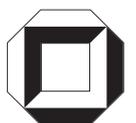


**Hrsg.
Petra von Both
Volker Koch**

2009

Forum Bauinformatik

**23. bis 25. September 2009
Universität Karlsruhe (TH)**



universitätsverlag karlsruhe

Petra von Both, Volker Koch (Hrsg.)

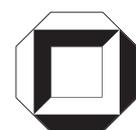
Forum Bauinformatik 2009

23. bis 25. September 2009, Universität Karlsruhe (TH)

Forum Bauinformatik 2009

23. bis 25. September 2009,
Universität Karlsruhe (TH)

(Hrsg.)
Petra von Both,
Volker Koch



universitätsverlag karlsruhe

Impressum

Universitätsverlag Karlsruhe
c/o Universitätsbibliothek
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe
www.uvka.de



Dieses Werk ist unter folgender Creative Commons-Lizenz
lizenziert: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>

Universitätsverlag Karlsruhe 2009
Print on Demand

ISBN: 978-3-86644-396-9

Forum Bauinformatik

1989	Weimar	Lehrstuhl Informatik im Bauwesen Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar
1990	Cottbus	BTU Cottbus
1991	Berlin	Technische Universität Berlin
1992	Bochum	Ruhr-Universität-Bochum
1993	München	Fachgebiet Bauinformatik Technische Universität München
1994	Darmstadt	Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen Technische Hochschule Darmstadt
1995	Hannover	Institut für Bauinformatik Universität Hannover
1996	Cottbus	Lehrstuhl für Bauinformatik BTU Cottbus
1997	Dresden	Lehrstuhl für Computeranwendungen im Bauwesen Technische Universität Dresden
1998	Weimar	Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen Bauhaus-Universität Weimar
1999	Darmstadt	Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen Technische Hochschule Darmstadt
2000	Berlin	Institut für Bauingenieurwesen Theoretische Methoden der Bau- und Verkehrstechnik Technische Universität Berlin
2001	München	Lehrstuhl für Bauinformatik Technische Universität München
2002	Bochum	Lehrstuhl für Ingenieurinformatik im Bauwesen Ruhr-Universität-Bochum
2003	Hannover	Institut für Bauinformatik Universität Hannover
2004	Braunschweig	Institut für Computeranwendungen im Bauingenieurwesen Technische Universität Braunschweig
2005	Cottbus	Lehrstuhl Bauinformatik BTU Cottbus
2006	Weimar	Lehrstuhl Informatik im Bauwesen Bauhaus-Universität Weimar
2007	Graz	Institut für Bauinformatik Technische Universität Graz
2008	Dresden	Institut für Bauinformatik Technische Universität Dresden
2009	Karlsruhe	Institut für Industrielle Bauproduktion Universität Karlsruhe (TH)

Das Forum Bauinformatik 2009 in Karlsruhe wird unterstützt durch:

Autodesk®



RIB

Organisation:
Institut für Industrielle Bauproduktion, Universität Karlsruhe (TH)
Volker Koch, Nicolay Ketterer, Kerstin Schwechheimer

Vorwort

Die Informations- und Kommunikationstechnologien und die auf ihnen basierenden Produkte und Verfahren gehören zu den bestimmenden Wertschöpfungspotenzialen in den heutigen Industrieländern. Ihre effiziente Anwendung ist eine wesentliche Voraussetzung für die Planung, Produktion und Maintenance wirtschaftlicher Güter und darauf aufbauender Dienstleistungen. Mit einem jährlichen Bauvolumen von 251,04 Mrd. €(2008) leistet das Bauen einen großen Beitrag in diesem Bereich, hat aber bedingt durch die besonderen Strukturen im Bauwesen einen ganz spezifischen Bedarf an IT-Unterstützung. Diese besonderen Anforderungen resultieren aus den in der Regel hochkomplexen und oft nur unscharf formulierbaren Problemstellungen, der langen Lebensdauer der Produkte, ihrem Unikatcharakter und der Vielzahl unterschiedlich agierender Akteure in den Planungs- und Ausführungsprozessen. Die möglichen Optimierungspotentiale durch die Bauinformatik sind groß und äußern sich in der Vielfalt der in diesem Band vorgestellten Arbeiten.

Die Beiträge führen dabei den Nachweis, dass sich mit einem konsequenten Einsatz informationstechnischer Werkzeuge und Methoden im Planungs-, Bau- und Nutzungsprozess erhebliche Qualitäts- und Effizienzsteigerungen in Bauwesen erreichen lassen. Neben der IT-gestützten Optimierung planungs- und baubezogener Prozesse führt dabei vor allem die logistische Optimierung der Zusammenarbeit der beteiligten Systeme, Akteure und Prozesse zu einer nachhaltigen Verbesserung der Planungs- und Ausführungsqualität. Speziell die Anwendung integrativer Methoden des Planens und Konstruierens wird durch die Entwicklung innovativer AEC-Systeme entscheidend unterstützt. Gleichzeitig zeigen die diesjährigen Beiträge zum Forum Bauinformatik deutlich, dass die konsistente digitale Beschreibung von Produkten und Prozessen ein zentrales Thema in der Bauinformatik geworden ist und die notwendigen Grundlagen für effiziente Simulationsmodelle, Visualisierungen, Kooperationen und die Prozessunterstützung bereitstellt.

Das Forum Bauinformatik hat sich in diesen Themenbereichen als Diskussionsplattform für junge Wissenschaftler etabliert. Es findet 2009 erstmalig an der Universität Karlsruhe statt.

Petra von Both

Volker Koch

Inhaltsverzeichnis

Simulationsmodelle

Automatisierte Auswertung von Produktionsdaten für den geometrischen und prozessualen Soll-Ist-Vergleich bei dem Verfahren der Pfahlherstellung **1**

Mathias Obergrießer, Andreas Pfäffinger, Thomas Euringer, Hochschule Regensburg
André Borrmann, Technische Universität München

Building Information Model (BIM) basierte, immersive Evakuierungssimulation **13**

Puyan Abolghasemzadeh, Matthias Rätzke, Universität Darmstadt

Heuristische Navigationsalgorithmen für Fußgängersimulationen **25**

Yang Li, Mario Höcker, Leibniz Universität Hannover

Analysis of Energy Simulation Models **37**

Zixiang Cong, Brian Cahill, Karsten Menzel, University College Cork

Kopplung eines numerischen Wellentanks an einen dreidimensionalen LB-Berechnungskern zur Untersuchung von Strömungen mit freien Oberflächen **47**

Christian Janßen, Manfred Krafczyk, Technische Universität Braunschweig

Simulationsbasierte Optimierung von Bauablaufplänen mit Hilfe von Pareto Simulated Annealing **55**

Matthias Hamm, Bauhaus-Universität Weimar

Virtual Climate Chamber – Entwicklung einer interaktiven Simulationsumgebung für thermische Komfortanalysen **67**

Jérôme Frisch, Christoph van Treeck, Technische Universität München

Numerische Methoden

Application of the Gauss-Bonnet Algorithm to the Computation of the Gaussian Curvature of Shells 79

Quanji Cai, Technische Universität München

Nicht-konvexe Abstandsbestimmung und Quadratische Programmierung 93

Norbert Paul, Technische Universität München

Applying Dynamic Load Balancing Techniques to the Parallel p-Version FEM using Nested Dissection 105

Jovana Knežević, Ralf-Peter Mundani, Technische Universität München

Efficient Computation of sparse Saddle-Point Approximations arising from Dual-Primal FETI Discretisation 115

Kai Schrader, Carsten Könke, Bauhaus-Universität Weimar

Visualisierung und Informationsvermittlung

EnOB:Lernnetz – Lernen mit Hilfe von webbasierter Gebäudesimulation 127

Arne Abromeit, Andreas Wagner, Universität Karlsruhe

Entwurf eines Frameworks zur Visualisierung unscharfer Daten 139

Matthias Bode, Wassim Abu Abed, Universität Hannover

Visualisierung von IFC-Objekten mittels Java3D 149

Michael Theiler, Eike Tauscher, Bauhaus-Universität Weimar
Jan Tulke, Hochtief Construction AG,
Thomas Riedel, Bauhaus-Universität Weimar

Interaktive numerische Tragwerksmodellierung am Beispiel eines Aussichtsturms 161

Fabian Gerold, Universität Weimar

Prozess- und Produktmodellierung

- Parametric Modelling Supporting Collaborative Design** 169
Ena Tobin, ZiXiang Cong, University College Cork
- Ein deklarativer Ansatz zur domänenübergreifenden Modellanalyse –
Schnittstellen für den Einsatz domänenspezifischer Sprachen** 179
Ulrich Hartmann, Universität Karlsruhe
- Ein Editor zur Spezifikation, Klassifikation und Kennzeichnung der
Bauteile einer baulichen Anlage** 199
Lukas Olbrich, Technische Universität Berlin
- Integriertes Kommunikations- und Informationsmanagement – Modell
einer kollaborativen Wissensplattform für Hochschulen und
Forschungseinrichtungen** 211
Thilo Brüggemann, Universität Karlsruhe
- Unterstützung der Arbeitsvorbereitung im Baubetrieb durch Prozess-
Simulation** 223
Mikko Börkircher, Rheinkalk GmbH
Gert Zülch, Universität Karlsruhe
- nuBau – Methoden der nutzerorientierten Bausanierung** 237
Jörg Braunes, Bauhaus-Universität Weimar
- Distributed Services – Ein modellbasierter Prozess für das integrierte
Design verteilter Systeme** 247
Arno Schlüter, ETH Zürich
- NURBS-basierte Finite Elemente als Basis für die Integration von
Ingenieuranwendungen** 263
Peter Stein, Bauhaus-Universität Weimar

Daten, Prozesse, Methoden

Wavelet-basierte Kompression von bathymetrischen Geländedaten 275

Christian Asche, Leibniz Universität Hannover

Hybride Prozessoptimierung unter Berücksichtigung geometrischer Nebenbedingungen - am Beispiel der geodätischen Messung 287

Nils Rinke, Felix Hofmann, Leibniz Universität Hannover

Grundwasserstandsprognosen mit Support Vector Regression – Ein Werkzeug zur Bewertbarkeit von Bewirtschaftungsstrategien 299

Peter Göbel, Universität Darmstadt

Mobile Web Service-based Performance Information Model for Real-Time Multi-Site Construction Project Management 311

Quang Le Hanh, Universität Darmstadt

Ausgewählte Ingenieur Anwendungen

Prozessgesteuertes Ressourcenmanagement mit webGIS-Technologien für den operativen Hochwasserschutz 323

Armin Wagenknecht, Universität Darmstadt

Neue Wege bei der Navigation in Gebäuden 335

Thomas Wießflecker, Universität Graz

Wartung und Instandhaltung im anlagentechnischen Brandschutz mittels Indoor-Navigation 347

Kai Marcus Stübbe, Universität Darmstadt

Aspects of Interface Design for Energy Management in Buildings 359

Yue Wang, Paul Stack, Emmanuel Tumwesigye, Karsten Menzel,
University College Cork

**BIM goes Gaming – Integration von Building Information Modeling in
virtuelle Spieleumgebungen** 371

Kristian Schatz, Universität Darmstadt

Automatisierte Auswertung von Produktionsdaten für den geometrischen und prozessualen Soll-Ist-Vergleich bei dem Verfahren der Pfahlherstellung

Mathias Obergriesser, Andreas Pfäffinger, Thomas Euringer

*Hochschule Regensburg, Fakultät Bauingenieurwesen - Fachbereich CAD/
Bauinformatik, 93049 Regensburg, Deutschland, E-mail:
mathias.obergriesser@bau.fh-regensburg.de, Telefon: +49(0)941/9431222*

André Borrmann

*Technische Universität München, Lehrstuhl für Computation in Engineering, 80290
München, Deutschland, E-mail: borrmann@bv.tum.de, Telefon: +49(0)89/28925117*

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird die Entwicklung eines automatisierten Verfahrens zur Auswertung der während der Herstellung von Pfählen gewonnenen Produktionsdaten mit dem Ziel der Generierung von Ist-Modellen und dem Erzeugen eines 4-D-Modells vorgestellt. Ziel ist es, den zeitlichen Prozess- bzw. geometrischen Modellverlauf des Pfahlobjektes automatisiert zu generieren, ggf. Mängel zu identifizieren und die Herstellungsprozessabläufe zu optimieren. Die Umsetzung des Konzeptes erfolgt auf Basis von Produktionsdaten, die während der Pfahl- bzw. CSM-Blockherstellung maschinell aufgenommen werden. Diese Aufzeichnungen werden kontinuierlich und objektweise getätigt, was eine baubegleitende Datenauswertung zu jeder Zeit realisierbar macht. In den Produktionsdaten, die auch als Rohdaten bezeichnet werden, sind material-, maschinen-, zeitspezifische und geometrische Objektinformationen gespeichert. Für die automatisierte Auswertung berücksichtigt das hier vorgestellte Verfahren nur die beiden letztgenannten Informationen. Anschließend wird das reale Modell dem geplanten virtuellen Modell gegenübergestellt und ausgewertet, so dass die hieraus entstandenen Erkenntnisse in Form von Abweichungen, Fehlstellen oder Bauzeitüberschreitungen protokolliert und visualisiert werden. Wie bereits erwähnt, liegt der Schwerpunkt bei diesem Verfahren in der Auswertung von prozessorientierten wirtschaftlichen und technisch-geometrischen Informationen. Durch die separierte Betrachtungsweise der Daten ermöglicht man dem Benutzer einen Nachweis der Einhaltung von vorgegebenen geometrischen Toleranzen durch 3-D-gestützten Soll-Ist-Abgleich sowie eine effizientere Gestaltung der Bauablaufprozesse. Zusätzlich wird eine Grundlage für die rechtssichere Dokumentation von Bauprozessen geschaffen.

Stichworte

Maschinendaten, Pfahlssysteme, automatisierte Auswertung, 4-D-Simulationen, Soll-Ist-Vergleich, Qualitätskontrolle, Prozessoptimierung

1 Einleitung

In vielen Bereichen des Bauingenieurwesens verwendet man täglich Geräte bzw. Baumaschinen, die die Erstellung eines Bauwerks unterstützen oder entsprechend benötigte Arbeitsschritte vorbereiten. Ob im Erdbau für den Aushub einer Baugrube, im Spezialtiefbau für das Abteufen eines Bohrpfahles oder im Schalungsbau zum Versetzen der Gleitschalung [1] ist eine maschinelle Fertigung aus wirtschaftlichen und prozessorientierten Belangen unverzichtbar. Viele Firmen haben darin enormes Potenzial für weitere Optimierungsansätze entdeckt. Zum einen werden Baumaschinen mit GPS-Navigationssystemen [2] ausgestattet, die eine sehr hohe Genauigkeit bei der Fertigung des Straßenoberbaues gewährleisten. Zum anderen können präzise Stahlbauteile angefertigt werden durch die Ansteuerung von CNC-Fräsmaschinen mittels CAM-Daten [3] aus dem virtuellen Modell. Maschinen können diese Daten aber nicht nur interpretieren, sondern auch Informationen protokollieren, die während des Erstellungsprozesses entstehen. Konkret bedeutet dies, dass beispielsweise im Erdbau Vibrationswalzen kontinuierlich Informationen über die Anzahl der Überfahrten, Walzfrequenz und Herstellungsdauer sammeln oder Bohrpfahlgeräte Daten aufzeichnen, die eine Aussage über die tatsächliche Geometrie des Pfahles oder der Pfahlherstellungsdauer geben. Ziel ist es, der Baufirma zur Auswertung dieser Daten ein System zur Verfügung zu stellen, das Mängel während der Bauausführung identifiziert, beispielsweise Dichtheiten validiert und Toleranzungenauigkeiten nachweist. Die Entwicklung des Auswertungssystems wird im Rahmen des bayerischen Forschungsverbundes ForBAU am Beispiel der Pfahlherstellung untersucht und in diesem Beitrag vorgestellt.

1.1 Forschungsprojekt

Das Paper präsentiert Ergebnisse, die im Rahmen des Bayerischen Forschungsverbundes „ForBAU - die virtuelle Baustelle“ [4, 5] erzielt wurden. Ziel des Vorhabens ist eine Verbesserung der Planungs- und Ausführungsprozesse von Bauprojekten durch Schaffung eines umfassenden digitalen Baustellenmodells einschließlich aller dort

ablaufenden Prozesse. Die Verwendung eines 4-D-Baustellenmodells während der Ausführungsplanung erlaubt die Simulation der Bauabläufe vor Baubeginn und damit eine präzise Planung der Abläufe sowie die frühzeitige Identifizierung von möglichen Engstellen. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt liegt in der Modellintegration von Ist-Daten, die während eines Bauprozesses auftreten. Hierzu werden Methoden für die automatisierte Erfassung des Baufortschritts untersucht. Zum einen wertet man hierfür maschinell erstellte Produktionsdaten aus und zum anderen werden moderne Vermessungsverfahren, wie das terrestrische oder luftgestützte Laserscanning, für die Ist-Modellbildung eingesetzt. Die hieraus gewonnenen Informationen geben dem Baustellenmanagement einen präzisen Überblick über den aktuellen Stand der Baustelle. Eine Verwaltung der Daten wird mit Hilfe eines PDM/PLM- Systems aus der Maschinenbaubranche verwirklicht [6, 7].



