungssicherheit und Resilienz.

Basierend auf dem zuvor beschriebenen CityGML Modell des Quartiers wird mit SimStadt der Wärmebedarf sowie das PV-Potenzial für jedes Gebäude berechnet. Darüber hinaus werden mit DHWcalc stündliche Profile für den Trinkwarmwasserbedarf für insgesamt 350 Wohngebäude erstellt. Dabei werden zwei Typgebäude angenommen, mit jeweils 8 bzw. 15 Haushalten je Gebäude. Der Warmwasserbedarf für die Nichtwohngebäude wird basierend auf der Belegungsdichte in P/m² sowie den Nutzungszeiten über das Jahr und über einen Tag konstant verteilt und mit der Gesamtfläche aus dem Entwurf verrechnet. Die Werte hierzu kommen aus

⁷ <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/>

der DIN V 18599-10 [54]. In Abbildung 5.12 sind die Ergebnisse der Heizwärme- und Trinkwarmwasserbedarfsberechnungen im Jahresverlauf zu sehen.

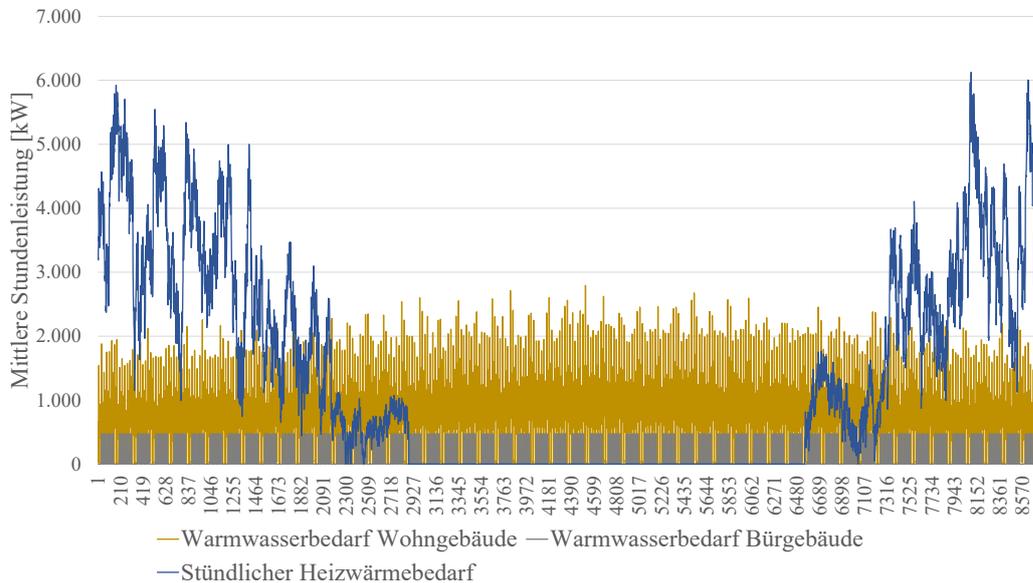


Abbildung 5.12: Simulation des Heizwärme- und Trinkwarmwasserbedarfs für die Fallstudie Rosensteinviertel

In blau ist der Bedarf für Raumwärme aller Gebäude zu sehen, in ocker der Warmwasserbedarf der Wohngebäude sowie in grau der Warmwasserbedarf der Bürogebäude. Zusätzlich gehen hier nicht dargestellte, angenommene Netzverluste von 5 % des Wärmebedarfs als Input in das Modell ein.

Für diese Analyse wird das in Kapitel 4.3.2 beschriebene Systemmodell von drei BHKWs in Kaskade und Gaskessel angewandt. Der gesamte Wärmebedarf geht neben dem simulierten Strombedarf und dem PV-Potenzial für das Quartier in die Versorgungssimulation ein. Basierend auf dem Bedarf werden die Erzeuger regelbasiert dimensioniert. Die Spitzenlast P_{peak} beträgt 8.364 kW, es wird angenommen, dass 40 % der Spitzenlast durch die BHKWs abgedeckt werden und der Rest durch mehrere Gaskessel. Daraus ergeben sich die errechneten Kennwerte P_{soll} der Komponenten sowie deren Entsprechungen mit den geringsten Abweichungen dazu aus der Energiesystemkomponenten-Bibliothek (ESKB) P_{ist} in Tabelle 5.11.

Tabelle 5.11: Erzeuger-Dimensionierung BHKW und Gaskessel für Fallstudie Rosensteinviertel

	Anteil an P_{peak}	P_{soll}	Anzahl Erzeuger	P_{soll} je Erzeuger	P_{ist} je Erzeuger lt. ESKB	P_{ist} gesamt lt. ESKB
	[%]	[kW]	[-]	[kW]	[kW]	[kW]
BHKW	40	3.389	3	1.130	1.082	3.246
Gaskessel	60	5.084	20	254	280	5.600

Die Zielgröße P_{soll} errechnet sich aus der Spitzenlast und dem Anteil daran, den der jeweilige Erzeuger abdecken soll. Durch die Angabe einer Anzahl von Erzeugern ergibt sich P_{soll} je Erzeuger. Dabei wird davon ausgegangen, dass alle BHKWs jeweils die gleiche installierte Leistung haben, ebenso wie alle Gaskessel. Nach einem Abgleich mit den tatsächlichen Komponenten in der ESKB wird jeweils P_{ist} des Erzeugers mit der geringsten Abweichung von P_{soll} gewählt und wiederum mit der zuvor definierten Anzahl der Erzeuger multipliziert. So ergibt sich eine installierte thermische Gesamtleistung von 8.846 kW_{th} aufgeteilt in drei BHKWs mit je 1.130 kW_{th} sowie 20 Gaskessel mit je 254 kW_{th} installierter Leistung.

In Abbildung 5.13 ist die Jahresdauerlinie des Gesamtbedarfs inkl. Verlusten in blau zu sehen, ebenso die Jahresdauerlinien der kumulierten Wärmeerzeugung jeweils durch BHKWs (grün) und Gaskessel (orange).

Die Betriebsstunden für BHKW 1 liegen bei 7.778, für BHKW 2 bei 4.603 und BHKW 3 bei 3.078. Die 20 Gaskessel passen sich flexibel an den Restbedarf an, damit ist in 6.000 Stunden des Jahres mindestens einer der Kessel in Betrieb.

In Abbildung 5.14 sind Wärmebedarf inkl. Verluste (blau), Erzeugung jeweils durch BHKWs (grün) und Gaskessel (orange) im Verlauf von 24 Stunden (Stunde 7790 bis 7814) Ende November zu sehen. Dabei ist jedes der drei BHKWs dann aktiv, wenn die angefragte Leistung zwischen der maximalen und minimalen Leistung (die hier bei 50 % der installierten Leistung liegt) des BHKWs liegt. So werden nacheinander die drei BHKWs angefragt; bei Residuallasten, die unter der Mindestleistung des jeweiligen BHKWs liegen, produzieren die Gaskessel die angefragte Wärmemenge.

5 Anwendung der entwickelten Methoden

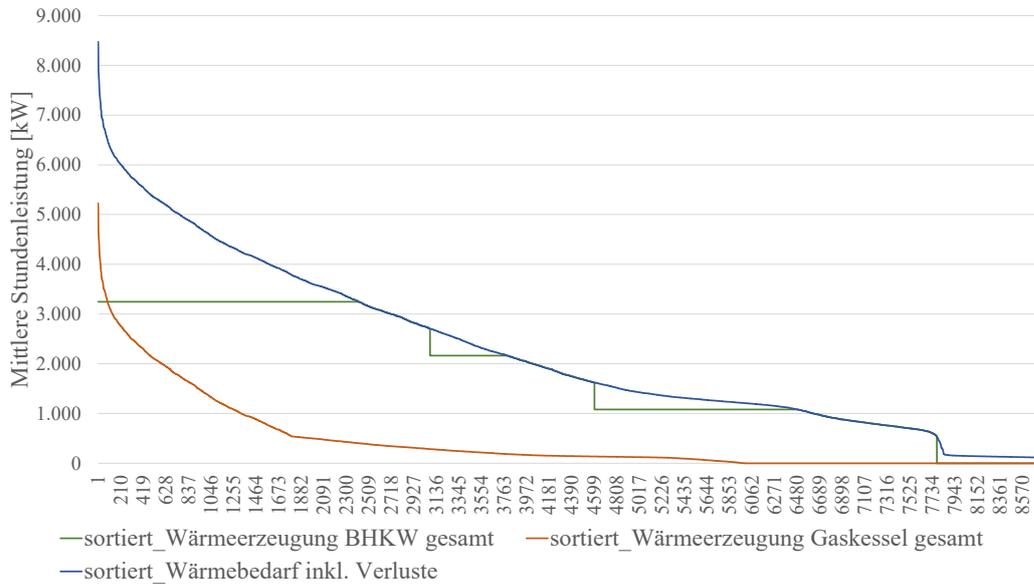


Abbildung 5.13: Jahresdauerlinien für Gesamtwärmebedarf (blau), Wärmeerzeugung der BHKWs (grün) und Wärmeerzeugung der Gaskessel (orange) für die Fallstudie Rosensteinviertel



Abbildung 5.14: Wärmebedarf (blau) und -erzeugung (BHKWs (grün) und Gaskessel (orange)) für einen Tag Ende November für die Fallstudie Rosensteinviertel

6 Diskussion und kritische Würdigung

In den vorangegangenen Kapiteln wurden Methoden zur Energiebedarfs- und Systemsimulation für Quartiere vorgestellt sowie diese auf Fallstudien angewandt. In Kapitel 6.1 soll die Übertragbarkeit der Methoden auf andere Fallstudien bewertet werden und schließlich in Kapitel 6.2 die entwickelte Methodik kritisch hinterfragt werden.

Die Anwendung der entwickelten Methoden auf verschiedene Fallstudien in Kapitel 5 hat gezeigt, dass bereits mit wenigen verfügbaren Input-Daten der gesamte Workflow zur Simulation von Energiesystemen zur Wärmeversorgung durchgeführt werden kann.