Abb. 1: „ForBAU – virtuelle Baustelle“. ¹

2 Grundlagen

2.1 Pfahlherstellungsverfahren

Das entwickelte Verfahren wird zusammen mit einem Industriepartner des Forschungsprojektes ForBAU umgesetzt, der entsprechende maschinell erstellte *Produktionsdaten* zur Verfügung stellt. Das entwickelte Konzept wird an zwei verschiedenen Pfahlherstellungssystemen validiert und gewährleistet somit eine

¹ Design: www.ediundsepp.de.

eindeutige Aussage über die Eignung und Einsatzfähigkeit des automatisierten Auswertungsverfahrens. Untersuchungen erfolgen an Produktionsdaten, die während der Herstellung einer überschnittenen Bohrpfahlwand bzw. einer CSM-Blockkonstruktion aufgezeichnet wurden.

1.2.1 Bohrpfahlverfahren

Bei der zuerst untersuchten Herstellungsmethode handelt es sich um ein konventionelles Verfahren, das Bohrpfähle mit Hilfe eines Bohrpfahlgerätes erstellt. Im ersten Schritt wird hierfür die Maschine an einer vorgefertigten Bohrschablone, welche die Positionierung des Stützbauwerkes festlegt, platziert. Anschließend erfolgt die Herstellung des Bohrloches, indem der anstehende Baugrund mittels einer Endlos-schnecke, Kellystange oder einem ähnlichen Verfahren [8] an die Oberfläche gefördert wird. Ob das Bohrloch verrohrt oder unverrohrt abgeteuft werden muss, ist von der Stabilität des zu fördernden Baugrundes abhängig. Nach Fertigstellung der Bohrung wird ein Stahlbetonkorb eingesetzt und mit Beton vergossen. Während des gesamten Bohrprozesses werden stetig *Produktionsdaten* von der Maschine aufgezeichnet bzw. grundlegende Daten vom Geräteführer eingetragen. Der manuelle Eingriff erfolgt z.B. für den Eintrag von objektspezifischen Informationen (Pfahlnummer, Baustelle) vor Baubeginn oder während Ausfalls- und Stillstandzeiten der Maschine. Die geometrischen Abmaße eines Bohrpfahls setzen sich aus einem *runden Querschnitt* mit einem Durchmesser bis zu 2,5m und einer maximalen *Pfahllänge* von ca. 100m zusammen. Das Verfahren wird vor allem als Baugrubenverbau oder als Gründungsvariante für den Abtrag von hohen Lasten in den Baugrund eingesetzt.

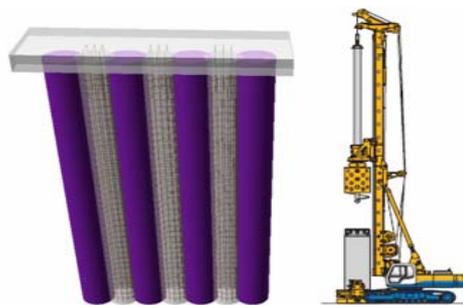


Abb. 2 : 3-D-Bohrpfähle mit Bohrgerät.

2.1.1 CSM-Blockkonstruktion

Im zweite Verfahren wird mit Hilfe des CSM-Verfahrens (*Cutter Soil Mixing*), eine Blockkonstruktion bzw. die einzelnen Panels des Blockes (drei Panels entsprechen einem Block) hergestellt. Ursprünglich wurde dieses Verfahren für die Erstellung von Schlitzwänden entwickelt. Hierbei wird ein rechteckförmiges Objekt mit Hilfe einer Schlitzwandfräse in den Baugrund abgeteuft und während des Fräsprozesses durch eine von außen hinzu geführte Stützflüssigkeit (Bentonit-Suspensionen o. Ä.) stabilisiert [9]. Dieses Verfahren ermöglicht die Herstellung eines länglich verlaufenden geotechnischen Stützbauwerkes, das als Schlitzwand bezeichnet wird. Mit Hilfe des sogenannten Pilgerschrittverfahrens², bei der jedes zweite Panel erst nach der Vollendung des vorherigen und des nachfolgenden Panels erstellt wird, kann z.B. eine Herstellung einer wasserdichten Konstruktion gewährleistet werden. Mit diesen Verfahren lassen sich aber nicht nur *linienhafte* sondern auch *flächendeckende* Stützbauwerke (vgl. Abb. 3) abwickeln. Ein Anwendungsfall für ein flächiges Stützbauwerk wäre z.B. die Erstellung einer Dicht-Blockkonstruktion in einem hydrologisch belasteten Baugebiet. Die Aufzeichnung der Produktionsdaten erfolgt analog zum Schema des Bohrpfahlverfahrens (Kap.2.1.1). Das Panel selbst ist ein quaderförmiges Objekt mit einem rechteckigen Grundriss von ca. 1,0m x 2,8m. Diese Maße sind aber von dem eingesetzten Gerät und von der täglich zu erbringenden Bauleistung abhängig.



Abb. 3: 3D-Blockkonstruktion mit Fräsgerät.

² Alternierendes Erstellen der Objekte

2.2 Produktionsdaten

2.2.1 Maschinendaten

Die von den Maschinen aufgezeichneten Daten beinhalten *materialspezifische*, *maschinenspezifische*, *zeitspezifische* und *geometrische* Informationen. Mit Hilfe der materialspezifischen Daten, die Informationen über die Menge, das Material, die Viskosität, dem Suspensionsdruck usw. beinhalten, ist es möglich, auf den tatsächlich vorhandenen Massenverbrauch rückzuschließen. Öldruck, Temperatur, Drehmoment, Drehzahl und Drehrichtung sind einige Elemente, die den maschinenspezifischen Daten zugeordnet werden. Aus den Informationen über das Drehmoment, der Drehzahl und dem Anpressdruck der Maschine lassen sich Rückschlüsse auf den anstehenden Baugrund, speziell auf dessen Schichtwechsel [10], schließen. Aber aufgrund der speziellen Anforderungen an die Maschinenausstattung, die für eine zuverlässigere Aussage über dem Baugrund nötig wären, findet dieser Ansatz vorerst keine Berücksichtigung in dem vorgestellten Konzept. Zeitliche Daten, die in Form von Herstellungsende, Herstellungszeit, Vorschubgeschwindigkeit, Pause Start/Ende usw. vorliegen, bilden die Basis für die Simulation des Baufortschrittes. Informationen wie Tiefe, Breite, Durchmesser, Neigungen etc. spiegeln die Geometrie des erstellten Pfahl- bzw. des Blockobjektes wieder und geben Rückschlüsse auf dessen Abweichungen, die in Form von einer Übersetzung und/oder einer Rotation auftreten können. Mit Hilfe dieser Daten kann eine Modellierung des tatsächlich gebauten Stützbauwerkes vorgenommen werden, ohne dabei das Bauwerk selbst im Erdreich freizulegen. Das in diesem Paper vorgestellte Verfahren konzentriert sich besonders auf die Auswertung der *zeitlichen* und *geometrischen* Informationen, welche in Abschnitt 3 genauer beschrieben werden.

2.2.2 Georeferenzierte Daten

Leider beinhalten die Produktionsdaten nicht alle Informationen, die für eine automatisierte Auswertung notwendig wären. Besonders die Tatsache, dass die Daten keine Aussage über die Positionierung des Objektes liefern, erfordert eine gesonderte Ermittlung von *georeferenzierten Daten*. In Absprache mit der Baufirma werden diese Informationen mit Hilfe einer tachymetrischen Vermessung ermittelt. Im ersten Schritt wird hierzu ein Tachymeter im Baufeld aufgestellt und eingemessen, wodurch eine Kalibrierung der Vermessungsdaten gewährleistet werden kann. Anschließend wird der Bohr- bzw. Fräskopf der Maschine in verschiedenen Punkten vermessen (vgl. Abb. 4)

und liefert eine Aussage über die Verdrehung, Neigung und globale Positionierung (*Gauß-Krüger-Koordinaten*) des Gerätes. Eine Vermessung des Gerätes vor und nach der Bauwerkserstellung gibt Auskunft über die Anfangs- und Endpositionierung des Objekts. Mit Hilfe dieser Ergebnisse aus der Verdrehungs- und Neigungsmessung können Fehler, die durch die maschinenbezogene Schiefstellung entstehen, aus den Produktionsdaten herausgerechnet werden. Die Vermessungsdaten werden für jedes Objekt ermittelt und mittels Bluetooth oder einer Speicherkarte an die Bauleitung übermittelt.

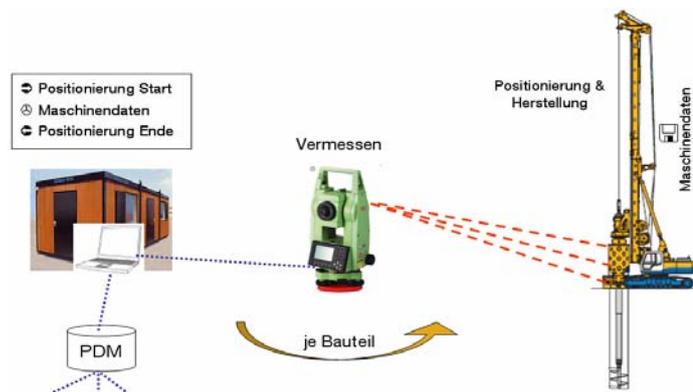


Abb. 4: Tachymetrisches Vermessungskonzept.

3 Umsetzung des automatisierten Auswertungsverfahrens

Ziele bei der Entwicklung des Auswertungsverfahrens sind sowohl die automatisierte Generierung eines Ist-Modells einschließlich einer Qualitätsprüfung des Objekts als auch die Simulation des täglichen Baufortschrittes. Realisiert wurden diese Ziele durch Entwicklung einer Schnittstelle in einem CAD-System, welches die Daten interpretierte, auswertete und an weitere Systeme übergab. Aufgrund der Tatsache, dass für die Auswertung verschiedene Systeme erforderlich sind, wurde das Verfahren in zwei Bereiche aufgeteilt: Im ersten Schritt wurde das Ist-Modell visualisiert und mit dem Soll-Modell geometrisch verglichen (*geometrische Auswertung*) und im zweiten Schritt eine 4-D-Simulation (*geometrische und zeitliche Auswertung*) unter Berücksichtigung des erstellten 3-D-Ist-Modells gestartet.

3.1 Geometrische Auswertung

Die täglich gesammelten Produktions- und Vermessungsdaten werden aus dem PDM/PLM-System, das Daten während des gesamten Bauwerkslebenszyklus managed, ausgecheckt und anschließend mit Hilfe der CAD-Schnittstelle in AutoCAD interpretiert. Die Verwaltung der Daten wird mit Hilfe eines definierten Datenflussprozesses (Workflow) gesteuert, welches dem User einen ständigen Zugriff auf die aktuellsten Daten von einem beliebigen Standort aus ermöglicht. In der Schnittstelle werden die Produktions- und Vermessungsdaten mit Hilfe einer eindeutigen Kennung (ID) in der Schnittstelle zusammengeführt. Anschließend wird im ersten Schritt der *Startpunkt* des Objektes aus den Vermessungsdaten ermittelt und im System eingetragen (vgl. Abb. 5, 1). Nachfolgend wird der Pfad des Pfahlobjektes, unter Berücksichtigung der maschinellen Schiefstellungen, aus den Produktionsdaten interpretiert (vgl. Abb. 5, 2) und die Position des *Endpunktes* festgelegt.

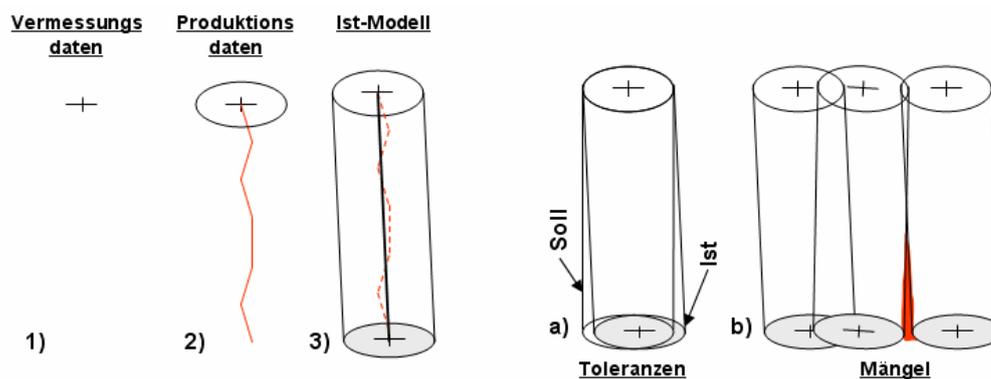


Abb. 5: Ist-Modell Generierung mit Modelluntersuchungen.

Mit Hilfe der Körpergeometrie, die aus einem Zylinder oder einem Quader bestehen kann, wird der Volumenkörper *linearisiert* zwischen den Anfangs- und Endpunkt modelliert (vgl. Abb. 5, 3). Diese vereinfachende Annahme wird bis etwa November 2009 auf einer Demo-Baustelle validiert und gegebenenfalls mit einem polygonalen Ansatz verbessert. Im nächsten Schritt wird das Soll-Modell eingeblendet und dem Ist-Modell gegenübergestellt. Hierbei wird untersucht, inwieweit sich das erstellte Bauwerk im Rahmen der vorgeschriebenen *Toleranzen* bewegt (vgl. Abb. 5a) und ob geometrische *Mängel* wie z.B. Fehlstellen zwischen den einzelnen Objekten bestehen (vgl. Abb. 5b). Für die Identifizierung der Toleranzen bzw. der Mängel werden die Objekte mit Hilfe

einer Vielzahl von *Ebenen* automatisiert geschnitten und anschließend analysiert. Hierzu wird eine Schar von Linien über die Schnittebene rasterförmig angeordnet und mit den 2-D-Körperelementen erneut verschnitten. Durch eine Analyse der Schnittpunkte kann auf die Abweichung des Objekts rückgeschlossen werden (vgl. Abb. 6). Die Ergebnisse werden in einer Liste protokolliert und Mängel im System farblich visualisiert.

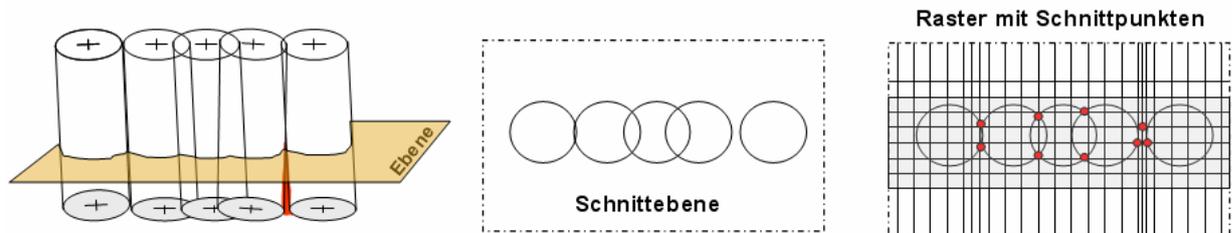


Abb. 6: Geometrisches Auswertungsschema.

3.2 Geometrische zeitliche Auswertung

Die Auswertung der geometrischen und zeitlichen Informationen ermöglicht die Simulation der Herstellungsprozesse. Grundlage für diese Art der Auswertung bildet einen *Ist-Bauzeitenplan* der sich aus den zeitlichen Informationen, die in den Produktionsdaten beinhaltet sind, ableiten lässt. Für die automatisierte Generierung des *Ist-Bauzeitplans* wurde eine Schnittstelle zu einer Projektmanagement-Software („MS Project“) entwickelt, welches den Bauprozess in Form eines Balkendiagramms darstellt. Die Umsetzung des Vorganges läuft -wie bereits im Kap.3.1 beschrieben- parallel zur geometrischen Auswertung. Im nächsten Schritt wird der Bauzeitplan zusammen mit dem 3-D-Modell in einer speziellen 4D-Software („NavisWorks“³) zusammengeführt und anschließend eine *4-D-Simulation* realisiert. Mit Hilfe der 4-D-Simulation und des *Ist-Bauzeitenplans* können Rückschlüsse auf die tägliche Bauleistung, Einhaltung der Baufristen sowie Problemstellen im Prozess und die damit verbundenen Ressourcen- und Kostenoptimierungen erhalten werden. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt in einer visuellen Form, indem man den *Ist- und Soll-Bauzeitenplan* miteinander vergleicht und somit Abweichungen innerhalb der Prozesse identifiziert.