Die praktische Anwendbarkeit der Methoden wurde unter anderem in dem Forschungsprojekt SimStadt 2.0 gezeigt, bei dem verschiedene Praxispartner wie die Stadtwerke Stuttgart und die Mainzer Wärme Plus GmbH als Partner beteiligt waren. Die Fallstudie Mainz in Kapitel 5.3.1 stammt aus diesem Projekt. Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit realen Messdaten zeigt eine gute Übereinstimmung und damit eine hohe praktische Anwendungstauglichkeit.

6.1 Bewertung der Übertragbarkeit

Alle Methoden, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und angewandt wurden, können auf andere Quartiere oder Städte übertragen werden, wenn die benötigten Inputdaten zur Verfügung stehen. Dabei ist die Übertragbarkeit sowohl national als auch international gegeben. Diese Übertragbarkeit wurde bereits in mehreren Forschungsprojekten und Anwendungsfällen getestet und erfolgreich demonstriert. Neben den in Kapitel 5 beschriebenen Fallstudien gibt es noch weitere Stadtquartiere und Kommunen, für die mit Hilfe der in dieser Arbeit entwickelten Methoden Szenarien für die zukünftige Wärmeversorgung berechnet werden konnten.

CityGML Modelle sind weitgehend flächendeckend für Bestandsgebäude weltweit verfügbar. Für Gebäude, die sich noch in Planung befinden oder erst kürzlich fertiggestellt wurden, können einfache Modelle schnell erzeugt werden (siehe Kapitel 5.3.2). Gebäudephysik-Bibliotheken können für die meisten europäischen Länder aus der TABULA Datenbank übernommen werden, aber auch gänzlich anders strukturierte Bibliotheken anderer Länder können mit ihrer individuellen Systematik integriert werden (siehe Kapitel 4.2.2). Falls die für die Simulation des Wärmebedarfs mit SimStadt notwendigen Informationen zu Baujahr und Nutzung nicht im Modell vorhanden sind, können diese mit den in Kapitel 4.1.1 vorgestellten Methoden ermittelt und zugeordnet werden. Die für das Attribut *yearOfConstruction* benötigten Daten aus dem Zensus sind deutschlandweit verfügbar, die OSM Daten zur Zuordnung des Attributs *function* sind vor allem in urbanen Gebieten weltweit verfügbar. Die in Kapitel 4.3.2 vorgestellten zentralen und dezentralen Simulationsmodelle für Energiesysteme, bzw. deren Templates, können auf jede beliebige Fallstudie angewandt werden. Darüber hinaus können sie, bei Bedarf wie z.B. bei der Anwendung eines Modells auf die Fallstudie in Wüstenrot in Kapitel 5.3.2 beschrieben, durch erfahrene Nutzer in der INSEL Umgebung manuell angepasst und anschließend wieder in den SimStadt Workflow eingebunden werden. Das Datenmodell sowie der Editor der Energiesystemkomponenten-Bibliothek sind als unabhängige Modelle definiert, so dass sie mit einer Vielzahl von Simulationstools und -methoden, sowohl national als auch international, kombinierbar sind. Dazu gibt es beispielsweise im Subtask B des IEA EBC Annex 83: Positive Energy Districts¹ Bemühungen zu einer einheitlichen Datenhaltung von Energiesystemkomponenten.

6.2 Kritische Würdigung und Ausblick

Obwohl die Ergebnisse der Anwendungen der Methoden geeignet scheinen, um ausreichend genaue Aussagen vor allem im frühen Planungsprozess von energetischen Maßnahmen auf Quartiersebene zu treffen, gibt es dennoch einige Aspekte, die kritisch zu hinterfragen sind. Sie geben Anhaltspunkte im Hinblick auf die

¹ <https://annex83.iea-ebc.org/>

Definition weiterer Forschungsfragen, die in Zukunft von Bedeutung sein könnten.

6.2.1 Inhaltliche Aspekte

In der beschriebenen Fallstudie zur Erprobung der Methode zur Attributierung von fehlenden Gebäudeparametern hat eine Umfrage zu in der Vergangenheit durchgeführten Sanierungen ergeben, dass bei 171 Rückmeldungen 96 Gebäude saniert wurden, etwas mehr als die Hälfte davon in den letzten sieben Jahren. Allerdings wurden keine Angaben zur Sanierungstiefe bzw. den sanierten Bauteilen abgefragt. Dies zeigt die Notwendigkeit der Berücksichtigung der Sanierung als Einfluss auf die Ergebnisse der Wärmebedarfsberechnung. Dieses Attribut ist in keiner der im Rahmen dieser Arbeit herangezogenen Datenquellen verfügbar.

Aufgrund der möglichen vielfältigen Kombination von einzelnen Systemkomponenten wie Wärmeerzeugern und Speichern sowie der zusätzlichen Komplexität durch die Nutzung verschiedener Energieträger wie Erdgas, Wasserstoff oder Biogas, konnten nicht alle möglichen Energiesysteme im Rahmen dieser Arbeit als Modelle entwickelt und im Workflow hinterlegt werden. Zudem fehlt ein Simulationsmodell mit Solarthermie, da bislang die Gebäudedächer vorwiegend für die Platzierung von PV-Modulen verwendet werden. Wasserstoffbasierte Systeme werden aufgrund ihrer komplexen Struktur im Rahmen dieser Arbeit nicht modelliert. Darüber hinaus werden Strom-, Gas- oder Fernwärmenetze nicht direkt in den Modellen betrachtet. Bei zentralen Versorgungssystemen mit Wärmenetzen werden Netzverluste als zusätzlicher Bedarf berücksichtigt. Die verfügbare Kapazität der Netze aus Modellsicht wird als unendlich angenommen, d.h. das zum Beispiel Strom zum Betrieb von Wärmepumpen oder Gas zum Betrieb von BHKWs jederzeit aus dem jeweiligen Netz verfügbar sind. Durch den modularen Aufbau von SimStadt und der Simulationsmodelle könnten in Zukunft allerdings externe Modelle zur Abbildung dieser Limitationen integriert werden.

Bei dem entwickelten Flussdiagramm für die Wahl der möglichen Versorgungsvarianten sind weitestgehend nur technisch-wirtschaftliche bzw. rechtliche Parameter berücksichtigt. Soziale Faktoren wie z.B. die Akzeptanz für die Umsetzung verschiedener Maßnahmen können die Auswahl der verfügbaren Optionen jedoch

ebenfalls reduzieren. Die Einschränkung des Lösungsraums ist nicht direkt in die Simulationsumgebung SimStadt integriert. Wenn diese Funktion innerhalb des Tools zur Verfügung stehen würde, könnte die getroffene Vorauswahl der Systeme ohne den entsprechenden manuellen Zwischenschritt direkt in SimStadt übernommen und anschließend simuliert werden.

Der Fokus der Arbeit sowie von SimStadt als Plattform generell liegt auf der Betrachtung von Wohngebäuden bzw. Wohnquartieren mit anteiliger Nichtwohnutzung. Die zum Teil sehr individuellen Anforderungen an Energieversorgungssysteme von industriellen Quartieren und Liegenschaften sind daher nicht in den Modellen berücksichtigt. Dennoch können sie, sofern die individuellen Anforderungen und Gegebenheiten es zulassen, ebenfalls auf solche Quartiere angewandt werden.

Im Zuge der Sektorkopplung wäre eine Erweiterung der Modelle und Methoden denkbar, um den Verkehrssektor und damit vor allem die Elektromobilität in die Plattform dynamisch zu integrieren. Aktuell ist es zwar möglich, ein Lastprofil für den Strombedarf von Elektrofahrzeugen in die Modelle zu integrieren, allerdings müssen diese extern berechnet und als Input vorgegeben werden.

6.2.2 Methodische Aspekte

Die Zuordnung von Baujahren zu Gebäuden beruht auf statischen Kennzahlen auf Gemeinde- bzw. Landesebene. Die Daten auf Landesebene des IWU sind dabei zwar mit mehr Informationen versehen als die Daten auf Gemeindeebene, sie können aber keine individuellen Entwicklungen der jeweiligen Gemeinden abbilden. Bei den Daten auf Gemeindeebene des Zensus ist hingegen nur die Anzahl der Gebäude im entsprechenden Baujahres-Bereich gegeben und kein Bezug zu Gebäudetypen vorhanden. Hier wäre eine Anpassung der Erhebungsmethoden des Zensus denkbar, um genauere Aussagen treffen zu können. Alternativ wäre auch denkbar, mit Hilfe von künstlicher Intelligenz in Satellitenbildern wie z.B. bei Google Earth oder in Google Street View basierend auf Dächern und Fassaden zu erkennen, aus welchem Baujahr das Gebäude stammt [38]. Bei diesem Verfahren könnte man ggf. zusätzlich erkennen, ob das Gebäude saniert oder unsaniert ist.

Die Verfügbarkeit von Informationen zur Gebäudenutzung ist vor allem im urbanen Bereich sehr gut. Bisher wurde die Nutzung dieser Informationen nur für einzelne Gebiete für den zu der Zeit aktuellen Zustand in das Gebäudemodell integriert und genutzt. Eine regelmäßige, automatisierte Abfrage von OSM Daten und deren Verwaltung z.B. in einer SQL Datenbank würde Veränderungen in der Nutzung von Gebäuden automatisch aktualisieren. Wenn diese Daten wiederum automatisch in das korrespondierende CityGML Modell geschrieben würden, wäre so ein stets aktuelles Bild der Gebäudenutzung verfügbar.

Bei den im SimStadt Workflow integrierten Simulationsmodellen für Energiesysteme sind zum Teil Vereinfachungen gemacht worden. So wird zwar der Wärmebedarf sowohl für Raumwärme als auch für Trinkwarmwasser stets je Gebäude individuell berechnet und berücksichtigt, jedoch wird bei der Systemsimulation lediglich die Summe der beiden Bedarfe von den jeweiligen im Modell verfügbaren Erzeugern gedeckt, es findet also keine getrennte Erzeugung oder Speicherung von Raumwärme und Trinkwarmwasser im Modell statt. Vor allem in sanierten Gebäuden oder Neubauten mit einer hohen Temperaturdifferenz zwischen den beiden Bedarfen gibt es jedoch i.d.R. eine getrennte Erzeugung bzw. Speicherung der beiden Medien.

Eine weitere Vereinfachung in den Simulationsmodellen betrifft den thermischen Speicher. Dieser ist als einfacher, durchmischter Warmwasserspeicher definiert. Vor allem bei Systemen mit Wärmeerzeugern, die unterschiedliche Temperaturen bereitstellen, kann jedoch ein Speicher mit Schichtladekonzept zu einer höheren Gesamteffizienz führen und die Realität genauer abbilden.

Die Wärmepumpen im Modell sind ohne Inverter modelliert, d.h. die Wärmepumpe ist immer stets an oder aus, sie moduliert also nicht. Dies kann zu einer häufigeren Taktung der Wärmepumpe führen, die in Realität vermieden werden soll. Gleiches gilt auch für andere Erzeuger, die nicht oder nur in einem bestimmten Bereich modulieren, wie z.B. Biomassekessel.

Kosten und technische Parameter der Systemkomponenten beruhen auf tatsächlichen Daten von Herstellern. Es findet keine Fortschreibung dieser Parameter in die Zukunft statt. Dies könnte jedoch bei Lebenszeiten von 20 Jahren und mehr für Systemkomponenten, vor allem vor dem Hintergrund der raschen Preis- und

Effizienzentwicklung einiger Komponenten der erneuerbaren Energien wie Batterien oder PV-Modulen in den letzten Jahren, eine Vereinfachung darstellen. Grund dafür ist die Tatsache, dass Entwicklungen sowohl bezogen auf Preise als auch auf die technische Entwicklung nicht zuverlässig genug prognostiziert werden können. Ein weiterer Nachteil bei der Berücksichtigung von Herstellerdaten sind die teilweise nur unter Laborbedingungen angegebenen Wirkungsgrade bzw. Leistungen von einzelnen Komponenten. Besonders hervorzuheben ist dabei die vom Hersteller angegebene Nennleistung von Wärmepumpen. Diese ist zum Beispiel für eine Luft/Wasser Wärmepumpe bei einer Außentemperatur von 7 °C und einer Vorlauftemperatur von 35 °C angegeben (A7/W35). Die an diesem Punkt angegebene Heizleistung sowie der COP wird von der Wärmepumpe allerdings bei niedrigeren Außentemperaturen deutlich unterschritten.

Bei der Verwendung der Simulation als Modellierungsmethode ist ein globales Optimum i.d.R. nicht ohne Weiteres erreichbar und auch nicht das erklärte Ziel. Durch die Verknüpfung der zunächst individuell für den konkreten Anwendungsfall ausgewählten Simulationsmodelle mit einem genetischen Algorithmus lassen sich mittels meta-heuristischer Parametervariation jedoch Ergebnisse erzielen, die einer optimalen Lösung sehr nahe kommen können. Aktuell ist die Optimierung mit genetischem Algorithmus nicht in SimStadt integriert und muss daher manuell durchgeführt werden. Um die Fehleranfälligkeit dabei zu reduzieren sowie den Automatisierungsgrad und die Nutzerfreundlichkeit weiter erhöhen zu können, wäre eine Integration von Vorteil. Dadurch wäre der Umweg über ein externes Python-Skript, welches wiederum die Installation der entsprechenden Tools erfordert, nicht mehr erforderlich. Diese Integration könnte auch die Variation von Parametern des genetischen Algorithmus innerhalb von SimStadt beinhalten, die dem erfahrenen Nutzer eine individuelle Anpassungsmöglichkeit an die jeweiligen Anforderungen erlaubt und ggf. die Rechenzeiten reduzieren kann.

Der regelbasierte Ansatz zur Dimensionierung der Simulationsmodelle berücksichtigt aktuell nur wenige Nutzerangaben wie z.B. den Anteil der Spitzenlast, der vom Haupterzeuger des Systems bereitgestellt werden soll. Weitere Angaben wie z.B. Mindestanzahl der Betriebsstunden oder auch Vorgaben zu maximalen CO₂-

Emissionen oder zu erreichendem Primärenergiefaktor wären für Praxisakteure hingegen zusätzlich relevant.

7 Zusammenfassung

Für die Erreichung der Ziele zur Reduktion der Treibhausgasemissionen bis Mitte dieses Jahrhunderts müssen jetzt die notwendigen Maßnahmen ergriffen und umgesetzt werden. Nachdem in der Vergangenheit vor allem erneuerbare Stromerzeugung und die Verbesserung der Effizienz im Vordergrund standen, liegt der Fokus nun auch zunehmend auf einer nachhaltigen Wärmeversorgung. Viel Potenzial zur Reduktion der Emissionen steckt in der erneuerbaren Wärmeversorgung von Gebäuden.

Damit geeignete Maßnahmen im Gebäudesektor identifiziert und anschließend umgesetzt werden können, benötigt es passende Tools und Methoden, die von den zuständigen Personen in den Kommunen und Planungsbüros genutzt werden können. Diese sollten zunächst den Status-quo der unterschiedlichen Energiebedarfe - Wärme, Warmwasser und Strom - analysieren sowie lokale erneuerbare Potenziale identifizieren können. Darüber hinaus sollen abhängig von den individuellen Gegebenheiten und Rahmenbedingungen verschiedene Möglichkeiten zur Versorgung der Gebäude vorgeschlagen und verglichen werden.

In der Vergangenheit sind sowohl national als auch international bereits eine große Zahl an Tools und Methoden zur urbanen Gebäudeenergiemodellierung entwickelt worden. Viele davon fokussieren sich auf die detaillierte Berechnung von Einzelgebäuden oder aber betrachten Szenarien auf übergeordneter, nationaler Ebene. Sie benötigen meist eine Vielzahl von Daten, die oft nur mit hohem Zeit- und Arbeitsaufwand beschaffen werden können. Zusätzlich fokussieren viele der Tools nur auf einzelne der zuvor beschriebenen relevanten Bereiche aus Bedarfs-, Potenzial- und Versorgungsanalysen, decken aber nicht das gesamte benötigte Spektrum der Analysemöglichkeiten ab.

Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Verfahren entwickelt, welches es lokalen Entscheidungsträgern wie Projektentwicklern oder Klimaschutzmanagern von Kommunen und Landkreisen ermöglicht, Energiebilanzen sowie unterschiedliche Szenarien für eine nachhaltige Wärmeversorgung der Gebäude eines Quartiers

oder einer Kommune zu berechnen, bewerten und vergleichen. Dafür werden wenige, flächendeckend verfügbare Eingangsdaten benötigt. Das Verfahren basiert auf dem Tool SimStadt, welches unabhängig von dieser Arbeit bereits seit 2013 an der HFT Stuttgart entwickelt wird und die Bestimmung des Wärme- und Strombedarfs sowie die Ermittlung der lokalen PV-, und Biomasse-Potenziale umfasst. SimStadt ist ein hierarchisch aufgebauter Workflowmanager, der durch seine Struktur eine modulare Erweiterung um neue Workflows zulässt. Die Vorteile sind dabei die konsistente Datenbasis für alle Teil-Analysen, die Nutzung von 3D Gebäudedaten, die auch eine anschauliche Visualisierung der Ergebnisse ermöglichen, die einfache Bedienbarkeit der grafischen Oberfläche sowie ein hohes Maß an Übertragbarkeit auf Quartiere national und - mit wenigen Anpassungen - auch international. Die Rechenzeiten sind hier trotz hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung gering genug, um mehrere hundert Gebäude in wenigen Sekunden berechnen zu können.

Auf dieser Basis kommen im Rahmen der vorliegenden Arbeit verschiedene Methoden unter anderem aus dem Bereich der Geoinformatik, der heuristischen Entscheidungsfindung, der objektorientierten Modellierung mit UML sowie der mathematischen Modellbildung in Form der physikalischen Modellierung mit Python, Java und INSEL zum Einsatz. Die entwickelten Methoden und deren Verknüpfung erlauben so etwa eine umfassendere Ermittlung des Wärmebedarfs, auch bei fehlenden Gebäudeattributen, durch Nutzung von frei verfügbaren Daten z.B. aus OpenStreetMap.

Die Einschränkung des Lösungsraums der Vielzahl an möglichen Systemen für die zentrale oder dezentrale Wärmeversorgung von Gebäuden wird durch ein neu entwickeltes Flussdiagramm ermöglicht, welches lokale Gegebenheiten wie vorhandene Netze oder geologische Besonderheiten berücksichtigt. Weiterhin wurden für verschiedene zentrale und dezentrale Wärmeversorgungssysteme Simulationsmodelle, bestehend aus i.d.R. mehreren Erzeugern und Speichern, in der Simulationsumgebung INSEL erstellt, die in das Workflowmanagementsystem von SimStadt integriert werden können. Die Modelle stehen dabei im Spannungsfeld zwischen einer möglichst geringen Rechenzeit und einer hohen Detaillierung der Ergebnisse.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde darüber hinaus ein Datenmodell entwickelt, das die Verwaltung von Komponenten-Informationen (z.B. Angaben zu installierten Leistungen oder Effizienzkennwerten von BHKWs oder Kesseln) in einer Datenbank sowie deren Verknüpfung mit verschiedenen Modellierungstools erlaubt. Durch die Verbindung zu SimStadt wird eine automatische Parametrisierung der neu entwickelten Systemmodelle mit den Daten aus der Energiesystemkomponenten-Bibliothek ermöglicht.