³ führt ein 3-D-Modell und einen Zeitplan zu einem 4-D-Modell zusammen.

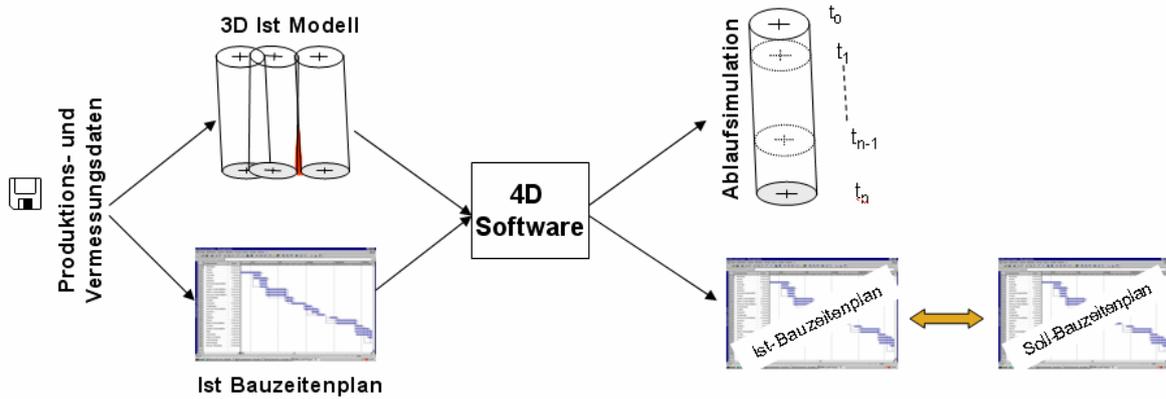


Abb. 7: Geometrisches und zeitliches Auswertungsschema.

4 Ergebnis und Ausblick

Das vorgestellte Verfahren ist ein einfaches Werkzeug, das der ausführenden Firma eine deutliche Verbesserung der Bauausführungsüberwachung insbesondere hinsichtlich der qualitativen Anforderungen ermöglichen kann. Kernpunkt ist es, mit möglichst geringem Mehraufwand einen Nachweis dieser Anforderungen zu erbringen, der eine ordnungs- und fachgemäße Bauwerksausführung dokumentiert und, wenn möglich, rechtssicher belegt. Der Baufirma wird damit ein System zur Verfügung gestellt, das ein Ist-Modell erzeugen, Mängel entdecken und einen Nachweis der sachgemäßen Bauwerksausführung gegenüber den Bauherrn erbringen kann. Durch die geometrische und zeitliche Auswertung der Daten lassen sich Bauprozesse optimieren, Ressourcen besser nutzen und Kosten reduzieren. Das Verfahren wird anhand eines Praxisbeispiels im Rahmen des Forschungsverbundes ForBAU⁴ validiert, um den praktikablen Einsatz nachweisen. In den nächsten Schritten soll das Konzept in den Punkten der Erkennung von Fehlstellen optimiert, der Soll-Ist-Vergleich der Bauzeitenpläne automatisiert, sowie ein Ansatz für die Erkennung eines Schichtwechsels im Baugrund entwickelt werden.

⁴ Die vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Bayerischen Forschungsverbunds ForBAU erzielt, der durch die Bayerische Forschungstiftung gefördert wird.

Literaturverzeichnis

- [1] A. Bühlmann. *Innovation bei leitdrahtlosen 3D Steuersystemen der zweiten Generation im Straßen- und Gleisbau.* 2006.
http://www.baumaschine.de/Portal/BmtTDresden_2006.html?prj=Portal&lang=0
- [2] H. Meyer. *Systeme zur leitdrahtlosen Nivellierung von Straßenfertigern.* <http://www.km.tu-berlin.de/uploads/media/1.pdf>
- [3] J.J. Shah, M. Mäntylä. *Parametric and Feature-Based CAD/CAM- Concepts, Techniques, and Applications.* 1995.
- [4] <http://www.forbau.de>
- [5] A. Borrmann, Y. Ji, M. Obergrießer, C. Klaubert, W. Günthner, and E. Rank. *ForBAU – The Virtual Construction Site Project.* 2009.
- [6] M. Obergrießer, Y. Ji, M. Schorr, K. Lukas, and A. Borrmann. *Einsatzpotenzial kommerzieller PDM/PLM- Softwareprodukte für Ingenieurbauprojekte.* 2008.
- [7] A. Borrmann, M. Schorr, M. Obergrießer, Y. Ji, I-C. Wu, W. Günthner, T. Euringer, and E. Rank. *Using Product Data Management Systems for Civil Engineering Projects. Potentials and Obstacles.* 2009.
- [8] M. J. Seitz. *Bohrpfähle.* 2000.
- [9] T. Triantafyllidis. *Planung und Bauausführung im Spezialtiefbau.* 2003.
- [10] R. Wenger, T. Neidhart. *Die Tragfähigkeit von Verdrängungspfählen in Abhängigkeit von Boden- und Geräteparameter.* 2005.

Building Information Model (BIM) basierte, immersive Evakuierungssimulation

Puyan Abolghasemzadeh, Matthias Rätzke

Technische Universität Darmstadt, Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, 64287 Darmstadt, Deutschland, E-Mail: puyan@iib.tu-darmstadt.de, Telefon: +49(0)6151/163644

Kurzfassung

Diese Forschungsarbeit befasst sich mit der Notwendigkeit des Brandschutzes und seiner aktuellen Entwicklungen in der Bauinformatik. Vor allem wird die Entwicklung der Brandschutzsimulationen und deren Zusammenführung in eine BIM-Plattform thematisiert. Außerdem werden die Schnittstellen des CAD-Programms „Revit“ und die Verwendungsmöglichkeiten des CFD-Simulators FDS beschrieben. Es wird ein Softwarekonzept vorgestellt, das bei der Brandschutzplanung eines öffentlichen Gebäudes eine genaue Entfluchtungsanalyse ermöglicht. Zu der Darstellung der Simulationsergebnisse wird die „Virtual Reality“-Anlage des Instituts für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen verwendet, um eine visuelle Beurteilung für den Brandschutzplaner zu realisieren.

Stichworte

Evakuierung, BIM, Virtual Reality, FDS, Autodesk Revit

1 Einleitung

Die veränderte Sicherheitslage in der Welt nach dem 11. September hat die Notwendigkeit der Planung zur Katastrophenvorbeugung bei öffentlichen Gebäuden und Infrastrukturen gezeigt. Insbesondere öffentliche Gebäude mit hoher Populationsdichte, wie z.B. Flughäfen, Krankenhäuser, Schulen usw., sind in extremen Situationen wie Explosionen oder Brandausbrüchen sehr kritische Fällen. Diese Gefahren können durch technische oder menschlichen Fehler sowie durch geplante Attacken verursacht werden. Nach den Anschlägen auf das World Trade Center in New York City ist ein neues Phänomen auch bei ähnlichen Anschlägen zu erkennen. Ziele solcher Anschläge sind zunehmend

öffentliche Infrastrukturen statt militärische Einrichtungen oder politische Gebäude. Die Madrider Bombenanschläge im März 2004 [1], die Busanschläge im London in Juli 2005 [2] der Anschlag im August 2006 auf den Flughafen Heathrow in Großbritannien [3], die vereitelten Bombenanschläge im August 2006 auf den Zugverkehr in Deutschland [4] und die terroristischen Anschläge im November 2008 auf die Hotel- und Tourismusindustrie in Indien [5] bestätigen diese Hypothese [6].

Aus diesem Grund spielt die Sicherheit der öffentlichen Einrichtungen eine immer größere Rolle in der Gesellschaft. Aufgrund dieser neuen Sicherheitslage haben viele Länder und Regionen neue Regelungen und Maßnahmen insbesondere für brisante Einrichtungen getroffen, um das Gefahrenpotenzial zu reduzieren. Die EU-Maßnahmen für Flüssigkeiten im Handgepäck seit 2005 [7] und zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen für Lufthansa-Passagiere sind nur zwei Beispiele [8].

Die Untersuchungen von Brandschutzmaßnahmen während der Planung von öffentlichen Gebäuden haben daher in den letzten acht Jahren immer mehr zugenommen. Die Rettung und Evakuierung von gefährdeten Personen in extremen Notsituationen, wie Brandausbrüchen in öffentlichen Gebäuden, haben höchste Priorität für die Einsatzkräfte. Um dies optimal zu erreichen, wird ein computerbasiertes Katastrophen- bzw. Entscheidungsmanagement benötigt. Im Grunde genommen ist die Überprüfung von Brandschutzprozessen ein papierbasierter Vorgang, basierend auf vorgegebenen Brandschutzmaßnahmen. In Deutschland werden diese Maßnahmen zum Beispiel in Mustervorschriften und Mustererlassen beschrieben, die vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung vorgegeben worden sind. Um die Umsetzung der Vorschriften sicher zu stellen, muss das Gebäudemodell basierend auf die Übereinstimmung mit der Musterbauverordnung überprüft werden. Außerdem müssen abhängig von der Nutzung des Gebäudes zusätzliche Maßnahmen beachtet werden [9]. In diesem Schritt der Planung sind Computer-Simulationen für den Brandschutzplanungsprozess nicht üblich und werden nur als eine zusätzliche Überprüfung bei der Planung von Sonderbauten mit ungewöhnlichen Architekturen eingesetzt, wie beispielsweise am Flughafen Frankfurt [10] oder beim „LOOP 5“-Einkaufszentrum in Weiterstadt.

Nichtsdestotrotz nimmt wegen der jüngsten Sicherheitsanforderungen an öffentliche Gebäude die Nutzung von Computer-Simulationen für die Überprüfung der Brandschutzentwürfe und Evakuierungsprozesse zu. Das Ziel dieser Simulatoren ist, möglichst realistische Evakuierungsszenarien zu erstellen. Für die Modellierung von verschiedenen Brandschutzparametern in einer Evakuierungssimulation werden viele

verschiedene Computer-Simulatoren verwendet. Die Herausforderung besteht darin, die virtuelle Simulationsumgebung basierend auf geometrischen und materiellen Rahmenbedingungen so umzusetzen, dass die gegenseitigen Auswirkungen verschiedener Parameter (vor allem die menschlichen Faktoren) sowie die Visualisierung der Simulationsergebnisse ermöglicht werden.

Verschiedene Parameter können den Evakuierungsprozess beeinflussen, wie z.B. die Geometrie der Bauteile, die Ausbreitung von Feuer und Rauch innerhalb des Gebäudes, die Standsicherheit von Gebäuden und das daraus resultierende Verhalten der gefährdeten Personen. Jeder dieser Parameter kann mit verschiedenen Computer-Methoden simuliert werden. Die eigentliche Herausforderung besteht darin, aus einer einzigen Schnittstelle die einzelnen erforderlichen Parameter zu verwalten und zu kontrollieren und damit eine realistische Simulation und Visualisierung zu ermöglichen. So werden Brandschutzplaner in der Lage sein, die erforderlichen Simulationsmodelle mit verschiedenen Evakuierungsszenarien durchzuführen und den Sicherheitsfaktor von Gebäuden zu kontrollieren.

Der neue Ansatz in diesem Papier besteht darin, einen geeigneten Weg für die Zusammenführung von Gebäudeinformationsmodellen (BIM) und die verschiedenen Simulationen zu finden, sowie die gegenseitigen Einflüsse zwischen erforderlichen Simulationen (wie die Interaktion zwischen Menschen und ihrer Umwelt) zu realisieren und darüber hinaus eine Visualisierungsmethode präsentieren, die die visuelle Beurteilung sowie virtuelle Schulung von Einsatzkräften ermöglicht.

2 Konzept

Um die Zusammenführung von Gebäudeinformationen und verschiedenen Simulationen zu ermöglichen, soll eine besondere immersive Umgebung basierend auf einer BIM-Plattform entwickelt werden, die alle erforderliche Simulationen durchführen und die Ergebnisse möglichst realitätsnah darstellen kann. Durch diese Integration soll der Brandschutzplaner in der Lage sein, sein Konzept effektiver zu ändern, die Simulationsergebnisse genauer zu bewerten und eine einheitliche Visualisierung für verschiedene Simulationen zu erhalten.

Um dieses Ziel zu erreichen, sollen Simulatoren ausgewählt werden, die die gegenseitigen Auswirkungen der Evakuierungsparameter simulieren können. Diese Simulatoren sollen auch eine Schnittstelle anbieten, die die Integration von Gebäudeinformationsmodellen erlaubt. Schließlich soll die Schnittstelle in der Lage sein,

die Simulationsergebnisse in einer immersiven virtuellen Umgebung darzustellen (siehe Abb. 1).

In den nächsten Kapiteln werden die Details des Konzepts und seine Beziehungen näher erläutert.

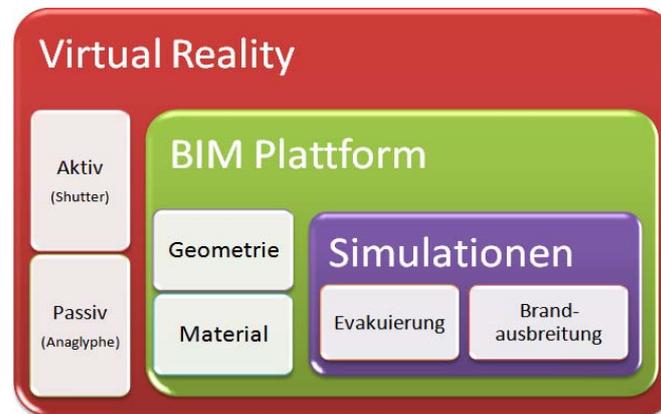


Abb. 1: Immersive Simulationen basierend auf einem Gebäudeinformationsmodell.

3 Building Information Model (BIM)

BIM ist der Prozess der Generierung, Verwaltung und Nutzung von Gebäudedaten während des Lebenszyklus eines Gebäudes [11]. BIM ist ein neues Computer Aided Design (CAD) Paradigma, das intelligente Grafik und die Informationsmodellierungsprogramme nutzt, um optimierte Gebäudeentwürfe zu erstellen. BIM umfasst auch die Verwendung von drei-dimensionalen, intelligenten und dynamischen Modellierung in Echtzeit. BIM ist eine Sammlung von integrierten und interoperablen Informationen, die von allen Mitgliedern des Planungs- und Konstruktionsteams sowie dem Bauherrn oder anderen Subunternehmern während des gesamten Projektablaufs verwendet werden kann [12]

Das benötigte Gebäudemodell für Brand- und Evakuierungssimulationen erfordert Informationen über die Geometrie (z.B. Größe, Form und Position) und auch über Baumaterialien als Randbedingungen. Diese Informationen sind im BIM vorhanden. Deshalb ist es eine gute Überlegung, diese Simulationen in das Gebäudeinformationsmodell (BIM) zu integrieren.

Es gibt unterschiedliche Untersuchungen über die Zusammenführung von BIM mit verschiedenen Simulatoren. Die Lösung, die meist vorgeschlagen wird, ist im Allgemeinen

das Gebäudeinformationsmodell nach einem standardisierten Austauschformat, wie *Green Building XML*, *Industry Foundation Classes (IFC)*, etc. zu exportieren. Das Problem hierbei ist, dass diese Austauschformate nicht alle erforderlichen Informationen aus BIM beinhalten, die ein Brand- und Evakuierungssimulator benötigt. Hinzu kommt, dass diese Austauschformate ständig aktualisiert werden und damit die Export-Tools ständig angepasst werden müssen. Darüber hinaus haben die Benutzer nicht genug Flexibilität. Dies bedeutet, dass bei jeder Veränderung in dem Gebäudeinformationsmodell das Informationsschema neu generiert werden muss. Deshalb kann die Entwicklung einer Schnittstelle innerhalb eines BIM Programms, die direkten Zugriff auf das gesamte Gebäudeinformationsmodell hat und damit die erforderliche Simulationen ausführen kann, eine passende Lösung sein.

Hierfür wird eine BIM-Schnittstelle im Rahmen des ISEE („Immersive Safety Engineering Environment“) entwickelt, die die erforderliche Simulatoren in Autodesk Revit integrieren kann. Die Autodesk Revit-Plattform für BIM ist ein Design- und Dokumentationssystem, das den Entwurf, die Zeichnungen und die Zeitpläne für die relevanten Bauprojekte unterstützen kann [13].