Basierend auf dem zuvor in SimStadt ermittelten Bedarf und einigen vom Nutzer bereitgestellten Werten können mittels der hier entwickelten regelbasierten Dimensionierung die Komponenten der Simulationsmodelle konfiguriert werden. Die passenden Informationen werden automatisch aus der verknüpften Bibliothek gelesen, in die Systemmodelle geschrieben und diese anschließend berechnet. Die kurzen Rechenzeiten bei der regelbasierten Dimensionierung erlauben die Simulation und den Vergleich einer Vielzahl von Szenarien. Alternativ dazu kann eine Dimensionierung mit genetischem Algorithmus bei längeren Rechenzeiten die Kombination der Komponenten bestimmen, welche die geringsten Gesamtkosten verursacht. Somit kann die Berechnung von Bedarf und Versorgung automatisch innerhalb der gleichen Simulationsumgebung erfolgen.

Die Anwendung der entwickelten Methoden wird anhand von mehreren Fallstudien gezeigt. Dabei wird die einfache Anwendbarkeit sowie die Übertragbarkeit des Verfahrens demonstriert. So kann in der Fallstudie Mainz mit 65 Gebäuden die Simulation eines Systems mit Biomasse- und fossilem Kessel mit gemessenen Werten eines Jahres verglichen werden. Dabei ist eine Abweichung über das Jahr von 6 % festzustellen, bei stündlicher Betrachtung liegt der NRMSE bei 11 %. Aufgrund von z.T. individuellen Betriebszuständen oder unvorhergesehenen Ausfällen der Anlagen sind diese Abweichungen zwischen Modell und Realität akzeptabel.

In der Fallstudie eines Teilgebiets des derzeit in Planung befindlichen Rosensteinqartiers mit über 4.000 Haushalten in der Stuttgarter Innenstadt wird mittels des Flussdiagramms zunächst ein geeignetes Versorgungssystem ausgewählt. Aufgrund der zentrumsnahen Lage und Größe des Quartiers in der Nähe von Mineralquellen sowie Vorgaben der Stadt Stuttgart wurden mehrere Biogas-BHKWs und -Kessel gewählt, die ein neu zu bauendes Nahwärmenetz speisen. Aus Gründen

der Resilienz wird eine zusätzliche Anbindung an das nahe gelegene Fernwärmenetz angenommen. Dieses System wird anschließend mittels regelbasierter Dimensionierung definiert, parametrisiert und simuliert.

Die Fallstudie Wüstenrot mit elf Gebäuden beschäftigt sich mit dem Vergleich der regelbasierten Dimensionierung und der Dimensionierung mittels genetischem Algorithmus. Zuvor werden mit SimStadt Wärme-, Strom- und Warmwasserbedarfe sowie PV-Potenziale ermittelt, die als Eingangsdaten in den Simulationsmodellen genutzt werden. Jeweils zwei Szenarien für eine dezentrale Versorgung mit einem Wärmepumpen-System unter Rahmenbedingungen für 2020 und 2050 werden berechnet und verglichen. Dabei zeigt sich ein Kostenvorteil bei der Dimensionierung mit genetischem Algorithmus von 27 % in 2020 bzw. 21 % in 2050. Die Rechenzeiten liegen bei der regelbasierten Dimensionierung bei wenigen Sekunden, bei der Dimensionierung mit genetischem Algorithmus hingegen bei knapp drei Stunden.

Im Rahmen der weiteren Forschung können einige Erweiterungen die Ergebnisse zusätzlich verbessern. So liegt etwa der Fokus in der vorliegenden Arbeit auf dem Wohngebäudesektor. Nichtwohngebäude mit ihren speziellen Anforderungen an Versorgungssysteme werden nicht explizit berücksichtigt. Ebenso können in der Zukunft z.B. wasserstoffbasierte Systeme an Bedeutung gewinnen, die nicht im Rahmen dieser Arbeit in der Modellierung berücksichtigt wurden.

Das entwickelte Flussdiagramm ist nicht direkt in die Simulationsumgebung SimStadt integriert. Wenn diese Funktion innerhalb des Tools zur Verfügung stehen würde, könnte die getroffene Vorauswahl der Systeme ohne den manuellen Zwischenschritt direkt in SimStadt übernommen und anschließend simuliert werden.

Mit den in dieser Arbeit entwickelten und verknüpften Methoden steht insgesamt ein Werkzeug zur Verfügung, welches nun den gesamten Bereich der urbanen Gebäudeenergiesimulation abdeckt und somit die regionale Energiesystemanalyse innerhalb eines Workflowmanagementsystems ermöglicht. Mit nur wenigen, flächendeckend verfügbaren Informationen und einer anschaulichen Nutzeroberfläche können so verschiedene Szenarien für die erneuerbare Wärmeversorgung auf Einzelgebäudeebene in Quartieren und Kommunen abgebildet und verglichen

werden. Diese können genutzt werden, um die Entscheidungsfindung und Umsetzung von konkreten Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen Vor-Ort zu beschleunigen.

Literaturverzeichnis

- [1] AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAITRISE DE L'ENERGIE: Le besoins d'eau chaude sanitaire en habitat individuel et collectif. 2016. – Forschungsbericht
- [2] AGUGIARO, Giorgio: Energy planning tools and CityGML-based 3D virtual city models: experiences from Trento (Italy). In: *Applied Geomatics* (2015). <http://dx.doi.org/10.1007/s12518-015-0163-2>. – DOI 10.1007/s12518-015-0163-2
- [3] AHMAD, Muhammad W. ; MOURSHED, Monjur ; YUCE, Baris ; REZGUI, Yacine: Computational intelligence techniques for HVAC systems: A review. In: *Building Simulation* 9 (2016), Nr. 4, S. 359–398. <http://dx.doi.org/10.1007/s12273-016-0285-4>. – DOI 10.1007/s12273-016-0285-4. – ISSN 19968744
- [4] AHMED, Kaiser ; PYLSY, Petri ; KURNITSKI, Jarek: Monthly domestic hot water profiles for energy calculation in Finnish apartment buildings. In: *Energy and Buildings* (2015), S. 77–85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.051>. – DOI 10.1016/j.enbuild.2015.03.051
- [5] AHMED, Kaiser ; PYLSY, Petri ; KURNITSKI, Jarek: Hourly consumption profiles of domestic hot water for different occupant groups in dwellings. In: *Solar Energy* 137 (2016), S. 516–530. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.08.033>. – DOI 10.1016/j.solener.2016.08.033
- [6] ALLEGRINI, Jonas ; OREHOUNIG, Kristina ; MAVROMATIDIS, Georgios ; RUESCH, Florian ; DORER, Viktor ; EVINS, Ralph: A review of modeling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52 (2015), S. 1391–1404. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.123>. – DOI 10.1016/j.rser.2015.07.123

- [7] ALMENDROS-JIMÉNEZ, Jesús M. ; BECERRA-TÉRON, Antonio: Analyzing the Tagging Quality of the Spanish OpenStreetMap. In: *ISPRS International Journal of Geo-Information* (2018), Nr. 1, S. 1–26. <http://dx.doi.org/10.3390/ijgi7080323>. – DOI 10.3390/ijgi7080323
- [8] AYDINALP, Merih ; UGURSAL, V. I. ; FUNG, Alan S.: Modeling of the space and domestic hot-water heating energy-consumption in the residential sector using neural networks. In: *Applied Energy* 79 (2004), S. 159–178. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2003.12.006>. – DOI 10.1016/j.apenergy.2003.12.006
- [9] BAHU, J ; KOCH, A ; KREMERS, E ; MURSHED, S M.: TOWARDS A 3D SPATIAL URBAN ENERGY MODELLING APPROACH. II (2013), Nr. November, S. 27–29
- [10] BALZERT, Helmut: *Lehrbuch der Softwaretechnik: Basiskonzepte und Requirements Engineering*. SpringerSpektrum, 2009. – ISBN 978–3827417060
- [11] BAO, Keyu ; PADSALA, Rushikesh ; COORS, Volker ; THRÄN, Daniela ; SCHRÖTER, Bastian: A Method for Assessing Regional Bioenergy Potentials Based on GIS Data and a Dynamic Yield Simulation Model. In: *Energies* 13 (2020), S. 1–24. <http://dx.doi.org/10.3390/en13246488>. – DOI 10.3390/en13246488
- [12] BAO, Keyu ; PADSALA, Rushikesh ; COORS, Volker ; THRÄN, Daniela ; SCHRÖTER, Bastian: GIS-based assessment of regional biomass potentials at the example of two counties in Germany. In: *28th European Biomass Conference and Exhibition Proceedings*, 2020, S. 77–85
- [13] BARNABY, Charles S. ; CRAWLEY, Drury B.: Weather data for building performance simulation. Version: 2011. <http://dx.doi.org/10.4324/9780203891612>. In: *Building Performance Simulating for Design and Operation*. 2011. – DOI 10.4324/9780203891612, S. 37–55
- [14] BAUDO, Alessandro: *PV Self-Consumption Improvement with Storage for the Residential Sector*, Politecnico di Torino, HFT Stuttgart, Masterarbeit, 2014

- [15] BEAUSOLEIL-MORRISON, Ian: An experimental and simulation-based investigation of the performance of small-scale fuel cell and combustion-based cogeneration devices serving residential buildings. A Report of FC+COGEN-SIM: The Simulation of Building-Integrated Fuel Cell and Other C. 2008. – Forschungsbericht. – 70 S.
- [16] BECCALI, M. ; CELLURA, M. ; LO BRANO, V. ; MARVUGLIA, A.: Forecasting daily urban electric load profiles using artificial neural networks. In: *Energy Conversion and Management* 45 (2004), S. 2879–2900. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2004.01.006>. – DOI 10.1016/j.enconman.2004.01.006
- [17] BENNER, Joachim: *CityGML Energy ADE V. 1.0 Specification*. 2018
- [18] BERNAL-AGUSTÍN, José L. ; DUFO-LÓPEZ, Rodolfo: Efficient design of hybrid renewable energy systems using evolutionary algorithms. In: *Energy Conversion and Management* 50 (2009), S. 479–489. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.11.007>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.11.007>
- [19] BEST, Isabelle ; BRAAS, Hagen ; OROZALIEV, Janybek ; JORDAN, Ulrike ; VAJEN, Klaus: Systematic investigation of building energy efficiency standard and hot water preparation systems' influence on the heat load profile of districts. In: *Energy* 197 (2020). <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2020.117169>. – DOI 10.1016/j.energy.2020.117169
- [20] BEST, Robert E. ; FLAGER, Forest ; LEPECH, Michael D.: Modeling and optimization of building mix and energy supply technology for urban districts. In: *Applied Energy* 159 (2015), Nr. 2015, 161–177. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.076>. – DOI 10.1016/j.apenergy.2015.08.076. – ISSN 0306–2619
- [21] BILJECKI, Filip ; LEDOUX, Hugo ; STOTER, Jantien: An improved LOD specification for 3D building models. In: *Computers, Environment and Urban Systems* 59 (2016), S. 25–37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.04.005>. – DOI 10.1016/j.compenvurbsys.2016.04.005

- [22] BILJECKI, Filip ; LEDOUX, Hugo ; STOTER, Jantien: Generating 3D city models without elevation data. In: *Computers, Environment and Urban Systems* 64 (2017), S. 1–18. <http://dx.doi.org/http://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.01.001>. – DOI <http://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.01.001>
- [23] BLESLE, M. ; STEHLE, M. ; BRODECKI, L. ; GROSS, P. ; GRASSL, G. ; REISER, S. ; KARAJAN, J. ; CHRIST, A. ; MÜLLER, E.: Systemanalyse für die städtische Energieplanung mit einem modularen Planungsinstrument - methodische Grundlagen und Fallbeispiele. 2019. – Forschungsbericht
- [24] BOECKL, Benjamin ; KIENBERGER, Thomas: Sizing of PV storage systems for different household types. In: *Journal of Energy Storage* 24 (2019). <http://dx.doi.org/10.1016/J.EST.2019.100763>. – DOI 10.1016/J.EST.2019.100763
- [25] BRAUN, M. R. ; ALTAN, H. ; BECK, S. B.: Using regression analysis to predict the future energy consumption of a supermarket in the UK. In: *Applied Energy* 130 (2014), S. 305–313. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.062>. – DOI 10.1016/j.apenergy.2014.05.062
- [26] BRAUN, Reiner ; WEILER, Verena ; ZIRAK, Maryam ; DOBISCH, Lara ; COORS, Volker ; EICKER, Ursula: Using 3D CityGML Models for Building Simulation Applications at District Level. In: *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation, ICE/ITMC 2018 - Proceedings, 2018*
- [27] BRENNENSTUHL, Marcus ; LUST, Daniel ; PIETRUSCHKA, Dirk ; SCHNEIDER, Dietrich: Demand side management based power-to-heat and power-to-gas optimization strategies for pv and wind self-consumption in a residential building cluster. In: *Energies* 14 (2021). <http://dx.doi.org/10.3390/en14206712>. – DOI 10.3390/en14206712
- [28] BUNDESGESETZBLATT (HRSG.): *Gesetz zur Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften*. 2020

-
- [29] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT; BAU UND REAKTORSICHERHEIT: *Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*. 2016
- [30] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV)*. 2014
- [31] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: *Energieeffizienzstrategie Gebäude*. 2015
- [32] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: *Die Energie der Zukunft. Zweiter Fortschrittsbericht zur Energiewende*. 2019
- [33] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: *Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz - GEG)*. 2020
- [34] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: *Die Energie der Zukunft. 8. Monitoringbericht zur Energiewende - Berichtsjahre 2018 und 2019*. 2021
- [35] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE ; BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT; BAU UND REAKTORSICHERHEIT: *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*. 2010
- [36] BUNDESVERBAND WÄRMEPUMPE E.V.: *Branchenstudie 2018 : Marktanalyse – Szenarien – Handlungsempfehlungen*. 2018
- [37] BUTTELMANN, Maik ; LOHMANN, Boris: Optimierung mit genetischen Algorithmen und eine Anwendung zur Modellreduktion. In: *Automatisierungstechnik* 52 (2004), Nr. 4, S. 151–163. <http://dx.doi.org/10.1524/auto.52.4.151.29416>. – DOI 10.1524/auto.52.4.151.29416
- [38] CAI, Wei ; WEN, Xiaodong ; TU, Qiu ; GUO, Xiujuan: Research on image processing of intelligent building environment based on pattern recognition technology. In: *Journal of Visual Communication and Image Representation* 61

- (2019), S. 141–148. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvcir.2019.03.014>. – DOI 10.1016/j.jvcir.2019.03.014
- [39] CAJOT, S. ; SCHÜLER, N. ; PETER, M. ; KOCH, A. ; MARÉCHAL, F.: Interactive optimization for the planning of urban systems. In: *Energy Procedia* 122 (2017), S. 445–450. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.383>. – DOI 10.1016/j.egypro.2017.07.383. – ISSN 18766102
- [40] CEREZO DAVILA, Carlos ; REINHART, Christoph F. ; BEMIS, Jamie L.: Modeling Boston: A workflow for the efficient generation and maintenance of urban building energy models from existing geospatial datasets. In: *Energy* 117 (2016), S. 237–250. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.057>. – DOI 10.1016/j.energy.2016.10.057
- [41] CHEN, Yixing ; HONG, Tianzhen ; PIETTE, Mary A.: Automatic generation and simulation of urban building energy models based on city datasets for city-scale building retrofit analysis. In: *Applied Energy* 205 (2017), S. 323–335. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.128>. – DOI 10.1016/j.apenergy.2017.07.128
- [42] CITY OF NEW YORK: *Building Code of the City of New York*. 1968
- [43] COFFEY, Brian ; STONE, Andrew ; RUYSEVELT, Paul ; HAVES, Philip: An epidemiological approach to simulation-based analysis of large building stocks. In: *14th International Conference of IBPSA - Building Simulation 2015, BS 2015, Conference Proceedings, 2015*, S. 1916–1923
- [44] COORS, Volker ; BETZ, Matthias ; DUMINIL, Eric: A Concept of Quality Management of 3D City Models Supporting Application-Specific Requirements. In: *PFG - Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science* 88 (2020), S. 3–14. <http://dx.doi.org/10.1007/s41064-020-00094-0>. – DOI 10.1007/s41064-020-00094-0
- [45] CRAWLEY, D. B.: Which weather data should you use for energy simulations of commercial buildings? In: *ASHRAE Transactions* 104 (1998), Nr. 2, S. 498–515. – ISSN 00012505

- [46] CRAWLEY, Drury B. ; PEDERSEN, Curtis O. ; LAWRIE, Linda K. ; WINKELMANN, Frederick C.: EnergyPlus: Energy Simulation Program. In: *ASHRAE JOURNAL* (2000), S. 49–56
- [47] DEPARTMENT OF CITY PLANNING (DCP) NEW YORK CITY: *PLUTO Data Dictionary*. 2020. – 1–67 S. <http://dx.doi.org/10.1049/oap-cired.2017.1227>. <http://dx.doi.org/10.1049/oap-cired.2017.1227>
- [48] DEPARTMENT OF DEVELOPMENT AND PLANNING AT AALBORG UNIVERSITY: *EnergyPLAN | Advanced energy systems analysis computer model*. <https://www.energyplan.eu/>. Version: 2020
- [49] DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR (DENA): *dena GEBÄUDEREPORT 2021- Fokusthemen zum Klimaschutz im Gebäudebereich*. 2021
- [50] DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR NACHHALTIGES BAUEN: *Nachhaltige Quartiere planen und zertifizieren | DGNB System*. <https://www.dgnb-system.de/de/quartiere/index.php>. Version: 2020
- [51] DIE BUNDESREGIERUNG: *Entwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes*. 2021
- [52] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN V 4106-6: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs*. 2003
- [53] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN EN 15978: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode*. 2012
- [54] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN V 18599-10: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten*. 2016
- [55] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN V 18599-2: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs*

- für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen.* 2016
- [56] DOMSCHKE, Wolfgang ; DREXL, Andreas ; KLEIN, Robert ; SCHOLL, Armin: *Einführung in Operations Research.* Springer Berlin Heidelberg, 2015. – ISBN 978–3662482155
- [57] DUFFIE, John A. ; BECKMAN, William A. ; MCGOWAN, Jon: *Solar Engineering of Thermal Processes.* 1985. <http://dx.doi.org/10.1119/1.14178>. <http://dx.doi.org/10.1119/1.14178>
- [58] DUIC, Neven ; STEFANIC, Nedeljko ; LULIC, Zoran ; KRAJACIC, Goran ; PUKSEC, Tomislav ; NOVOSEL, Tomislav: *EU28 fuel prices for 2015, 2030 and 2050.* 2017
- [59] EGGERS, Jan-Bleicke: *Das kommunale Energiesystemmodell KomMod. Konzeption, Implementierung und Anwendung an den Praxisbeispielen Frankfurt am Main und Freiburg-Haslach,* Technische Universität Berlin, Dissertation, 2017
- [60] EICKER, Ursula ; HARTER, Hannes ; WEILER, Verena: Life cycle assessment of buildings and city quarters analysing the influence of different climatic conditions. In: *Proceedings of the 15th IBPSA Conference San Francisco, CA, USA, Aug. 7-9, 2017,* 2017, S. 1304–1310
- [61] EICKER, Ursula ; NOUVEL, Romain ; DUMINIL, Eric ; COORS, Volker: Assessing passive and active solar energy resources in cities using 3D city models. In: *2013 ISES Solar World Congress 57 (2014),* S. 896–905. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.299>. – DOI 10.1016/j.egypro.2014.10.299
- [62] EICKER, Ursula ; SCHUMACHER, Juergen ; WEILER, Verena ; BRAUN, Reiner: On the design of an urban modelling platform and its application for a New York analysis. In: *Proceedings of BS2019: 16th Conference of International Building Performance Simulation Association, Rome, Italy, Sept. 2-4, 2019,* 2019, S. 3508–3515
- [63] EICKER, Ursula ; WEILER, Verena ; SCHUMACHER, Jürgen ; BRAUN, Reiner: On the design of an urban data and modeling platform and its