4 Feuersimulation

Die Entwicklung von Brandausbreitung innerhalb des Gebäudes ist ein sehr komplizierter Prozess. Deshalb wird sie in der Regel mit vereinfachten Simulationsmethoden wie zellularen Automaten, Zufallsvariablen etc. simuliert [14]. Es gibt verschiedene Methoden zur Simulation von Feuer- und Rauchausbreitung innerhalb des Gebäudes: Einer der üblichen Wege ist die Simulation auf der Grundlage von numerischen Methoden, wie CFD („Computational Fluid Dynamics“), durchzuführen. Hierfür gibt es einige Simulatoren wie SMARTFIRE, von der Greenwich Universität, oder den „Fire Dynamics Simulator“ (FDS) vom National Institute of Standards and Technology (NIST) in den USA, der auch in diesem Forschungsprojekt verwendet wird.

FDS ist ein *Open Source*-Programm und verwendet eine Form von *Navier-Stokes-Gleichungen* für die Flüssigkeiten mit niedriger Geschwindigkeit. Dieses Tool wurde entwickelt, um eine Lösung für praktische Probleme in Brandschutzplanung zu liefern und auch um die Entwicklung von Feuer- und Rauchausbreitung sowie den Einfluss von Brandschutzelemente besser untersuchen zu können. Außerdem kann dieser Simulator mit einem *Message Passing Interface (MPI)* parallelisiert werden und somit aufwändige Simulationen durchzuführen [15].

4.1 Numerische Methoden

Das Verhalten von Materialien während des Brandes ist normalerweise mit empirischen Korrelationen zu untersuchen. Das Verhalten von Feuer- und Rauchausbreitung ist ähnlich den meteorologischen Strömungen, die von Joseph Smagorinsky im Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (USA) sehr intensiv erforscht wurden [16]. Deshalb kann die Feuer- und Rauchausbreitung als eine turbulente Strömung mit einer hohen Reynolds-Zahl betrachtet werden, die mit *Large Eddy Simulation* (LES) modelliert werden kann. Die Reynolds-Zahl (Re) ist eine dimensionslose Zahl, die ein Maß für das Verhältnis der Trägheitskräfte zu viskosen Kräften repräsentiert.

$$\text{Re} = \frac{\rho v d}{\mu} \quad [1]$$

Die Large Eddy Simulation ist eine Technik zur Lösung von Navier-Stokes-Gleichungen, die die nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen für die Modellierung der turbulenten Strömung verwendet [17].

4.2 Definition der Feuerquelle

Das Feuer kann grundsätzlich als Ausbruch eines gasförmigen Materials aus einer Öffnung oder Oberfläche modelliert werden. Mit dieser Annahme können die meisten Feuerquellen im Gebäude modelliert werden. Verschiedene Feuereigenschaften können in FDS definiert werden, u. a. Brandfläche und die Dicke des brennenden Objektes wie Teppich, Sofa usw. Auch die Wärmefreisetzung pro Flächeneinheit (HRRPUA¹) kann unter FDS festgelegt werden [18]. Außerdem ist es in FDS möglich, einen Ablauf bzw. eine Historie für das Feuer vorzugeben, d.h. eine Abhängigkeit zwischen Zeit und Brandeigenschaften. So kann eine Feuerquelle, wenn nötig, ausbrennen. Außerdem bietet FDS die Möglichkeit, die Entwicklung und die Dichte von Rauch zu definieren.

Die BIM-Schnittstelle, die innerhalb dieser Forschung entwickelt wird, wird neben der Generierung von Bauelementen und Öffnungen, es dem Benutzer ermöglichen, Brandschutzelemente wie Sprinkleranlagen, Brennerdüsen, Wärme- und Rauchmelder zu definieren und die Position der Brandquelle sowie die Simulationszeit festzustellen. Die erforderlichen Gitter und die weiteren benötigten Einstellungen für das FDS-Modell werden automatisch aus der BIM-Schnittstelle generiert.

¹ Heat Release Rate per Unit Area

5 Evakuierungssimulation

RiMEA², eine deutsche Initiative zur Festlegung von Richtlinien für die mikroskopische Evakuierungsanalyse, bestimmt, dass eine Computer-Simulation für den Evakuierungsprozess in der Lage sein soll, die Dauer der Evakuierung aus dem Gebäude zu bestimmen und die Konzeption und Durchführung von Flucht- und Rettungswegen zu untersuchen. Diese Untersuchung soll sich auf eine computergestützte Simulation berufen, in der jede Person individuell modelliert wird. Die Bewegung von Personen und deren Interaktion mit den physischen Hindernissen sollen auf empirischen Studien, Beobachtungen und Bewertungen von ähnlichen Veranstaltungen in Form von vereinfachten mathematischen Regeln mit rekonstruierten Evakuierungsmodellen basieren [19].

Es gibt verschiedene Methoden zur Simulation von Evakuierungsprozessen. Eine der populärsten Simulationsmethoden ist die Simulation auf der Grundlage der Molekulardynamik-Methode durchzuführen, die eine deterministische Methode ist. In der Molekulardynamik-Methode können Atome und Moleküle für einen bestimmten Zeitraum unter physikalischen Bedingungen miteinander interagieren [20].

Verschiedene Simulatoren wurden bereits für die Evakuierungssimulation entwickelt, wie z.B. „MD EXODUS“, der an Greenwich University entstanden ist, oder „FDS+Evac“ von VTT (Technical Research Centre in Finnland), das in diesem Forschungsprojekt verwendet wird. Der Evakuierungssimulator FDS+Evac basiert auf FDS, d.h. es wird die FDS-Engine zum Simulieren der Personenbewegungen und deren wechselseitiger Beeinflussung mit der Umgebung verwendet. Diese Beeinflussungen sind zwischen einzelnen Personen und anderen Gefährdeten (die so genannte *soziale Interaktion*), mit physischen Hindernissen und mit dem Feuer zu erkennen. Die Einflüsse für jede Person und deren Komponenten sind in der folgenden Gleichung angegeben:

$$f_i = \frac{m_i}{\tau_i} (v_i^0 - v_i) + \sum_{j \neq i} (f_{ij}^{soc} + f_{ij}^c + f_{ij}^{att}) + \sum_w (f_{iw}^{soc} + f_{iw}^c) + \sum_k (f_{ik}^{att}) \quad [2]$$

Die Entwicklung der BIM-Schnittstelle ermöglicht es dem Benutzer verschiedene Parameter für eine Evakuierungssimulation mit FDS+Evac vorzugeben. Die wichtigsten von ihnen sind Personen mit ihren Attributen, Türen und Notausgänge.

² Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen/Evakuierungsanalysen

5.1 Personen

In FDS+Evac können Personen in Gruppen zusammengefasst werden. Der Anwender soll in der BIM-Schnittstelle die Möglichkeit haben, neue Gruppen zu definieren und diese jedem Raum zuzuweisen. Bei der Definition der einzelnen Gruppen sollen die folgenden Attribute über die BIM-Schnittstelle angegeben werden können: Zeit bis zur Feuerentdeckung, Reaktionszeit, Geschwindigkeit jeder Person und die ihr bekannten Türen und Ausgänge (siehe Abb. 2).

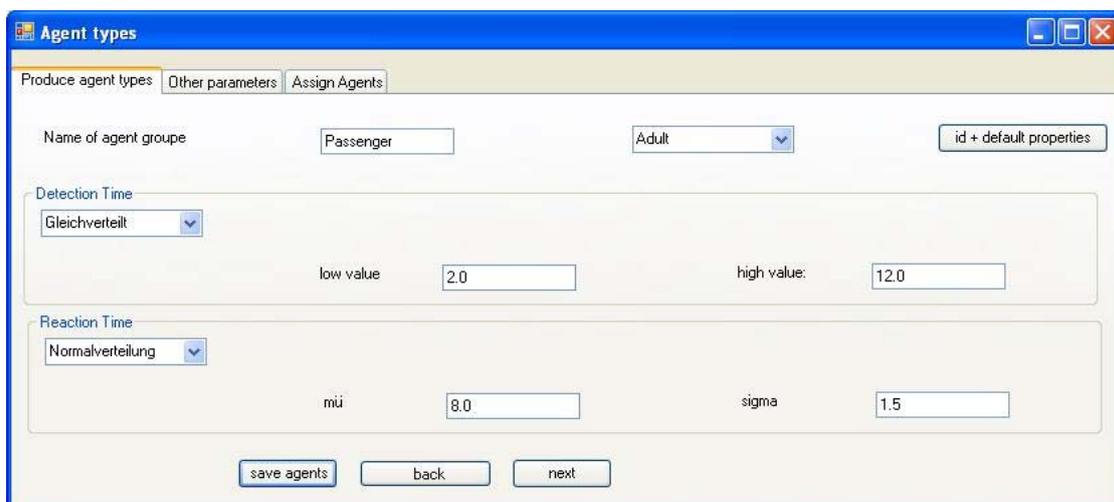


Abb. 2: Definition von Personen für das FDS+Evac Modell in der BIM-Schnittstelle.

5.2 Türen und Notausgänge

Türen und Notausgänge müssen zusätzlich zu dem FDS-Modell definiert werden. Sie sollen nicht nur Löcher in Wänden sein, sondern auch Öffnungen, durch die die Menschen in einem anderen Raum gehen (Türen) oder das Gebäude verlassen können (Ausgänge). So hat der Benutzer explizit zu bestimmen, welche Öffnung im Gebäude eine Tür und welche ein Ausgang ist.

Die erforderlichen Gitter und die anderen erforderlichen Einstellungen für den Aufbau des FDS+Evac-Modells werden automatisch aus der BIM-Schnittstelle generiert.

6 Visualisierung

6.1 2-D-Visualisierung

Es gibt verschiedene Methoden für die Visualisierung einer computergestützten Simulation. Die einfachste davon ist die 2-D-Visualisierung, d.h. Objekte werden in einer Ebene dargestellt. Diese Visualisierungsmethode kann relativ schnell erzeugt werden. Sie hat geringe Hardware-Kosten und findet eine große Anwendung bei mobilen Endgeräten. Aber sie ist kein nützliches Instrument um eine Evakuierungssimulation für die Brandschutzplanung abzubilden, weil es nicht in der Lage ist genau zu zeigen, wie ein 3-D-Objekt im Raum platziert ist. Darüber hinaus kann es nicht darstellen wie der Rauch die Sehkraft der Menschen beeinflusst oder wie die Ausbreitung von Rauch und Flammen in vertikaler Richtung ist.

6.2 3-D-Visualisierung

Eine weitere Methode ist die 3-D-Visualisierung, die die 3-D-Objekte und die Intensität von Rauch sowie dreidimensionale Bewegungen darstellen kann. Diese Methode ist sehr beliebt bei der Darstellung der Ergebnisse der Simulationsmodelle, die drei-dimensionale Objekte und Bewegungen enthalten, wie Feuer- und Evakuierungssimulationen. Dennoch sollte nicht vergessen werden, dass, obwohl diese Visualisierungsmethode 3-D-Objekte hat, sie auf eine zweidimensionalen Projektion beschränkt ist, d.h. der Benutzer sieht eine 3-D-Umgebung, hat aber kein immersives Gefühl.

6.3 Immersion in Virtual Reality

Die immersive Visualisierungsmethode mit Virtual Reality (VR) macht es für den Beobachter möglich, in eine virtuelle Umgebung einzutauchen. Mit dieser Visualisierungsmethode wird es einfacher und sinnvoller für einen Brandschutzplaner, den Evakuierungsprozess und die Entwicklung von Feuer und Rauch innerhalb von Gebäuden zu untersuchen, anstatt gefährliche und teure Tests in einer realen Umgebung auszuführen [21]. Die VR-Technologie kann nicht nur für die Brandschutzplanung verwendet werden, sondern kann auch Rettungskräften die Möglichkeit geben, Noträumungsübungen virtuell durchzuführen und zu bewerten [22].

Mit den VR-Technologien bekommt jedes Auge einen passenden Blick auf das 3-D-Objekt. Die VR-Technologien produzieren die passenden Bilder für das linke und das

rechte Auge und liefern sie zu dem jeweiligen Auge. Wenn diese zwei (Stereo-) Bilder geeignet erstellt werden, wird das Gehirn des Beobachters eine echte dreidimensionale Sicht rekonstruieren und ihm ein immersives Gefühl geben [23].

Es gibt verschiedene Methoden für die stereoskopische Darstellung. Ein Weg zur stereoskopischen Darstellung ist Nutzung von *LCD-Shutter-Brillen* (aktives Stereo). Bei dem aktiven Stereo verdunkelt die Shutter-Brille abwechselnd das linke und rechte Auge hintereinander und dieser Wechsel ist mit dem Bildschirm synchronisiert, so dass das linke und rechte Auge die jeweils passenden Bilder sehen können.

Als Alternative wenden viele Systeme passive stereoskopische Techniken an, die eine weniger immersive Wirkung im Vergleich zur aktiven Methode haben, aber es ist billiger und portabel. Beim passiven Stereo werden die Bilder an das linke und rechte Auge gleichzeitig übertragen. Die Zuschauer müssen besondere Filterbrillen tragen, die die entsprechenden Bilder für jedes Auge erlauben. Die beiden üblichen passiven Methoden sind Anaglyphen (rot-blau) und Polarisierung.

Das Darmstadt Civil, Environmental and Safety Engineering Lab (CES-Lab) am IIB-Institut kann beide oben genannten stereoskopischen Methoden (aktiv und passiv) ausführen, so dass die Untersuchung der Evakuierungssimulation in einer immersiven Umgebung möglich ist.

Verschiedene Software-Tools können die Simulationsergebnisse in der VR darstellen, z.B. „SmokeView“, das am NIST entworfen ist, oder Autodesk „NavisWorks“. Dieses Forschungsprojekt benutzt das Software-Tool SmokeView, weil es sich um ein *Open Source*-Programm handelt und es eine gute Verbindung zu FDS sowie eine Möglichkeit zur Verwendung beider VR-Technologien anbietet. SmokeView kann, wenn die Evakuierungssimulation beendet ist, wie ein externes Programm direkt aus der BIM-Schnittstelle heraus gestartet werden.

7 Zusammenfassung

Aufgrund der derzeitigen Sicherheitslage an öffentlichen Gebäuden ist die Nutzung von Computer-Simulatoren zur Untersuchung von Brandschutzplänen und Evakuierungsprozessen steigend. Das Ziel dieser Simulatoren ist eine realitätsnahe Feuer- und Evakuierungssimulation. Die Herausforderung besteht darin, erstens die virtuelle Simulationsumgebung basierend auf geometrischen und materiellen Rahmenbedingungen zu modellieren, zweitens die gegenseitige Wirkung unter den verschiedenen Parametern zu beachten und drittens eine realistische Darstellung der Simulationsergebnisse zu

bekommen. Zur Erfüllung dieser Aufgabe soll die BIM-ISEE-Schnittstelle alle erforderlichen Simulationen integrieren und in der Lage sein, eine immersive Ausgabe zu liefern. Die neue Schnittstelle wird den FDS-Simulator für Feuer- und Evakuierungssimulation in Autodesk Revit integrieren und wird die Simulationsergebnisse in einer immersiven virtuellen Umgebung darstellen (*CES-Lab*). Durch die Entwicklung der BIM-ISEE-Schnittstelle wird der Brandschutzplaner in der Lage sein, realistische Visualisierungen in der immersiven Umgebung durchzuführen, sein Konzept besser zu modifizieren, die Simulationsergebnisse genauer auszuwerten und sie zu visualisieren. Es wird auch den Rettungskräften die Möglichkeit gegeben, Noträumungsübungen durchzuführen und zu bewerten.

Literaturverzeichnis

- [1] BBC Report. *Madrid Train Attacks in March 2004*. http://news.bbc.co.uk/2/hi/in_depth/europe/2004/madrid_train_attacks/default.stm
- [2] BBC Report. *London Bus Attacks in July 2005*. <http://news.bbc.co.uk/1/hi/uk/6752991.stm>
- [3] BBC Report, *Thwarted Attacks at Heathrow in UK in August 2006*. <http://news.bbc.co.uk/1/hi/uk/3537462.stm>
- [4] Der Generalbundesanwalt beim Bundesgerichtshof. *Fehlgeschlagene Anschläge auf Regionalzüge in Dortmund und Koblenz*. <http://www.generalbundesanwalt.de/de/showpress.php?newsid=256>
- [5] BBC Report. *Mumbai Terrorist Attacks on Indian Hotel and Tourist Industry*. http://news.bbc.co.uk/1/hi/in_depth/south_asia/2008/mumbai_attacks/default.stm
- [6] P. Abolghasemzadeh. *Immersive Ingenieurmethoden für Katastrophenmanagement im Falle eines Brandes in öffentlichen Infrastrukturen*. *Forum Bauinformatik*. 2008.
- [7] EU liquid regulations in 2005. <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=MEMO/06/363&format=HTML&aged=0&language=EN&quiLanguage=en>
- [8] Welt.de. *Handgepäck. Zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen*. http://www.welt.de/reise/article147039/Handgepaeck_Zusaetzliche_Sicherheitsmassnahmen.html
- [9] Informationssystem der Bauministerkonferenz, Mustervorschriften und Mustererlasse. <http://www.is-argebau.de/asp/hauptframe.asp?id=991&sid=&mn=Bauministerkonferenz&mr=&n=3DAO3DFO&e=0>

- [10] FLUENT Website. *Smoke Management at Frankfurt Airport*. <http://www.fluent.com/about/news/newsletters/02v11i1/a13.htm>
- [11] G. Lee, R. Sacks, and C.M. Eastman. *Specifying Parametric Building Object Behavior (BOB) for a Building Information Modeling System*. In: *Automation in Construction*. Vol. 15. 2006.
- [12] G.V.R. Holness. *Building Information Modeling. Gaining Momentum*. In: *ASHRAE Journal*. Vol.50. 2008.
- [13] Revit Architecture Metric Tutorials. <http://revit.downloads.autodesk.com/download/2008/Documents/ENU/TutorialsBuildingMetENU.pdf>
- [14] E. Freund, J. Rossmann, and A. Bucken. *Fire Training in a Virtual-Reality Environment*. In: *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XII*. Vol. 5664. 2005.
- [15] National Institute of Standards and Technology (NIST), USA. http://fds-smv.googlecode.com/svn/trunk/FDS/trunk/Manuals/All_PDF_Files/FDS_5_User_Guide.pdf
- [16] Wikipedia Website. Joseph Smagorinsky. http://en.wikipedia.org/wiki/Joseph_Smagorinsky
- [17] C.H. Moeng, *A Large-Eddy Simulation Model for the Study of Planetary Boundary-Layer Turbulence*. 1984.
- [18] USA Forest Products Laboratory Website. Heat Release Rate of Wood-Plastic Composites, <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1997/stark97a.pdf>
- [19] N. Waldau. *RiMEA-Richtlinie für mikroskopische Entfluchtungsanalysen/Evakuierungsanalysen, Brandschutz-Fachtagung*, 2005.
- [20] G. Sutmann. *Classical Molecular Dynamics. Quantum Simulations of Complex Many-Body Systems. From Theory to Algorithms*. 2002.
- [21] R. Bukowski and C. Sequin. *Interactive Simulation of Fire in Virtual Building Environments*. 1997.
- [22] A. Ren, C. Chen, J. Shi, and L. Zou. *Application of Virtual Reality Technology to Evacuation Simulation in Fire Disaster*. 2006.
- [23] J.M. Zelle and C. Figura. *Simple, Low-Cost Stereographics. VR for Everyone*. In: *ACM SIGCSE Bulletin*. Vol. 36. 2004.

Heuristische Navigationsalgorithmen für Fußgängersimulationen

Yang Li, Mario Höcker

Leibniz Universität Hannover, Institut für Bauinformatik, 30167 Hannover, Deutschland, E-mail: yangli@bauinf.uni-hannover.de, Telefon: +49(0)511/7624289

Kurzfassung

Bauliche Anlagen sollten so beschaffen sein, dass Menschen und Tiere notfalls gefahrlos evakuiert werden können. Dieses ist der Fall, wenn die Flucht- und Rettungswege der Anlagen möglichst kurz und ohne Kreuzungen sind. Denn an jeder Kreuzung entstehen Konflikte zwischen Fußgängerströmen und damit Zeitverluste auf dem Weg in sichere Bereiche.

Die Flucht- und Rettungswege komplexer Gebäude werden üblicherweise mit Hilfe von Fußgängersimulationen konzipiert, da Praxistests oft zu teuer oder gar nicht durchführbar sind. Fußgängersimulationen funktionieren mit Algorithmen zur räumlichen Orientierung und Navigation der simulierten Personen. Ein Bestandteil entsprechender Algorithmen ist eine Wegesuche, die in der Regel mit dem *Dijkstra-Algorithmus* durchgeführt wird. Eine sinnvolle Alternative dazu ist ein heuristischer Ansatz, zum Beispiel ein *A*-Algorithmus*.

Dieser Beitrag diskutiert die Anwendung eines *A*-Algorithmus* zur Navigation von simulierten Fußgängerströmen. Als Schwerpunkt werden unterschiedliche Schätzfunktionen (Heuristiken) betrachtet, welche die individuellen Kriterien einer räumlichen Orientierung beschreiben. Ein Kriterium ist beispielsweise die Orientierung in eine grobe Richtung.

Die heuristische Navigation wird mit unterschiedlichen Simulationsszenarien veranschaulicht. Dabei wird deutlich, dass durch die Anwendung des *A*-Algorithmus* die räumliche Orientierung des Menschen besonders realistisch beschrieben wird. Gleichzeitig werden der Rechenaufwand und damit die Laufzeit einer Fußgängersimulation im Vergleich zur Anwendung des *Dijkstra-Algorithmus* minimiert.

Stichworte

Verkehr, Fußgänger, Simulation, Navigation, Wegesuche, Heuristik, A*-Algorithmus.

1 Einleitung

In der Informatik gibt es Navigationsalgorithmen, die der Wegsuche dienen. Bei der Wegsuche sind optimale Rechenzeit und die optimale Lösung zwei wichtige zu berücksichtigende Punkte. Der *Dijkstra*-Algorithmus versucht, einerseits die optimale Rechenzeit und andererseits die optimale Lösung zu garantieren. Der *A**-Algorithmus verwirft einen oder beide dieser Ansprüche, um bei komplexen Aufgaben einen Kompromiss zwischen dem Rechenaufwand und der Güte der gefundenen Lösung einzugehen. Dazu wird, um eine gute Lösung zu erzeugen, versucht mithilfe von „Schätzungen“ die Wegsuche anhand von Informationen ohne optimale Eigenschaften zu garantieren. Die „Schätzungen“ sind die Strategien, die das Auffinden von Lösungen beschleunigen können. Meistens ist die Schätzung eine Orientierung an Beispielen und die Nachbildung des menschlichen Problemlöseprozesses.

2 Der A*-Algorithmus

Der *A**-Algorithmus gehört zur Klasse der informierten Suchalgorithmen. *Informiert* bedeutet, dass mit menschlichen „Schätzungen“ gearbeitet wird. Er dient zur Berechnung des kürzesten Pfades zwischen zwei Knoten in einem Graphen mit positiven Kantengewichten. Der *A**-Algorithmus wird immer die optimale Lösung finden, falls eine optimale Lösung existiert. Der *A**-Algorithmus sucht – wie *Branch'n'Bound* – nach dem kürzesten Weg und berücksichtigt bei der Wahl des nächsten zu expandierenden Knotens die Weglänge. Zusätzlich wird, ähnlich wie bei der Bestensuche, auch die Zustandsbewertung berücksichtigt. Der *A**-Algorithmus untersucht immer die Knoten zuerst, die wahrscheinlich zum Ziel führen. Um den meistversprechenden Knoten zu ermitteln, wird allen bekannten Knoten x jeweils mittels einer $F(x)$ -Funktion ein f -Wert zugeordnet, der angibt, wie lange der Pfad vom Start zum Ziel unter Verwendung des betrachteten Knotens im kürzesten Fall ist. Der Knoten mit dem niedrigsten f -Wert wird als nächstes untersucht. Der f -Wert besteht aus zwei Teilen. Ein Teil ist die tatsächliche Länge g vom Startknoten zum aktuell betrachteten Knoten x . Er wurde mittels $G(x)$ -Funktion ausgerechnet. Der andere Teil ist die geschätzte Länge vom aktuell betrachteten Knoten x bis zum Zielknoten. Hierbei ermittelt die Schätzfunktion $H(x)$ an jedem Knoten einen Schätzwert. Die Funktion ist eine so genannte Heuristikfunktion, um zielgerichtet zu suchen und damit die Laufzeit zu verringern. Zusätzlich gibt es einen *A**-Faktor a , welcher die Schätzfunktion in ihrem f -Wert kontrolliert. Die Funktion wird nach folgender Formel gebildet:

$$F(x) = G(x) + a \cdot H(x) \quad [1]$$

Um den f -Wert zu finden, müssen der wahre g -Wert, der A^* -Faktor a und der Schätzwert h vorhanden sein. Der g -Wert ist durch natürliche Umstände gegeben. Die Funktion $G(x)$ summiert alle tatsächlichen Weglängen vom Startknoten zum aktuell betrachteten Knoten x . Der A^* -Faktor ist ein einflussreicher Koeffizient:

Ist er gleich null, dann funktioniert der A^* -Algorithmus genau wie der Dijkstra-Suchalgorithmus. Es wird zwar der kürzeste Weg geliefert, aber der Suchbereich wird dabei nicht verringert. Das heißt, die heuristische Schätzfunktion fällt weg.

Wenn er ungleich null ist, sind drei Fälle möglich: Im ersten Fall ist der gesamte Schätzwert, den $a \cdot H(x)$ liefert, kleiner als der tatsächliche Wert. Dann findet der A^* -Algorithmus den kürzesten Weg, aber der Rechenaufwand wird nur wenig verringert und die Rechenzeit nicht optimal reduziert. Im zweiten Fall ist der gesamte Schätzwert, den $a \cdot H(x)$ liefert, genau dem tatsächlichen Wert, dann findet der A^* -Algorithmus den kürzesten Weg. Idealerweise wird dadurch unnötiger Rechenaufwand vermieden und es wird Rechenzeit gespart. Im letzten Fall ist der gesamte Schätzwert, den $a \cdot H(x)$ liefert, größer als der tatsächliche Wert, dann kann mit dem A^* -Algorithmus nicht garantiert werden, den kürzesten Weg zu finden. Aber der Rechenaufwand und die Rechenzeit sind auf jeden Fall geringer als beim Dijkstra-Suchalgorithmus.

Der Schätzwert h wird mit der Schätzfunktion $F(x)$ für jeden Knoten ausgerechnet. Im Prinzip wird die Schätzfunktion $F(x)$ den Umständen entsprechend gebildet. In Fußgängersimulationen sind alle Wege als Geraden modelliert. Um den kürzesten Weg zum Zielort zu finden, wird in den heuristischen Navigationsalgorithmus nur eine Lafebene eingesetzt. Jeder Wendepunkt kann als ein Knoten im Wegsuchegraph betrachtet werden. Der Knoten besitzt zweidimensionale kartesische Koordinaten. Aus diesem Grund benutzt der heuristische Navigationsalgorithmus die Luftlinienlänge vom Knoten zum Zielort. Das heißt, die heuristische Funktion rechnet für jeden Knoten die Luftlinienlänge aus. Für einige Simulationsszenarien kann man die heuristische Funktion noch um einen geometrischen Winkel, welcher den aktuellen Weg und die Luftlinie einschließt, ergänzen. Ist der f -Wert gegeben, wird er folgendermaßen im A^* -Algorithmus benutzt. Zunächst werden alle Knoten während der Suche in drei verschiedene Klassen eingeteilt:

- **Unbekannte Knoten:**

Diese Knoten sind während der Suche noch unbekannt, daher ist auch der Weg zu ihnen noch nicht bekannt. Jeder Knoten (außer dem Startknoten) ist zu Beginn des Algorithmus unbekannt. Während der Suche wird die Menge der unbekannte Knoten verkleinert. Aber die Menge der unbekannt Knoten muss keine leere Menge sein.

- **Bekannte Knoten:**

Zu diesen Knoten ist ein (möglicherweise suboptimaler) Weg bekannt. Alle bekannten Knoten werden zusammen mit ihrem f -Wert in der so genannten *Open List* gespeichert. Aus dieser Liste wird immer der meistversprechende Knoten ausgewählt und untersucht. Die Implementierung der *Open List* hat großen Einfluss auf die Laufzeit und wird oft als einfache Prioritätswarteschlange realisiert [1]. Zu Beginn ist nur der Startknoten bekannt. Die Menge der bekannten Knoten ist dynamisch; während der Suche werden die Nachfolgerknoten des aktuellen Knotens aus der Liste der unbekannt Knoten herausgenommen und in die Liste der bekannten Knoten eingefügt. Der Weg vom Startknoten bis zu diesen Knoten wird ausgerechnet. Wenn dieser Knoten keine weiteren Nachfolgeknoten hat und der f -Wert auch nicht der Minimalwert ist, nimmt der Suchalgorithmus diesen Knoten wieder aus der Liste der bekannten Knoten heraus und fügt ihn in die *Closed List* (siehe unten) ein. Aber wenn dieser Knoten noch Nachfolgeknoten hat oder der f -Wert dieses Knotens der Minimalwert ist, dann bleibt dieser Knoten in der Liste der bekannten Knoten.

- **Abschließend untersuchte Knoten:**

Zu diesen Knoten ist der kürzeste Weg bekannt. Wenn nach dem Suchschritt der Zielknoten schon in der Liste der abschließend untersuchten Knoten gespeichert ist, ist der kürzeste Weg zum Zielknoten endlich gefunden. Die abschließend untersuchten Knoten werden in der so genannten *Closed List* gespeichert, damit sie nicht mehrfach untersucht werden [1]. Die *Closed List* ist zu Beginn leer. Die Knoten, die in der *Closed List* gespeichert sind, beschreiben nicht den kürzesten Weg vom Startknoten bis zum Zielknoten.

Jeder bekannte oder abschließend untersuchte Knoten enthält einen Zeiger auf seinen Vorgänger. Mit Hilfe dieser Zeiger kann der Pfad bis zum Startknoten zurückverfolgt werden [1]. Wird ein Knoten x abschließend untersucht, so werden seine Nachfolger in die *Open List* eingefügt und x auf die *Closed List* gesetzt. Die Vorgängerzeiger der Nachfolgeknoten werden auf x gesetzt. Ist ein Nachfolgeknoten bereits auf der *Closed List*, so wird er nicht erneut in die *Open List* eingefügt und auch sein Vorgängerzeiger nicht geändert. Ist ein Nachfolgeknoten bereits auf der *Open List*, so wird der Knoten nur aktualisiert (f -Wert und Vorgängerzeiger), wenn der neue Weg dorthin kürzer ist als der bisherige. Falls der Zielknoten abschließend untersucht wird, terminiert der Algorithmus. Der gefundene Weg wird mit Hilfe der Vorgängerzeiger rekonstruiert und ausgegeben. Falls die *Open List* leer ist, gibt es keine Knoten mehr, die untersucht werden könnten. In diesem Fall terminiert der Algorithmus, da es keine Lösung gibt. Bedingt durch die Vorgängerzeiger wird der gefundene Weg vom Ziel ausgehend rückwärts bis zum Start ausgegeben. Um den Weg in der richtigen Reihenfolge zu erhalten, können z.B. vor der Wegsuche Start und Ziel vertauscht werden. Somit wird vom eigentlichen Ziel zum Start gesucht und die Wegausgabe beginnt beim ursprünglichen Startknoten [1].

3 Heuristiken für Fußgängersimulationen

3.1 Luftlinien-Heuristik

In Fußgängersimulationen sind die Wege in einem Gebiet als Kantenzüge mit einzelnen Geraden modelliert. Um den kürzesten Weg zwischen einer Person und einem Ziel zu finden, wird die Luftlinie zwischen diesen Orten als Schätzrichtung für eine heuristische Wegesuche verwendet. Um diesen Vorgang noch deutlicher darzustellen, sei nachfolgend ein kurzes Beispiel aufgeführt.

Es soll der kürzeste Weg zwischen zwei Standorten A und H gefunden werden. Das linke Bild in Abb. 3.1 zeigt eine kleine Auswahl an Knoten und Wegen. Die Kantenbeschriftung entspricht den Wegelängen (hier: Entfernung in Meter), um von einem Standort zum nächsten zu gelangen. Jeder Knoten enthält die Luftlinielänge zum Zielknoten (h -Wert der Heuristik-Funktion). Auf den folgenden Bildern (Abb. 3.1-3.4) zeigt die Farbe eines Knotens seinen Status an: Die weißen Knoten sind schon untersucht und befinden sich deshalb auf der so genannten *Closed List*. Die blauen Knoten mit Schrift sind bekannt und befinden sich deshalb auf der so genannten *Open List*. Die blauen Knoten ohne Schrift sind noch nicht bekannt.

Das rechte Bild in Abb. 3.1 zeigt den Startknoten A und eine Bestimmung seiner Nachfolgerknoten B und C . B wird mit $Bf = Ag + ABg + Bh = 0 + 164 + 385 = 549$ m in die *Open List* eingefügt. Die einzelnen Werte dieser Rechnung stehen für die Länge des Weges von A zu sich selbst (= 0 m), die Länge des Weges zwischen A zu B (= 164 m) und dem geschätzten Abstand zwischen B und H (= 385 m). Die Weglänge über C wird analog zu der von B berechnet und C mit $Cf = Ag + ACg + Ch = 0 + 260 + 355 = 615$ m in die *Open List* eingefügt. Dabei ist die Länge des Weges A - C gleich 260 m und die geschätzte Länge des Weges C - H gleich 355 m. Folglich enthält die *Open List* nun zwei Knoten mit geschätzten Weglängen: Der Weg über B ist schätzungsweise 549 m lang, der über C schätzungsweise 615 m. Zum Abschluss dieses ersten Schrittes der heuristischen Wegesuche wird Knoten A als Vorgänger von B und C vermerkt und Knoten A auf die *Closed List* gesetzt. Damit wird ausgeschlossen, dass A im weiteren Verlauf der heuristischen Wegesuche erneut als Nachfolgerknoten betrachtet wird. Sonst wäre es möglich, dass zyklische Wege entdeckt werden, die jedoch mit Sicherheit nicht die kürzesten Wege sind.