- application to urban district analyses. In: *Energy and Buildings* 217 (2020). <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109954>. – DOI 10.1016/j.enbuild.2020.109954
- [64] EUROPÄISCHER WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS: *Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Mehr Ehrgeiz für das Klimaziel Europas bis 2030 – In eine klimaneutrale Zukunft zum Wohl der Menschen invest.* 2021. – 1–13 S.
- [65] FETT, Daniel ; NEU, Matthias ; KELES, Dogan ; FICHTNER, Wolf: Self-consumption potentials of existing PV systems in German households. In: *International Conference on the European Energy Market, EEM*, 2018
- [66] FONSECA, Jimeno A. ; NGUYEN, Thuy-an A. ; SCHLUETER, Arno ; MARECHAL, Francois: City Energy Analyst (CEA): Integrated framework for analysis and optimization of building energy systems in neighborhoods and city districts. In: *Energy and Buildings* 113 (2016), 202–226. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.055>. – DOI 10.1016/j.enbuild.2015.11.055. – ISSN 0378–7788
- [67] FORTIN, Felix A. ; DE RAINVILLE, Francois M. ; GARDNER, Marc A. ; PARIZEAU, Marc ; GAGNE, Christian: DEAP: Evolutionary algorithms made easy. In: *Journal of Machine Learning Research* 13 (2012), S. 2171–2175
- [68] FOWLER, Martin: *UML konzentriert*. Addison-Wesley Verlag, 2003. – ISBN 978–3827321268
- [69] FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE: *ENERGIESYSTEM DEUTSCHLAND 2050. Sektor- und Energieträgerübergreifende, modellbasierte, ganzheitliche Untersuchung zur langfristigen Reduktion energiebedingter CO₂-Emissionen durch Energieeffizienz und den Einsatz Erneuerbarer Energien.* 2013
- [70] FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WINDENERGIE UND ENERGIESYSTEMTECHNIK IWES ; FRAUNHOFER INSTITUT FÜR BAUPHYSIK IBP: *Wärmewende 2030.*

Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor. 2017

- [71] FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WINDENERGIE UND ENERGIESYSTEMTECHNIK IWES ; FRAUNHOFER INSTITUT FÜR BAUPHYSIK IBP ; INSTITUT FÜR ENERGIE- UND UMWELTFORSCHUNG ; STIFTUNG UMWELTENERGIERECHT: *INTERAKTION EE-STROM , WÄRME UND VERKEHR Analyse der Interaktion zwischen den Sektoren Strom , auf steigende Anteile fluktuierender Erneuerbarer EE-STROM , WÄRME UND VERKEHR Endbericht.* 2015
- [72] FRAYSSINET, Loïc ; MERLIER, Lucie ; KUZNIK, Frédéric ; HUBERT, Jean-luc ; MILLIEZ, Maya ; ROUX, Jean-Jacques: Modeling the heating and cooling energy demand of urban buildings at city scale. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81 (2018), S. 2318–2327. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.040>. – DOI 10.1016/j.rser.2017.06.040
- [73] FRIJNS, Jos ; HOFMAN, Jan ; NEDERLOF, Maarten: The potential of (waste)water as energy carrier. In: *Energy Conversion and Management* 65 (2013), S. 357–363. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2012.08.023>. – DOI 10.1016/j.enconman.2012.08.023
- [74] FUENTES, Elena ; ARCE, L ; SALOM, Jaume: A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81 (2018), S. 1530–1547. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.229>. – DOI 10.1016/j.rser.2017.05.229
- [75] FUMO, Nelson ; RAJE BISWAS, M. A.: Regression analysis for prediction of residential energy consumption. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 47 (2015), S. 332–343. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.035>. – DOI 10.1016/j.rser.2015.03.035
- [76] GEORGE, Dane ; PEARRE, Nathaniel S. ; SWAN, Lukas G.: High resolution measured domestic hot water consumption of Canadian homes. In: *Energy and Buildings* 109 (2015), S. 304–315. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.067>. – DOI 10.1016/j.enbuild.2015.09.067

- [77] GIRARDIN, Luc ; MARECHAL, François ; DUBUIS, Matthias ; CALAMEDARBELLAY, Nicole ; FAVRAT, Daniel: EnerGis : A geographical information based system for the evaluation of integrated energy conversion systems in urban areas. In: *Energy* 35 (2010), S. 830–840. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2009.08.018>. – DOI 10.1016/j.energy.2009.08.018
- [78] GRÜNIG, Rudolf ; KÜHN, Richard: *Prozess zur Lösung komplexer Entscheidungsprobleme. Ein heuristischer Ansatz*. 5. Auflage. Berlin : Springer Gabler, 2017. – ISBN 9783662530016
- [79] HAKLAY, Mordechai: How good is volunteered geographical information? A comparative study of OpenStreetMap and ordnance survey datasets. In: *Environment and Planning B: Planning and Design* 37 (2010), S. 682–703. <http://dx.doi.org/10.1068/b35097>. – DOI 10.1068/b35097
- [80] HARTER, Hannes ; WEILER, Verena ; EICKER, Ursula: Developing a roadmap for the modernisation of city quarters – Comparing the primary energy demand and greenhouse gas emissions. In: *Building and Environment* 112 (2017), S. 166–176. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.031>. – DOI 10.1016/j.buildenv.2016.11.031
- [81] HAY, John E.: Calculating solar radiation for inclined surfaces: practical approaches. In: *Renewable Energy* 3 (1993), Nr. 4/5
- [82] HERR, Horst: *Tabellenbuch Wärme, Kälte, Klima*. EUROPA-LEHRMITTEL, 2002. – ISBN 3–8085–1732–8
- [83] HERTLE, Hans ; PEHNT, Martin ; GUGEL, Benjamin ; DINGELDEY, Miriam ; MLLER, Kerstin: *Wärmewende in Kommunen Leitfaden für den klimafreundlichen Umbau der Wärmeversorgung*. Heinrich-Böll Stiftung, 2015. – ISBN 9783869281421
- [84] JANK, Reinhard (Hrsg.): *Energy Efficient Communities: Case Studies and Strategic Guidance for Urban Decision Makers (Annex 51). Project Summary Report*. International Energy Agency, 2014
- [85] JENTSCH, Mark F. ; JAMES, Patrick A. B. ; BOURIKAS, Leonidas ; BAHAJ, Abu Bakr S.: Transforming existing weather data for worldwide locations to

- enable energy and building performance simulation under future climates. In: *Renewable Energy* 55 (2013), 514–524. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.049>. – DOI 10.1016/j.renene.2012.12.049. – ISSN 0960–1481
- [86] JORDAN, Ulrike ; VAJEN, Klaus: DHWcalc: Program to generate domestic hot water profiles with statistical means for user defined conditions. In: *ISES Solar World Congress, Orlando (US), 8. - 12.8.2005, CD, 2005*
- [87] JORISSEN, F. ; REYNDERS, G. ; BAETENS, R. ; PICARD, D. ; SAELENS, D. ; HELSEN, L.: Implementation and verification of the ideas building energy simulation library. In: *Journal of Building Performance Simulation* 11 (2018), feb, Nr. 6, 669–688. <http://dx.doi.org/10.1080/19401493.2018.1428361>. – DOI 10.1080/19401493.2018.1428361. – ISSN 19401507
- [88] KARST, Michael: *Grundlagen der Expertensysteme*. Deutscher Universitätsverlag, 1992. – ISBN 978–3–8244–0106–2
- [89] KEIRSTEAD, James ; JENNINGS, Mark ; SIVAKUMAR, Aruna: A review of urban energy system models : Approaches , challenges and opportunities. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012), S. 3847–3866. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.047>. – DOI 10.1016/j.rser.2012.02.047
- [90] KEIRSTEAD, James ; SAMSATLI, Nouri ; SHAH, Nilay: SYNCITY: An Integrated Tool Kit for Urban Energy Systems Modelling. In: *Fifth Urban Research Symposium 2009, 2009*
- [91] KEMMLER, Andreas ; KIRCHNER, Almut ; AUF DER MAUR, Alex ; ESS, Florian ; KREIDELMEYER, Sven ; PIÉGSA, Alexander ; SPILLMANN, Thorsten ; WÜNSCH, Marco ; ZIEGENHAGEN, Inka: *Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050. Dokumentation von Referenzszenario und Szenario mit Klimaschutzprogramm 2030*. 2020
- [92] KNIGHT, Ian ; KREUTZER, Nico ; MANNING, Marianne ; SWINTON, Mike ; RIBBERINK, Hajo: *European and Canadian non-HVAC electric and DHW load*

- profiles for use in simulating the performance of residential cogeneration systems.*
2007
- [93] KOEHLER, Sally ; BETZ, Matthias ; EICKER, Ursula: 15-MINUTE RESOLUTION ON BUILDING LEVEL FOR WHOLE CITY QUARTERS. In: *16th IAEE Conference Ljubljana, 2019*
- [94] KÖHLER, S. ; BETZ, M. ; DUMINIL, E. ; EICKER, U. ; SCHRÖTER, B.: A holistic approach to model electricity loads in cities. In: *NachhaltigkeitsManagement-Forum (2021)*. <http://dx.doi.org/10.1007/s00550-021-00516-6>. – DOI 10.1007/s00550-021-00516-6
- [95] KÖRBER, Nils ; SCHÖNBERGER, Philipp: *Modellbasierte Ermittlung von Effizienzpotenzialen in der optimierten Ausgestaltung der Strom- und Wärmeversorgung von Gebäuden und Quartieren.* 2020
- [96] KOUTROULIS, Eftichios ; KOLOKOTSA, Dionissia ; POTIRAKIS, Antonis ; KALAITZAKIS, Kostas: Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms. In: *Solar Energy* 80 (2006), S. 1072–1088. <http://dx.doi.org/10.1016/J.SOLENER.2005.11.002>. – DOI 10.1016/J.SOLENER.2005.11.002
- [97] KOZIEL, Slawomir (Hrsg.) ; YANG, Xin-She (Hrsg.): *Computational Optimization, Methods and Algorithms.* Springer Berlin Heidelberg, 2011. – ISBN 978-3662520048
- [98] KREDITANSTALT FÜR WIEDERAUFBAU: *Merkblatt Energetische Stadtsanierung - 432 Zuschuss.* 2019
- [99] LAMBRECHT, Klaus ; JUNGSMANN, Uli: *BKI EnEV Navigator 2.* Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH, 2015. – ISBN 978-3-941679-87-0
- [100] LANDESHAUPTSTADT STUTTGART: *Auslobung Internationaler offener städtebaulicher Wettbewerb Rosenstein. Ideen für den neuen Stadtteil.* / Landeshauptstadt Stuttgart. 2018. – Forschungsbericht