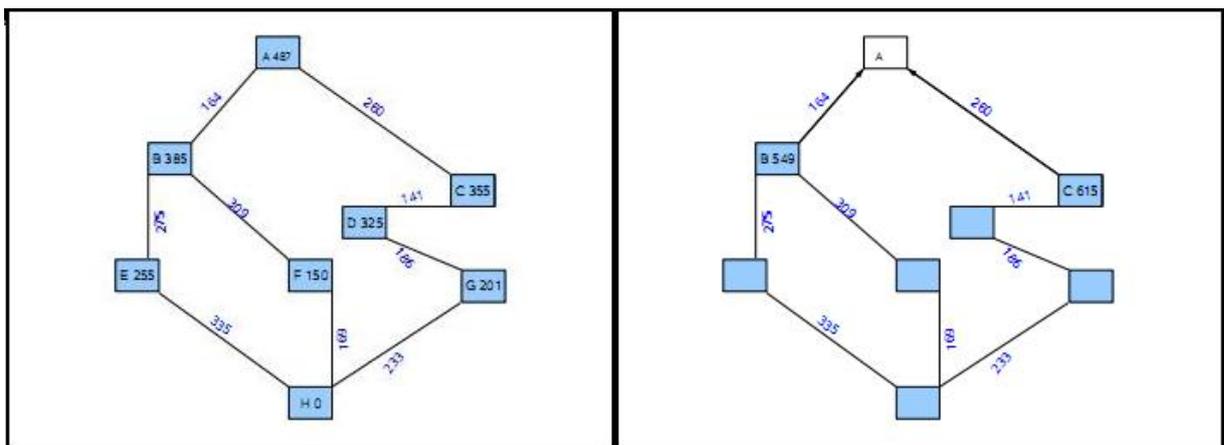


Abb. 3.1: Luftlinien-Heuristik - Ablaufprozesse 1 und 2.

Das rechte Bild in Abb. 3.1 zeigt, dass B den geringeren f -Wert als C hat. Das heißt, dass der Weg nach H über B schätzungsweise kürzer ist als über C . Folglich wird Knoten B als nächstes untersucht und als temporärer Wegknoten festgelegt (siehe linkes Bild in Abb. 3.2). Seine Nachfolger sind die Knoten E und F , die nun so betrachtet werden wie die Knoten B und C im ersten Schritt. Zuerst wird E genauer überprüft. A ist bereits auf der *Closed List* und wird nicht weiter betrachtet. E wird mit $Ef = ABEg + Eh = 164 + 275 + 255 = 694$ m in die *Open List* eingefügt. Die Weglänge bis E ist die Summe

von $A-B$ und $B-E$. B wird als Vorgängerknoten gespeichert. F wird mit $Ff = ABFg + Fh = 164 + 309 + 150 = 623$ m in die *Open List* eingefügt. B wird als Vorgängerknoten gespeichert und auf die *Closed List* gesetzt. F hat einen geringeren f -Wert als E und hat die Weglänge 623 m. Aber in der *Open List* ist auch C mit einer noch geringeren Weglänge vorhanden, sie beträgt 615 m.

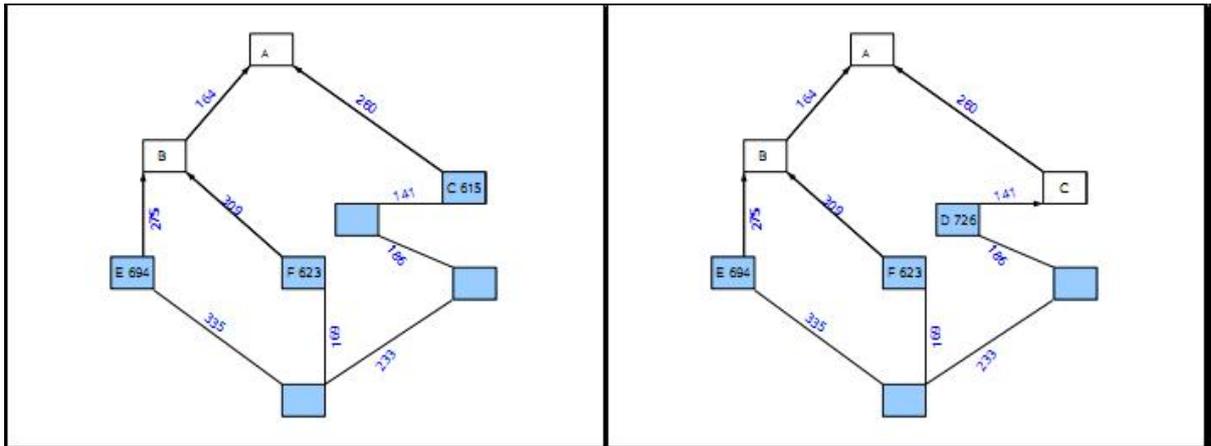


Abb. 3.2: Luftlinien-Heuristik - Ablaufprozesse 3 und 4.

Das linke Bild in Abb. 3.2 zeigt, dass C den geringsten f -Wert in der *Open List* hat. Das heißt, dass der Weg nach H über C schätzungsweise am kürzesten ist. Folglich wird Knoten C als nächstes untersucht und als temporärer Wegknoten festgelegt (siehe rechtes Bild in Abbildung 3.2). Sein Nachfolger ist der Knoten D , der mit $Df = ACDg + Dh = 260 + 141 + 325 = 726$ m in die *Open List* eingefügt wird. Danach wird C als Vorgänger von D vermerkt und C in der *Closed List* gespeichert.

Nach diesem Suchschritt hat Knoten F den geringsten f -Wert in der *Open List* (= 623 m): Schätzungsweise führt der kürzeste Weg zwischen A und H über F . Deshalb wird Knoten F als nächstes untersucht und als temporärer Wegknoten festgelegt (siehe linkes Bild in Abb. 3.3).

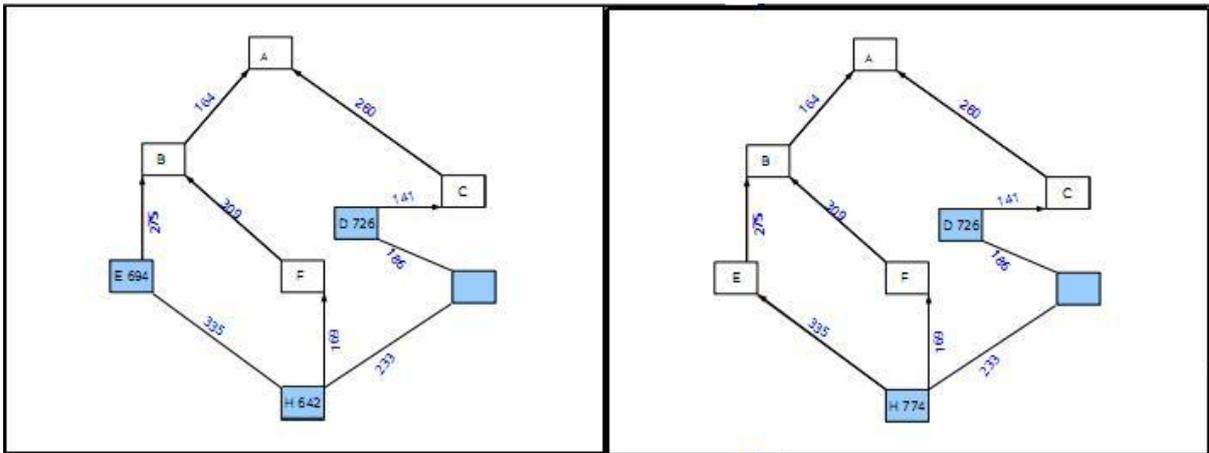


Abb. 3.3: Luftlinien-Heuristik - Ablaufprozesse 5 und 6.

Der Zielknoten H ist der Nachfolger von Knoten F . Die tatsächliche Weglänge von F nach H weicht deutlich von der Schätzung ab. A , B und C sind bereits auf der *Closed List* und werden nicht weiter betrachtet. Der Zielknoten H wurde schon gefunden und die Weglänge beträgt 642 m. Dieser Wert wurde aber noch nicht als die Lösung ausgegeben, sondern zunächst in die *Open List* eingefügt. Eventuell gibt es noch einen besseren Pfad. Hier wird ein wichtiger Unterschied zwischen „Knoten befindet sich auf der *Open List*“ und „Knoten befindet sich auf der *Closed List*“ deutlich: Solange ein Knoten nicht abschließend betrachtet wurde, ist der Pfad zu diesem Knoten nur vorläufig. Der Knoten auf der *Closed List* eingefügt wurde abschließend betrachtet. Der kürzeste Pfad dorthin ist bekannt. Aus diesem Grund wird F als Verlängerung gespeichert und auf die *Closed List* gesetzt.

Im nächsten Schritt wird E erkundet (siehe rechtes Bild in Abb. 3.3). Der einzige Nachfolger von E , der sich noch nicht auf der *Closed List* befindet, ist H . Die Länge des Weges über E nach H beträgt schätzungsweise 774 m. Also ist der Weg über F kürzer als der Weg über E , so dass der bisher gefundene kürzeste Weg nicht geändert wird und H die Referenz auf seinen Vorgänger F mit dem Schätzwert 642 m behält (siehe linkes Bild in Abb. 3.4). E wird auf der *Closed List* gespeichert.

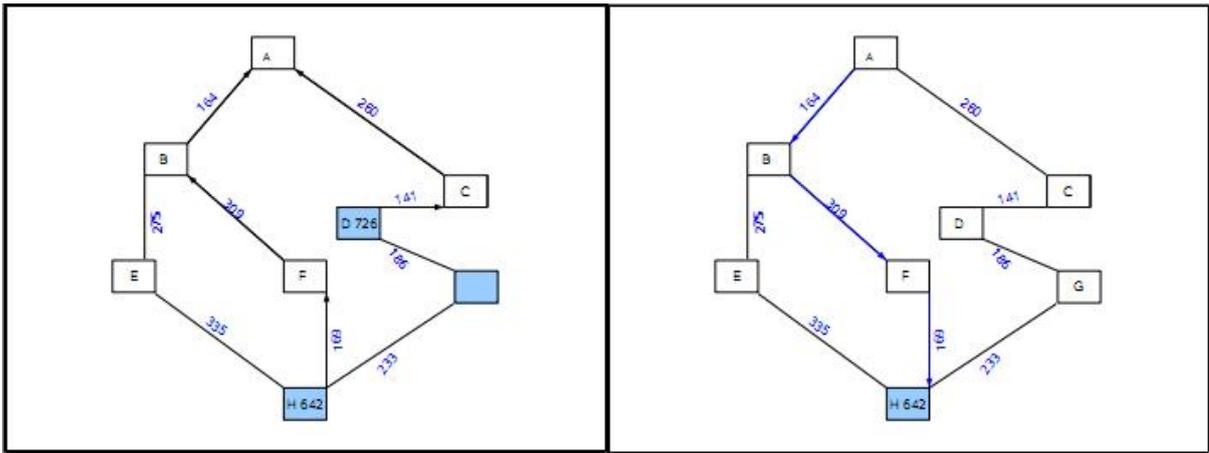


Abb. 3.4: Luftlinien-Heuristik - Ablaufprozesse 7 und 8.

Nun befinden sich nur noch H und D in der *Open List*. H hat den kleineren f -Wert und wird deshalb im nächsten Suchschritt betrachtet. Da H der gesuchte Zielknoten ist, wird H einfach auf die *Closed List* gesetzt. Damit ist automatisch klar, dass der kürzeste Weg zwischen A und H gefunden ist. Indem man von H aus an jedem Knoten der Referenz auf den Vorgänger folgt, bis man bei A ist, bekommt man alle Knoten des kürzesten Weges in umgekehrter Reihenfolge. Hier ergibt sich als kürzester Weg die Knotenfolge $A-B-F-H$ (siehe rechtes Bild in Abb. 3.4). Die übrigen Knoten in der *Open List* wie auch die noch nicht untersuchten Knoten, hier der Knoten G , werden nicht mehr betrachtet.

Dieses Beispiel zeigt die Funktionsweise sowie die Eigenschaften einer zielgerichteten Wegesuche. Insbesondere wird deutlich, dass nicht alle Zielknoten betrachtet werden müssen, um den kürzesten Weg zum Ziel zu finden. Damit wird der Rechenaufwand für eine Wegesuche reduziert.

3.2 Luftlinien- und Winkel-Heuristik

Für einige Simulationsszenarien kann man die heuristische Funktion noch mit dem geometrischen Winkel, welcher den aktuellen Weg und die Luftlinie einschließt, ergänzen. Dadurch wird der f -Wert eines Knotens verändert. Zur Berechnung des h -Wertes werden 3 Fälle unterschieden: Falls ein Knoten und das angestrebte Ziel die gleiche x -Koordinate haben, dann ist der h -Wert des Knotens gleich der Hälfte des Abstands zwischen Knoten und Ziel in y -Richtung. Oder falls der Knoten und das Ziel die gleiche y -Koordinate haben, dann ist der h -Wert des Knotens gleich der Hälfte des Abstands zwischen Knoten und Ziel in x -Richtung. Sonst bildet die Kante zwischen dem

Knoten und dem Ziel einen Winkel mit dem aktuellen Weg. Der h -Wert des Knotens ist gleich dem Tangens dieses Winkels. Im Weiteren läuft der A^* -Algorithmus ebenso wie in Kapitel 3.1 beschrieben ab.

4 Anwendung

Der oben erläuterte A^* -Algorithmus sowie die Schätzfunktionen wurden verwendet, um die Navigation und die Bewegungen bestimmter Fußgängermengen zu simulieren. Hierfür wurde das Simulationstool *JWalkerS* benutzt, das am Institut für Bauinformatik der Leibniz Universität Hannover entwickelt wird.

JWalkerS basiert auf einem modifizierten *Soziale Kräfte-Modell*, das die Bewegungen einzelner Fußgänger mathematisch beschreibt. Es beschreibt die Beschleunigung eines Fußgängers mit einer Sozialen Kraft, die eine Antriebskraft zum Ziel und abstoßende Kräfte von anderen Fußgängern und Hindernissen enthält [2]. Die abstoßenden Kräfte stehen für das Bedürfnis eines Fußgängers, zu anderen Fußgängern und Hindernissen einen bestimmten Abstand einzuhalten [2]. Außerdem enthält *JWalkerS* eine graphenbasierte Wegalgebra, die der Orientierung und Navigation von Fußgängern dient. Ein Weg ist als Graph in Form eines Kantenzuges beschrieben, jeder Knoten dieses Kantenzuges ist ein räumliches Ziel. Die Geometrie eines Grundrisses ist mit einer polygonalen Regionenalgebra approximiert. Die heuristischen Navigationsalgorithmen wurden in die graphenbasierte Wegalgebra von *JWalkerS* implementiert.

Zur Anwendung der heuristischen Navigationsalgorithmen wurden die Bewegungen von Fußgängern im Hauptbahnhof Hannover simuliert. Als Heuristik wurde die Luftlinien-Schätzfunktion verwendet. Abb. 4.1 zeigt die Simulation des Erdgeschosses des Hauptbahnhofs Hannover. Grau dargestellt ist die begehbare Fläche, von der nach oben und unten die Aufgänge zu den Gleisen abzweigen. Dunkelblau dargestellt sind die Hindernisse wie Wände und Säulen sowie die Aussparungen in der begehbaren Fläche. Gegenstand der Simulation sind die Fußgängerbewegungen vom linken Eingang zum rechten Ausgang des Gebäudes. Die Orientierung und Navigation zwischen diesen beiden Orten wurde mit der heuristischen Wegesuche durchgeführt. Auf der begehbaren Fläche des Gebäudes sind die Zielknoten des hinterlegten Wegegraphen zu sehen: Abgesuchte Zielknoten sind als gefüllte Quadrate, nicht betrachtete Zielknoten als Kreuze dargestellt. Die abgesuchten Zielknoten befinden sich hauptsächlich auf dem direkten Weg zwischen Start und Ziel im unteren Teil des Gebäudes. Hier befindet sich auch die genaue Lösung, der kürzeste Weg, der mit der heuristischen Luftlinien-Schätzfunktion gefunden wurde.

Die für die Wegesuche benötigte Rechenzeit hat im Vergleich zum *Dijkstra*-Algorithmus verringert.