- [101] LANDTAG VON BADEN-WÜRTTEMBERG: *Eckpunkte zur Weiterentwicklung des Klimaschutzgesetzes Baden-Württemberg*. 2019
- [102] LI, Qi ; QUAN, Steven J. ; AUGENBROE, Godfried ; YANG, Perry Pei-Ju ; BROWN, Jason: 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, Hyderabad, India, Dec. 7-9, 2015*. Hyderabad, India, 2016, S. 190–198
- [103] LI, Wenliang ; ZHOU, Yuyu ; CETIN, Kristen ; EOM, Jiyong ; WANG, Yu ; CHEN, Gang: Modeling urban building energy use: A review of modeling approaches and procedures. In: *Energy* 141 (2017), S. 2445–2457. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.071>. – DOI 10.1016/j.energy.2017.11.071
- [104] LOGA, Tobias ; STEIN, Britta ; DIEFENBACH, Nikolaus: TABULA building typologies in 20 European countries — Making energy-related features of residential building stocks comparable. In: *Energy and Buildings* 132 (2016), S. 4–12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.094>. – DOI 10.1016/j.enbuild.2016.06.094
- [105] LOGA, Tobias ; STEIN, Britta ; DIEFENBACH, Nikolaus ; BORN, Rolf: *Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden*. Darmstadt : Institut Wohnen und Umwelt (IWU), 2015
- [106] MAINZER, Kai: *Analyse und Optimierung urbaner Energiesysteme*, Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), Dissertation, 2018
- [107] MANCARELLA, Pierluigi: MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models. In: *Energy* 65 (2014), S. 1–17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.041>. – DOI 10.1016/j.energy.2013.10.041. – ISSN 03605442
- [108] MASTRUCCI, Alessio ; BAUME, Olivier ; STAZI, Francesca ; LEOPOLD, Ulrich: Estimating energy savings for the residential building stock of an entire

- city: A GIS-based statistical downscaling approach applied to Rotterdam. In: *Energy and Buildings* 75 (2014), S. 358–367. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.032>. – DOI 10.1016/j.enbuild.2014.02.032
- [109] MORILLE, Benjamin ; LAUZET, Nicolas ; MUSY, Marjorie: SOLENE-microclimate: a tool to evaluate envelopes efficiency on energy consumption at district scale. In: *6th International Building Physics Conference, IBPC 2015* Bd. 78, 2015, S. 1165–1170
- [110] NAGELER, P. ; ZHRER, G. ; HEIMRATH, R. ; MACH, T. ; MAUTHNER, F. ; LEUSBROCK, I.: Novel validated method for GIS based automated dynamic urban building energy simulations. In: *Energy* 139 (2017), S. 142–154. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.151>. – DOI 10.1016/j.energy.2017.07.151
- [111] NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL): *EnergyPlus*. <https://energyplus.net/>. Version: 2020
- [112] NEPLAN AG: *NEPLAN Wärme/Kälte*. <https://www.neplan.ch/nepplanproduct/gaswasserfernwaerme/?lang=de{#}pa>. Version: 2020
- [113] NISSEN, V.: *Einführung in Evolutionäre Algorithmen – Optimierung nach dem Vorbild der Evolution*. Braunschweig, Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 1997. – ISBN 978-3-322-93861-9
- [114] NORKIN, Vladimir I. ; PFLUG, Georg C. ; RUSZCZYŃSKI, Andrzej: A branch and bound method for stochastic global optimization. In: *Mathematical Programming, Series B* 83 (1998), S. 425–450. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02680569>. – DOI 10.1007/bf02680569
- [115] NOUVEL, Romain ; BAHU, Jean-Marie ; KADEN, Robert ; KAEMPF, Jerome ; CIPRIANO, Piergiorgio ; LAUSTER, Moritz ; HAEFELE, Karl-Heinz ; MUNOZ, Esteban ; TOURNAIRE, Olivier ; CASPER, Egbert: Development of the CityGML Application Domain Extension Energy for Urban Energy Simulation. In: *Proceedings of BS2015: 14th Conference of International Building Performance Simulation Association*. Hyderabad, India, 2015

- [116] NOUVEL, Romain ; BRASSEL, Kai-Holger ; BRUSE, Marcel ; DUMINIL, Eric ; COORS, Volker ; EICKER, Ursula ; ROBINSON, Darren: SimStadt, a new workflow-driven urban energy simulation platform for CityGML city models. In: *CISBAT 2015 - September 9-11, 2015 - Lausanne, Switzerland*, 2015, S. 889–894
- [117] NOUVEL, Romain ; KADEN, Roland ; BAHU, Jean M. ; KAEMPF, Jerome ; CIPRIANO, Piergiorgio ; LAUSTER, Moritz ; BENNER, Joachim ; MUNOZ, Esteban ; TOURNAIRE, Olivier ; CASPER, Egbert: Genesis of the CityGML ADE. In: *International Conference Future Buildings Districts Sustainability from Nano to Urban Scale : CISBAT2015*. Lausanne, 2015, S. 931–936
- [118] NOUVEL, Romain ; ZIRAK, Maryam ; DASTAGEERI, Habib ; COORS, Volker ; EICKER, Ursula: Urban energy analysis based on 3D city model for national scale applications. In: *IBPSA Germany Conference, RWTH Aachen, September 2014*, 2014
- [119] NYTSCH-GEUSEN, Christoph ; KAUL, Werner ; WEHAGE, Philipp ; FÄRBER, Michael: Open eQuarter Forschungsbericht Kurzfassung / Universität der Künste Berlin. 2015. – Forschungsbericht
- [120] PASSIVHAUS INSTITUT: *Passivhaus-Projektierungspaket (PHPP)*. <https://passiv.de/de/04{ }phpp/04{ }phpp.htm>. Version: 2020
- [121] PIETRUSCHKA, Dirk (Hrsg.): *Vision 2020 Die Plusenergiegemeinde Wüstenrot*. Fraunhofer IRB Verlag, 2017. – 142 S. – ISBN 9783816795452
- [122] POLLY, Benjamin ; KUTSCHER, Chuck ; MACUMBER, Daniel ; SCHOTT, Marjorie ; PLESS, Shanti ; LIVINGOOD, Bill ; GEET, Otto van: From Zero Energy Buildings to Zero Energy Districts. In: *2016 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings* (2016), S. 1–16
- [123] QUASCHNING, Volker: *Regenerative Energiesysteme*. Hanser, 2013. – ISBN 9–783446–435261
- [124] RAMM, Frederik: *OpenStreetMap Data in Layered GIS Format*. 2019

- [125] RAUSCH, L. ; SIMON, K.-H. ; FRITSCH, U.: GEMIS-2.0: Objektorientierte Energie- und Materialfluß-Bilanzierung zur Berechnung von Umweltbeeinträchtigungen. In: *Informatik für den Umweltschutz*. Springer Berlin Heidelberg, 1993, S. 291–300
- [126] REINHART, Christoph F. ; CEREZO DAVILA, Carlos: Urban building energy modeling - A review of a nascent field. In: *Building and Environment* 97 (2016), S. 196–202. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.001>. – DOI 10.1016/j.buildenv.2015.12.001
- [127] REINHART, Christoph F. ; DOGAN, Timur ; JAKUBIEC, J. A. ; RAKHA, Tarek ; SANG, Andrew: UMI - An urban simulation environment for building energy use, daylighting and walkability. In: *Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, August 26-28, 2013*, S. 476–483
- [128] REMMEN, Peter ; LAUSTER, Moritz ; MANS, Michael ; FUCHS, Marcus ; OSTERHAGE, Tanja ; MÜLLER, Dirk: TEASER: an open tool for urban energy modelling of building stocks. In: *Journal of Building Performance Simulation* 11 (2018), jan, Nr. 1, S. 84–98. <http://dx.doi.org/10.1080/19401493.2017.1283539>. – DOI 10.1080/19401493.2017.1283539. – ISSN 19401507
- [129] ROBINSON, D. ; STONE, A.: A simplified radiosity algorithm for general urban radiation exchange. In: *Building Services Engineering Research and Technology* 4 (2005), S. 271–284. <http://dx.doi.org/10.1191/0143624405bt133oa>. – DOI 10.1191/0143624405bt133oa
- [130] ROBINSON, Darren ; HALDI, F. ; KÄMPF, J. ; LEROUX, P. ; PEREZ, D. ; RASHEED, A. ; WILKE, U.: CITYSIM: Comprehensive Micro-Simulation of Resource Flows for Sustainable Urban Planning. In: *11th International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland, Juli 27-30, 2009* 11 (2009), S. 1083–1090
- [131] ROMERO RODRIGUEZ, Laura ; BRENNENSTUHL, Marcus ; YADACK, Malcolm ; BOCH, Pirmin ; EICKER, Ursula: Heuristic optimization of clusters of heat pumps : A simulation and case study of residential frequency reserve. In: *Applied Energy* 234 (2019), S. 943–958. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.103>. – DOI 10.1016/j.apenergy.2018.09.103