Ebene: 0 Anzahl Verkehrsteilnehmer: 8

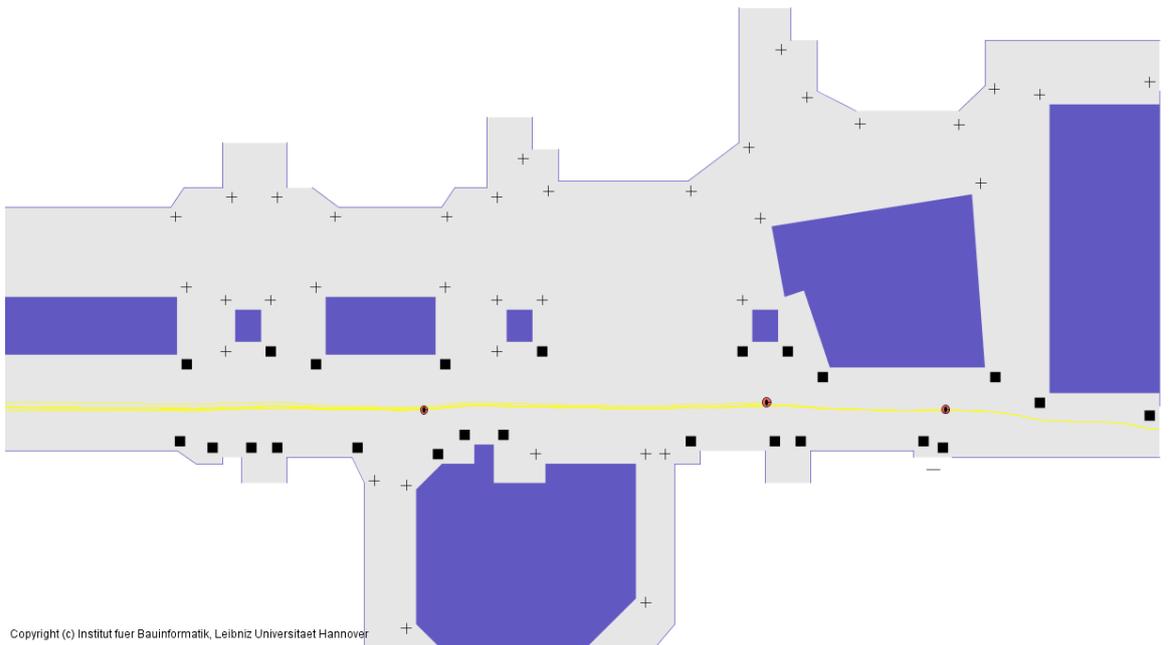


Abb. 4.1: Simulation von Fußgängerbewegungen im Hauptbahnhof Hannover.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es hat sich gezeigt, dass heuristische Navigationsalgorithmen in Fußgängersimulationen im Vergleich zum Dijkstra-Algorithmus mit geringerem Rechenaufwand den kürzesten Flucht- bzw. Rettungsweg finden können. Der A*-Algorithmus findet zwar nicht in jedem Fall den kürzesten Weg, aber er besitzt die schnellste Rechenzeit – er führt schnell zum Ergebnis. Der Dijkstra-Algorithmus ist geeignet, um die menschliche Orientierung entlang eines bekannten Weges zu beschreiben, zum Beispiel bei einer Evakuierung entlang eines ausgeschilderten Fluchtweges. Aber in der Realität kennen Fußgänger nicht immer den realen bzw. den optimalen Weg. Besonders, wenn sie nur eine grobe Richtung zum Ziel kennen, beschreibt der A*-Algorithmus ihre Orientierung deutlich besser als der Dijkstra-Algorithmus.

In Zukunft gilt es, die hier entwickelten Navigationsalgorithmen auf weitere Fußgänger-Szenarien anzuwenden und sie zu erweitern, zum Beispiel für den Fall der Navigation über mehrere Stockwerke. Hier ist es denkbar, die Luftlinien-Schätzfunktion um eine Orientierung zum nächsten Treppenhaus zu erweitern. Außerdem sind

Heuristiken zu entwickeln, die empirische Regeln des Fußgängerverkehrs beschreiben, zum Beispiel das Gebot oder die Neigung des Menschen rechts zu gehen. Schließlich ist es eine interessante Aufgabe, einfache Wege zu finden, um dem A^* -Faktor einen gültigen Wertbereich zuzuweisen.

Literaturverzeichnis

- [1] Hinzer, Karla. *Heuristische Suche in der KI, von Branch-and-Bound zum A^** .
- [2] JWalkerS Homepage. <http://www.bauinf.uni-hannover.de/427.html>

Analysis of Energy Simulation Models

Zixiang Cong, Brian Cahill, Karsten Menzel

University College Cork, Civil and Environmental Engineering Department, Cork, Ireland, E-mail: z.cong@ucc.ie, Phone +35321/4205135

Abstract

The building sector is responsible for approximately 40 per cent of the overall energy consumption in the European Union (EU). Emphasis on improving the energy performance of the EU's existing and new building stock is critical. The development of Energy Simulation Models through the implementation of the BIM (*Building Information Model*) will allow facility managers and maintenance crews to monitor and evaluate energy systems operating in buildings, in order to optimise energy consumption and provide building performance data. Current energy simulation models are static and do not account for dynamic changes in building characteristics including occupancy and the building's external environmental conditions. This paper will examine the data formats used in energy simulation. It will describe an energy simulation of the Environmental Research Institute (ERI) building, University College Cork, and discuss potentials and limitations of available energy simulation software.

Keywords

Energy Simulation, BIM, BMS, Energy Simulation Tools, Building Lifecycle

1 Introduction

Energy simulation of the built environment involves analysis of the actual or predicted energy performance of buildings. It can also involve an analysis of the embodied energy within building materials and of methods used to construct buildings [1]. The ultimate aim of this research is to analyze simulation tools that will enhance our research focusing on energy performance and energy efficiency improvements in buildings. Energy simulation involves comparisons between actual and predicted use of building energy. Comparisons are made against benchmark parameter values used to indicate regulatory requirements, average energy consumption or best practice.

The first part of this paper discusses the basic principles of energy simulation and the input data for simulation. The second part of this paper examines the potential and limitation of simulation engines.

The final part examines the ERI building energy simulation example in detail. This simulation helps to illustrate how energy performance can be improved throughout a building’s life cycle through the use of energy efficient and renewable energy technologies in the initial design, construction, commissioning, operation and maintenance phases.

2 Basic Principles of Energy Simulation

Energy simulation tools predict the energy performance of a given building and the thermal comfort for its occupants. Such tools support the understanding of how a given building should perform under certain criteria and provide a means to compare different building design alternatives. All competing energy simulation tools have limitations, thus it is necessary to understand the basic principles of energy simulation [2].

Simulating a building’s energy usage is a difficult task, requiring not only a model of the building’s geometry, its components, such as insulation, windows, foundation, walls and HVAC systems, but also detailed and accurate environmental data. Environmental data includes weather conditions within the proximity of the relevant building, humidity, wind speed, external temperatures over various time periods. In addition, data supporting the building’s internal electricity load (lighting devices, electronic equipment, occupant electricity demands), heating and cooling loads are required as well (see fig. 1).

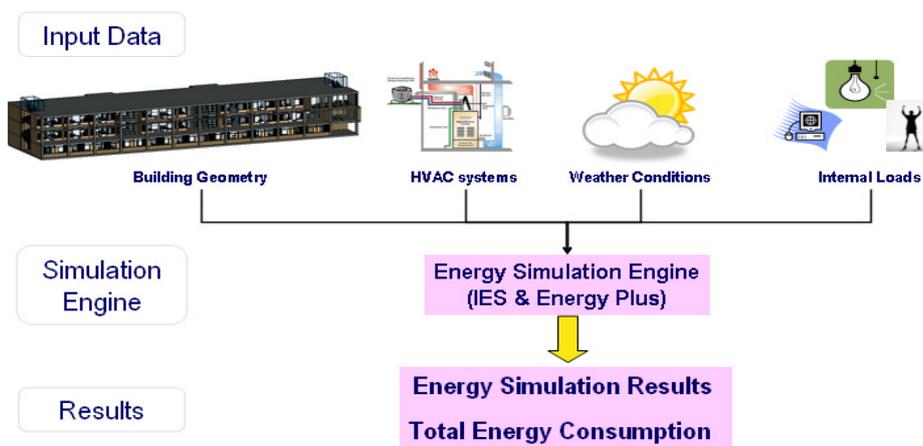


Fig. 1: Energy Simulation Process.

Building geometry comprises of the basic building input for energy simulation which is created by CAD tools. There are differences between building models created by architects and the building models required for energy simulation. One of the main differences is the use of the entity *space* by architects and the use of the entity *boundary* in energy simulation models. Architectural spaces, for example, rooms, are divided by walls. In energy simulation models, such spaces are referred to as thermal spaces and are defined by space boundaries. The combination or division of architectural spaces is based on the thermal perspective and the design and layout of the HVAC systems.

Energy simulation modeling of HVAC systems is accommodated significantly by all energy simulation tools. However, HVAC systems can be modelled to reflect the actual system if the energy simulation tool provides enough flexibility. To define a realistic representation of a real HVAC system within a building structure can be challenging. The HVAC operating schedule is a key input for energy simulations of this nature. Operating schedules define the behaviour of HVAC components, such as *peak* or *off-peak time periods*, for all of the HVAC systems.

Weather conditions are extremely important for energy simulation models. The weather data format includes basic location information; *name, state/province/region/country, latitude, longitude, time zone, elevation, peak hot and cold temperatures*. In addition, daylight savings, average and extreme temperature periods are also included as input data. The collected weather data are not used to reflect weather conditions for a specific year, but rather to provide statistical references for typical weather parameters for a specific location.

Internal loads, such as energy consumed by occupants, lighting devices and electronic devices depend on the actual usage of a relevant space within a building and the behaviour of its occupants. Assumptions have to be made about the quantity of internal loads in a given space within a building for energy simulations.

All of the above mentioned parameters provide basic data input for energy simulation. Energy simulation is enhanced by including additional input parameters that become more relevant to specific phases of a building's lifecycle. In addition, different types of simulation engines will also influence a building's energy simulation results.

3 Thermal Simulation Engines & Energy Simulation Tools

As already mentioned, energy simulation of buildings is essential when researching energy efficiency in buildings. Computer simulation programs are effective analytical

tools for building energy research and evaluation of architectural design. There are a number of energy simulation tools that this research has examined for their potential and limitations.

3.1 IES

The „Integrated Environmental Solution Virtual Environment“ (IES<VE>) performance analysis software suite allows architects and engineers to facilitate a sustainable design process by offering quantitative feedback on the environmental performance of different design options [3]. On average, green buildings use 30% less energy than conventional buildings, although through the use of IES software the potential is much higher [4]. It is a robust energy analysis tool that offers a high degree of accuracy and interoperability with the BIM model. The drawbacks are its current complexity for the user and the relatively expensive cost of the tool suite.

3.2 EnergyPlus

„EnergyPlus“ is a modularly structured software tool based on the previous capabilities of BLAST and DOS-2.1E. It is a simulation engine, which uses text files for input and output. It was developed to provide an integrated simulation for accurate temperature and comfort prediction. It calculates heating, cooling, plant and electrical system response, with a variable time step. It allows users to evaluate realistic system controls, moisture absorption and desorption in building elements, radiant heating and cooling systems, and inter-zone air flow. A day lighting module calculates daylight luminance and glare, and calculates electric lighting reduction for the heat simulation tool. EnergyPlus is open source software, and since its launch in 2001 it has become the most used simulation tool. However it has a poor user interface which is difficult to use and demands specialist knowledge to interpret results. „DesignBuilder“ and „IDF Generator“ are a comprehensive user interface for the EnergyPlus dynamic thermal simulation engine.

Tab. 1 shows the major functionalities between IES and EnergyPlus. IES is older than EnergyPlus and it is a commercial product supporting standard graphical user interfaces and standalone weather file formats. IES and EnergyPlus both support 3-D geometry input and can interconnect with other tools. Although EnergyPlus includes a variety of links to other simulation engines (COMIS, SPARK), several limitations apply to the usage of these links.

Energy Simulation Tool	IES	EnergyPlus
Release year	1994	2001
Licence	Commercial	Open source
Weather file format	CIBSE	EPW
Complexity of geometry	Simplified 3-D geometry	Simplified 3-D geometry
Data exchange	GBXML	IFC/IDF
Software technologies	Not applicable	Engine based on text file input and output Modular approach
Interconnectivity to other tools	Autodesk Revit	Links to COMIS and SPARK

Tab.1: Comparison of functionality between IES and EnergyPlus.

4 ERI Life Cycle Energy Performance Model

Buildings often do not perform as well in practice as expected during pre-design planning, nor as intended at the design stage, nor even as measured during commissioning and maintenance operations. While this statement is generally considered to be true, it is difficult to quantify the impacts and long-term economic implications of a building in which performance does not meet expectations. This leads to a building process that is devoid of quantitative feedback that could be used to detect and correct problems both in an individual building and in the building process itself [5, 6]. Fig. 2 shows the different stages of the building energy life cycle.

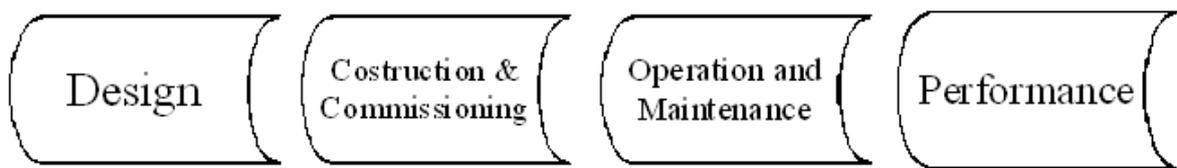


Fig.2: Building Energy Lifecycle.

The design stage of a low energy building typically involves the use of CAD drawings, steady state and dynamic simulation tools to estimate the building's energy performance, and influence the design to achieve a predefined performance objective. The energy consumption rate is expressed in kWh/m² of the treated floor area.

The construction and commissioning of HVAC and electrical equipment is usually performed to achieve $\pm 10\%$ of the peak design flows in the case of air and water commissioning. Typically optimization of equipment as part loads does not occur.

The ongoing operation of an energy efficient building involves the use of a *Building Management System* (BMS) to actively control and monitor the buildings environment. This system can be extended into a Building Energy Management System (BEMS). Typically maintenance of building systems prioritizes the functional well being of mechanical and electrical components in order to prolong their working life. Unfortunately the energy function of such systems is not the primary concern although not an unrelated consequence.

There is a need for an integrated lifecycle energy performance model to provide feedback that can be used to optimize systems' operation, detect and correct problems for an individual building as well as provide design feedback to improve the design and construction of future buildings.

Our research has modelled the ERI building through the development of an integrated computer-based Building Information Model (BIM) by implementing a building life cycle approach. The BIM includes benchmarking, simulated and real-time operation data relating to the energy performance of the building. It also provides data concerning the building's geometry, materials used, occupancy schedules, environmental conditions as well as operational data. The BIM, combined with data from the BMS, contributes to an accurate energy simulation of the ERI building [10]. This research is one of the focus areas concerning the Informatics Research Unit for Sustainable Energy (IRUSE). IRUSE have research teams based in the Civil and Environmental Engineering Department, University College Cork and the Civil Engineering Department, National University of Ireland Galway.

The ERI (Fig. 3) is a three storey research building containing offices, computer laboratories, microbiology laboratories, and controlled temperature rooms. The Informatics Research Unit for Sustaining Engineering (IRUSE-Cork), Department of Civil and Environmental Engineering, University College Cork, use the ERI as a living laboratory to conduct research into the use of ICT to enhance energy efficiency and operation of green buildings. The ERI has been designed to achieve a "Very Good" Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM) rating [7]:

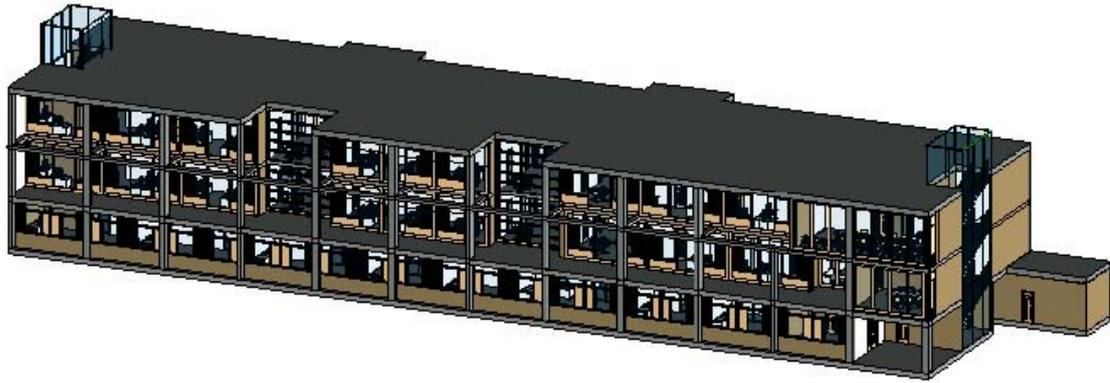


Fig.3: ERI Dynamic Building Simulation Model.