- [132] ROSSKNECHT, Maxim: *Concept and evaluation of heating demand prediction based on 3D city models and the Energy ADE - case study Helsinki*, University of Applied Sciences Stuttgart, Masterarbeit, 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/ijgi9100602>. – DOI 10.3390/ijgi9100602
- [133] SANTIAGO, Juan de ; RODRIGUEZ-VIALON, Osvaldo ; SICRE, Benoit: The generation of domestic hot water load profiles in Swiss residential buildings through statistical predictions. In: *Energy and Buildings* 141 (2017), S. 341–348. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.045>. – DOI 10.1016/j.enbuild.2017.02.045
- [134] SCHUMACHER, Jürgen: *Digitale Simulation regenerativer elektrischer Energieversorgungssysteme*, Universität Oldenburg, Diss., 1991. <http://inseldi.com/fileadmin/insel.eu/diverseDokumente/diss{ }J.Schumacher.pdf>. – 211 S.
- [135] SCHWARZ, Matthias: *Simulation verschiedener Wärmepumpenszenarien für nachhaltige Quartierskonzepte mit INSEL*, Hochschule für Technik Stuttgart, Masterarbeit, 2018
- [136] SEIDL, Martina ; BRANDSTEIDL, Marion ; HUEMER, Christian ; KAPPEL, Gerti: *UML@Classroom - Eine Einführung in die objektorientierte Modellierung*. Heidelberg : dpunkt.verlag, 2012. – ISBN 978–3–89864–776–2
- [137] SELVI, V ; UMARANI, R: Comparative Analysis of Ant Colony and Particle Swarm Optimization Techniques. In: *International Journal of Computer Applications* 5 (2010), S. 1–6
- [138] SHIMODA, Yoshiyuki ; FUJII, Takuro ; MORIKAWA, Takao ; MIZUNO, Minoru: Residential end-use energy simulation at city scale. In: *Building and Environment* 39 (2004), S. 959–967. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.01.020>. – DOI 10.1016/j.buildenv.2004.01.020
- [139] SIG3D – AG QUALITÄT: *Handbuch für die Modellierung von 3D Objekten - Teil 1: Grundlagen (Regeln für valide GML Geometrie-Elemente in CityGML)*. 2014 <https://www.sig3d>.

- de/files/media/downloads/SIG3D/AG-Qualitaet/
201311{ }SIG3D{ }Modellierungshandbuch{ }Teil{ }1.pdf
- [140] SIG3D – AG QUALITÄT: *Handbuch für die Modellierung von 3D Objekten - Teil 2 : Modellierung Gebäude (LoD1 , LoD2 und LoD3)*. 2014 <http://files.sig3d.org/file/ag-qualitaet/201311{ }SIG3D{ }Modellierungshandbuch{ }Teil{ }2.pdf>
- [141] STACHOWIAK, Herbert: *Allgemeine Modelltheorie*. Springer Verlag, 1973. – ISBN 978–3211811061
- [142] STADLER, Alexandra ; NAGEL, Claus ; KÖNIG, Gerhard ; KOLBE, Thomas H.: Making interoperability persistent: A 3D geo database based on CityGML. In: LEE, Jiyeong (Hrsg.) ; ZLATANOVA, Sisi (Hrsg.): *Proceedings of the 3rd International Workshop on 3D Geo-Information, Seoul, Korea. Lecture Notes in Geoinformation & Cartography*, 2009, S. 175–192
- [143] STATISTA: *Wohnfläche je Wohnung in Deutschland nach Bundesländern 2020*. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/70111/umfrage/wohnflaeche-pro-wohnung-je-bundesland-2007/>.
Version: 2020
- [144] STRZALKA, Aneta ; ALAM, Nazmul ; DUMINIL, Eric ; COORS, Volker ; EICKER, Ursula: Large scale integration of photovoltaics in cities. In: *Applied Energy* 93 (2012), S. 413–421. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.033>. – DOI 10.1016/j.apenergy.2011.12.033
- [145] SUMMERFIELD, A. J. ; LOWE, R. J. ; ORESZCZYN, T.: Two models for benchmarking UK domestic delivered energy. In: *Building Research and Information* 38 (2010), S. 12–24. <http://dx.doi.org/10.1080/09613210903399025>. – DOI 10.1080/09613210903399025
- [146] SWAN, Lukas G. ; UGURSAL, V. I.: Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009), Nr. 8, S. 1819–1835. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.033>. – DOI 10.1016/j.rser.2008.09.033.
– ISSN 13640321

- [147] TECHNICAL WORKING GROUP; MAYOR'S OFFICE OF SUSTAINABILITY: *One City Built to Last. Transforming New York City Buildings for a low-carbon Future.* New York City, 2016
- [148] THE UNIVERSITY OF WISCONSIN IN MADISON: *TRNSYS - Official Website.* <https://sel.me.wisc.edu/trnsys/>. Version: 2020
- [149] TU DARMSTADT: *UrbanReNet-Schlussbericht.* 2012. – Forschungsbericht
- [150] UNITED NATIONS: *Paris Agreement.* 2015
- [151] UNIVERSITÄT DER KÜNSTE BERLIN-VPT: *Open eQuarter.* <https://modelica-buildingsystems.de/Open{ }eQuarter/>. Version: 2020
- [152] VAGLIO, Alessio: *Modeling and simulation of grid connection PV system with storage,* Politecnico di Turino, HFT Stuttgart, Masterarbeit, 2014
- [153] VALENTIN SOFTWARE: *T*SOL.* <https://valentin-software.com/produkte/tsol/>. Version: 2020
- [154] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 4710-2: Meteorologische Daten in der technischen Gebäudeausrüstung - Blatt 2: Gradtage.* 2007
- [155] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 2067-1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Blatt 1: Grundlagen und Kostenberechnung.* 2012
- [156] VITEC SOFTWARE: *Netsim Grid Simulation.* <https://www.vitecsoftware.com/en/product-areas/energy/products/netsim-grid-simulation/>. Version: 2020
- [157] VOSSELMAN, George ; DIJKMAN, Sander: 3D Building Model Reconstruction from Point Clouds and Ground Plans. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXIV-3/W4 Annapolis, MD, 22-24 Oct. 2001* (2001), S. 22–24
- [158] WEILER, Verena ; DUMINIL, Eric ; BALBACH, Bodo ; SCHRÖTER, Bastian: An automated simulation environment for heat demand and supply scenarios of city quarters , tested at the example of Mainz , Germany. In: *Proceedings*

of BS2021: 17th Conference of International Building Performance Simulation Association, Brugges, Belgium, Sept. 1-3, 2021, 2021

- [159] WEILER, Verena ; DUMINIL, Eric ; SCHRÖTER, Bastian ; COORS, Volker ; BRÜGGEMANN, Thilo ; BALBACH, Bodo ; GOLL, Laura: Automatisierte Modellierung von Quartierswärmebedarfen auf Basis von 3D-Gebäudemodellen. In: *Euro HEAT&POWER* (2021), S. 2–6
- [160] WEILER, Verena ; EICKER, Ursula: Individual Domestic Hot Water Profiles for Building Simulation at Urban Scale. In: *Proceedings of BS2019: 16th Conference of International Building Performance Simulation Association, Rome, Italy, Sept. 2-4, 2019, 2019*, S. 3341–3346
- [161] WEILER, Verena ; HARTER, Hannes ; EICKER, Ursula: Life cycle assessment of buildings and city quarters comparing demolition and reconstruction with refurbishment. In: *Energy and Buildings* 134 (2017). <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.004>. – DOI 10.1016/j.enbuild.2016.11.004
- [162] WEILER, Verena ; LUST, Daniel ; BRENNENSTUHL, Marcus ; BRASSEL, Kai-Holger ; DUMINIL, Eric ; EICKER, Ursula: Automatic Dimensioning of Energy System Components for Building Cluster Simulation. In: *Applied Energy* 313 (2022). <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118651>. – DOI 10.1016/j.apenergy.2022.118651
- [163] WEILER, Verena ; STAVE, Jonas ; EICKER, Ursula: Renewable energy generation scenarios using 3D urban modeling tools—methodology for heat pump and co-generation systems with case study application. In: *Energies* 12 (2019). <http://dx.doi.org/10.3390/en12030403>. – DOI 10.3390/en12030403
- [164] WEILER, Verena ; STAVE, Jonas L. ; EICKER, Ursula: Assessment of different renewable energy generation scenarios using 3D urban modelling tools. In: *Proceedings of SDEWES 2019, Palermo, 2019*

- [165] WEILER, Verena ; WÜRSTLE, Patrick ; SCHMITT, Andreas ; STAVE, Jonas ; BRAUN, Reiner ; ZIRAK, Maryam ; COORS, Volker ; EICKER, Ursula: Methoden zur Integration von Sachdaten in CityGML Dateien zur Verbesserung der energetischen Analyse von Stadtquartieren und deren Visualisierung. In: *BauSIM 2018*, 2018, S. 374–382
- [166] XU, Xiao ; HU, Weihao ; CAO, Di ; HUANG, Qi ; CHEN, Cong ; CHEN, Zhe: Optimized sizing of a standalone PV-wind-hydropower station with pumped-storage installation hybrid energy system. In: *Renewable Energy* 147 (2020), S. 1418–1431. <http://dx.doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.09.099>. – DOI 10.1016/J.RENENE.2019.09.099
- [167] YAO, Runming ; STEEMERS, Koen: A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK. In: *Energy and Buildings* 37 (2005), S. 663–671. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.09.007>. – DOI 10.1016/j.enbuild.2004.09.007
- [168] YUCE, Baris: *Novel Computational Technique for Determining Depth Using the Bees Algorithm and Blind Image Deconvolution*, Cardiff University, Dissertation, 2012
- [169] ZADOW, Oliver ; LESSER, Amelie: *GemEB - Ein Softwarewerkzeug für den Energienutzungsplan zur Berechnung von Energiebedarfsdichten in Siedlungsgebieten*. 2012
- [170] ZEISBERGER, Jürgen: *Beitrag zur energieeffizienten Trinkwassererwärmung - Messtechnische Untersuchungen zur Bewertung und Optimierung von Trinkwassererwärmungssystemen*, Technische Universität München, Dissertation, 2017
- [171] ZIRAK, Maryam ; WEILER, Verena ; HEIN, Martin ; EICKER, Ursula: Urban models enrichment for energy applications: Challenges in energy simulation using different data sources for building age information. In: *Energy* 190 (2019). <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2019.116292>. – DOI 10.1016/j.energy.2019.116292