Tab. 2 shows the internal equipment and occupant parametric load which was used for the ERI energy simulation. Equipment considered for this simulation included lighting devices, personal PCs, refrigerators and a water cooler. The total internal load is easily calculated and provides one of the most important input parameters for the energy simulation model.

Parametric	Watt
Occupant	60W
Lighting	80W
Water Cooler	130W
PC	85-230W
Fridge	345W

Tab. 2: Internal parametric Load.

The HVAC system in the ERI supports the under-floor heating system. For the weather condition data we applied Cork, Ireland (City, Country). Using „Revit MEP“, we linked to the IES tool to calculate the total energy usage as 218.732 kW (see Fig. 4). The Energy Use Intensity (EUI) value for the ERI was calculated as follows:

Total Energy Usage (KW) / Total Area Space (m²) / Boiler Efficiency * Operation Hours (per year)

$$218.732 / (2627+631) / 0.8 * 2096 = 175.625 \text{ Kwh/m}^2/\text{yr}$$

Loads Report Summary



Project Information

Project	Project4
Run Time	25/05/2009 17:22
Address	
Latitude	53° 19' 59"
Longitude	6° 14' 53"
Building Type	Office
IES Version	5.8.5.2

Building Summary

Input Data	
Total Occupied Analytical Area	2627 m ²
Total Unoccupied Analytical Area	631 m ²
Total Occupied Analytical Volume	8852.06 m ³
Total Unoccupied Analytical Volume	2272.59 m ³
Results	
Total Cooling Load	0 W
Total Heating Load	218732 W

Building Checksums

Item	Cooling	Heating
Load Density	0.00 W/m ²	83.26 W/m ²
Load / Occupied Volume	0.00 W/m ³	24.71 W/m ³
Flow Density	1.92 L/(s·m ²)	2.43 L/(s·m ²)
Flow / Occupied Volume	0.57 L/(s·m ³)	0.72 L/(s·m ³)
Flow / Load	0.00 L/(s·kW)	N/A
Area / Load	0.00 m ² /kW	12.0110 m ² /kW
People	339.66	N/A

Weather Data

Item	Winter	Summer
Dry Bulb	-2 °C	24 °C
Wet Bulb	-5 °C	18 °C

Fig. 4: ERI Energy Simulation Report

The BMS (Building Management System) used for this research has been designed supporting data from wireless sensors measuring lighting levels, mean and radiant temperature, humidity and CO₂. In addition a number of energy meters have been installed to record energy consumption of the HVAC systems and energy consumed by electronic equipment. The BMS is capable of storing this energy real-time. Additional software techniques that we are currently researching will facilitate the detection of data patterns useful for predicting energy consumption and enhancing the building's energy efficiency operation. The BMS will provide the operational data for the BIM [8, 9]. Tab. 3 details actual energy data from the BMS system.

GAS		ESB	
Date	KWhrs	Date	KWhrs
06/09/07 -24/10/07	5676	Oct	58350
23/11/07 -28/12/07	23167	Dec	63600
24/01/08 -19/02/08	9833	Feb	70450
03/04/08 -22/04/08	5223	Apr	72550
22/05/08 -24/06/08	11630	June	67900
24/07/08 -21/08/08	3595	Aug	67650
Total Gas: 108027		Total Electricity Consumed: 400500	
Total Energy (kWh): 508527			
ERI EUI (Kwh/m ² /yr): 181.6168			

Tab. 3: Actual Energy Data from the BMS System.

Comparing predicted EUI with actual EUI, we have verified that the predicted EUI is the basic energy requirement for the building. The actual energy usage must be greater than or equal to the predicated EUI. By knowing the building's EUI we can optimize energy consumption and perform better building operation strategies.

5 Conclusion and Future work

This paper has highlighted the importance of energy simulation of buildings during each stage of the building lifecycle. Through accurate simulation can appropriate design enhancements be achieved focusing of energy efficient building operation. The accuracy of the simulation is influenced by the number of available input parameters. In addition, the ability of the energy simulation tool to support such input parameters is also critical to an accurate simulation. This paper examined the performance of IES and EnergyPlus simulation tools. This research preferred the use of IES.

This research is enhanced by the availability of a smart building for data analysis. Future work will see a greater quantity of data being harvested in the mentioned smart building through the expansion of its existing wireless sensor network. This will provide a greater array of input data for energy simulation. In comparison to the smart building model, IRUSE Cork has commenced analysis of their existing Civil Engineering building focusing on improving the buildings carbon emissions. This will allow this research to focus on energy simulation concerning the retro-fitting of an old building, which was constructed in 1910, and research how energy simulation can influence the design of a retro-fit project to improve old buildings energy consumption and contribute to the reduction of its carbon emissions.

Bibliography

- [1] IntUBE – EU Research Project. *Energy Profiling – Review of Current State of Energy Profiling Technology. Intelligent Use of Buildings' Energy Information.*
- [2] T. Maile, M. Fischer, and V. Bazjanac. *Building Energy Performance Simulation Tools – A Life-Cycle and Interoperable Perspective. Centre for Integrated Facility Engineering, Stanford University, December 2007.*
- [3] <http://www.iesve.com>
- [4] J. Kavanagh. *Performance Objectives and Metrics for the ERI Building's Hybrid Energy Systems. Minor Research Thesis in Sustainable Energy, National University of Ireland, Cork. 2006.*
- [5] M. F. Keohane. *Development of an Integrated Life Cycle Performance Model for ERI Utilising a Combination of Dynamic Energy Simulation and the Installed Building Management System. Minor Research Thesis in Sustainable Energy, National University of Ireland, Cork. 2007.*
- [6] R. J. Hitchcock, M. A. Piette, and S. E. Selkowitz. *A Building Life-Cycle Information System for Tracking Building Performance Metrics.* <http://www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/760308-TdwZPI/webviewable/760308.pdf>
- [7] University College Cork Environmental Research Institute Mechanical and Electrical Service Basis of Design Report Dn07282/R004. Generated By BDP.
- [8] E. Tobin, Z. Cong, and K. Menzel. *Parametric Modeling Supporting Collaborative Design. Forum Bauinformatik 2009, Karlsruhe, Germany. 2009.*
- [9] H. Yin, M. Otreba, K. Menzel, and L. Allan. *A Concept for IT-Supported Carbon Neutral Renovation. 26th Conference on Information Technology in Construction. October 2009. Turkey, Istanbul. 2009.*
- [10] E. Morrissey, M. Keane, J. O'Donnell, and J. McCarthy. *Building Effectiveness Communication Ratios for Improved Building Life Cycle Management. IBPSA 2005.*

Kopplung eines numerischen Wellentanks an einen dreidimensionalen LB-Berechnungskern zur Untersuchung von Strömungen mit freien Oberflächen

Christian Janßen, Manfred Krafczyk

Institut für rechnergestützte Modellierung im Bauingenieurwesen, Technische Universität Braunschweig, 38106 Braunschweig, Deutschland, E-mail: janssen@irmb.tu-bs.de, Telefon: +49(0)531/391-7589

Kurzfassung

Die Simulation von Strömungen mit freien Oberflächen spielt bei der Untersuchung vieler Phänomene im Umwelt- und Bauingenieurwesen eine große Rolle. Um realistische Strömungssimulationen zu ermöglichen, ist die Generierung eines nichtlinearen Wellenprofils erforderlich. Hierbei empfiehlt sich ein hybrides Verfahren, welches nur im Bereich brechender Wellen die vollständigen 3D Navier-Stokes-Gleichungen löst und im restlichen Gebiet auf hinreichend genaue reduzierte Modelle zurückgreift. In dieser Arbeit soll ein hybrides Konzept vorgestellt werden, das einen numerischen Wellentank auf Basis einer Potentialströmung (NWT, Department of Ocean Engineering, University of Rhode Island, USA [7]) an einen Berechnungskern für viskose, turbulente Strömungen mit freien Oberflächen (VIRTUALFLUIDS_{classic}, iRMB, TU Braunschweig, Deutschland [1]) koppelt. Im Gegensatz zu den bisherigen hybriden Verfahren wird mit VIRTUALFLUIDS_{classic} erstmalig ein effizientes Lattice-Boltzmann-Verfahren als Alternative zu klassischen Verfahren auf Basis der Navier-Stokes-Gleichungen verwendet. Der hybride Code eignet sich z.B. für Untersuchungen zur Hurrikan-Vorhersage, bei der die Generierung von Gischt durch brechende Wellen eine wesentliche Rolle spielt. Darüber hinaus soll er im Bereich von Welleneinwirkungen auf Brücken und Offshore-Windkraftanlagen sowie der Simulation von Tsunamis [11] eingesetzt werden.

Stichworte

Wellengenerator, LBM, Potentialströmung, Strömungen mit freier Oberfläche, Gischt, Hurrikan, Tsunami

1 Einleitung

Die zunehmende Leistungsfähigkeit und Erschwinglichkeit großer Computercluster sowie Fortschritte in der Modellierung von nichtlinearen Strömungen mit freien Oberflächen über komplexen Topographien machen es mehr und mehr möglich, Experimente in großskaligen Wellenkanälen numerisch nachzuvollziehen. Solche Computermodelle werden oft als numerischer Wellentank (NWT) bezeichnet [9]. Mit der Leistungsfähigkeit der Maschinen wachsen gleichzeitig auch die Anforderungen der Ingenieure an die Berechnungen, so dass der Bedarf die vorhandenen Ressourcen weiterhin ausschöpft oder sogar übersteigt. Um mit vertretbarem Aufwand Berechnungsergebnisse zu erhalten, sollte die Physik hinter den jeweiligen Modellen jedoch auf das zur Problemlösung erforderliche Minimum reduziert werden. Besonders bei mehrskaligen Problemstellungen oder großen Inhomogenitäten in der Modell-Geometrie kann die erforderliche Physik in unterschiedlichen Bereichen der Simulation variieren. Entweder, man nutzt die genaueren (und rechenintensiveren) Modelle im gesamten Berechnungsgebiet oder man verwendet gekoppelte Verfahren, die für das jeweilige Teilgebiet das optimale Modell benutzen. Letzteres kann

beispielsweise durch hybride Ansätze erreicht werden, bei denen die verschiedenen Modellgleichungen und numerischen Lösungsverfahren bidirektional gekoppelt werden.

Im Bereich von Strömungen mit freien Oberflächen genügt in vielen Fällen die Annahme einer inkompressiblen, nichtviskosen und rotationsfreien Potentialströmung. Die Autoren in Grilli et al. [10] zeigen, dass ein zweidimensionales Modell auf Basis der Potentialströmungstheorie die Höhe und Kinematik einer nichtbrechenden Einzelwelle mit einer Abweichung von lediglich 2% verglichen mit experimentellen Ergebnissen vorhersagt. In Bereichen der Interaktion zwischen Wellen und Strukturen (Ingenieurbauwerke, Ufer, ..) sind dagegen komplexere Modelle erforderlich, die viskose und turbulente Effekte abbilden können.

In diesem Beitrag werden zunächst die Grundlagen der am iRMB und an der URI vorhandenen Berechnungskerne vorgestellt. Darauf aufbauend wird ein Vorschlag zur Koppelung der beiden Codes präsentiert, dessen Umsetzung momentan implementiert wird

2 Simulation von Strömungen mit freier Oberfläche mit der LBM

Physikalisch betrachtet sind Strömungsprobleme mit freier Oberfläche Mehrphasenprobleme. Allerdings zeichnen sie sich durch deutlich unterschiedliche Dichten und dynamischen Viskositäten der beteiligten Fluide aus (z.B. Wasser/Luft). Bei zusätzlicher Vernachlässigung von Kapillarkräften kann die Strömungsberechnung auf die Phase mit höherer Viskosität beschränkt werden. Die leichtere Phase mit niedriger Viskosität wird nur in eine bestimmte Richtung gedrückt und beeinflusst die Strömung ausschließlich durch den Druck, den sie auf die Phasengrenzfläche ausübt. In diesem Kapitel werden das zu Grunde liegende LBM-Verfahren zur Strömungssimulation kurz vorgestellt und die zur Erfassung der freien Oberfläche notwendigen Erweiterungen präsentiert.

2.1 Strömungsfeld

Das *Lattice-Boltzmann-Verfahren* geht auf das stochastische Verhalten hypothetischer Gasteilchen zurück. Kernstück dieser Betrachtungen auf mikroskopischer Ebene sind die Teilchenaufenthaltswahrscheinlichkeiten $f(t, \mathbf{x}, \xi)$. Sie geben an, mit welcher Wahrscheinlichkeit man ein Teilchen am Ort \mathbf{x} mit der Geschwindigkeit ξ zum Zeitpunkt t antrifft. Die 1872 von Ludwig Boltzmann aufgestellte Boltzmann-Gleichung beschreibt die Entwicklung dieser Verteilungsfunktionen in der Zeit:

$$\frac{Df}{Dt} = \frac{\partial f(t, \mathbf{x}, \xi)}{\partial t} + \xi \frac{\partial f(t, \mathbf{x}, \xi)}{\partial \mathbf{x}} = \Omega \quad [1]$$

Der Operator auf der rechten Seite repräsentiert den Kollisionsoperator und modelliert die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen. Zur Vereinfachung des Problems werden diskrete Geschwindigkeiten ξ_i eingeführt, so dass unter Vernachlässigung externer Kräfte gilt:

$$\frac{Df_i}{Dt} = \frac{\partial f_i(t, \mathbf{x})}{\partial t} + \xi_i \frac{\partial f_i(t, \mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = \Omega_i \quad [2]$$

Zur Diskretisierung des Geschwindigkeitsraumes wird in dieser Arbeit das D3Q19-Modell [17] verwendet, welches 19 diskrete Geschwindigkeiten einführt:

$$\{\vec{e}_i, i = 0, \dots, 18\} = c \cdot \left\{ \begin{array}{c|cccccccc|cccccccc} 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 \end{array} \right\} \quad [3]$$

mit einer konstanten Geschwindigkeit c , die gleichzeitig die Schallgeschwindigkeit $c_s = c/\sqrt{3}$ festlegt. Eine weitere Diskretisierung in Raum und Zeit mit finiten Differenzen auf einem kartesischen Gitter mit $c = \Delta x/\Delta t = 1$ (Gitterweite Δx , Zeitschritt Δt) führt zur Lattice-Boltzmann-Gleichung:

$$f_i(t + \Delta t, \mathbf{x} + \mathbf{e}_i \Delta t) - f_i(t, \mathbf{x}) = \Omega_i \quad [4]$$

Diese Gleichung kann in eine lokale *Kollision* zur Modellierung der Teilcheninteraktion

$$\bar{f}_i(t, \mathbf{x}) = f_i(t, \mathbf{x}) + \Omega_i \quad [5]$$

und einen anschließenden, nicht lokalen *Propagationsschritt* zur Advektion

$$f_i(t + \Delta t, \mathbf{x} + \mathbf{e}_i \Delta t) = \bar{f}_i(t, \mathbf{x}). \quad [6]$$

unterteilt werden (siehe Abb. 1). Für kleine Knudsen- und Machzahlen können ausgehend von der Boltzmann-Gleichung die Navier-Stokes-Gleichungen hergeleitet werden [14]. Für eine vollständige Herleitung auf Basis der kinetischen Gastheorie sei auf Succi [18] verwiesen. Die vorgestellte Methode ist Basis des am iRMB entwickelten Softwarepaketes `VIRTUALFLUIDSclassic`.

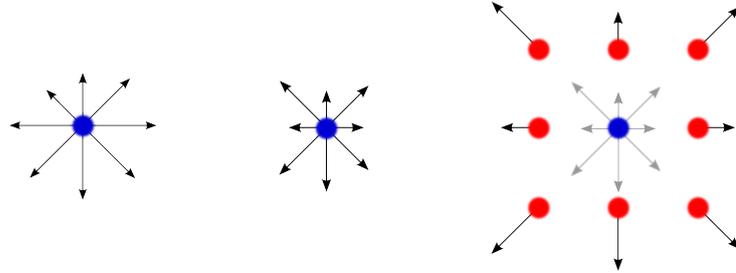


Abb. 1: Kollision und Propagation

Randbedingungen Haftrandbedingungen werden über ein Bounce-Back Schema zweiter Ordnung [3] erfüllt. Bounce-Back bedeutet, dass die Verteilungen die auf die Wand auftreffen, dort in entgegengesetzter Richtung zurückgeworfen werden. An Rutschrändern wird die makroskopische Geschwindigkeit ermittelt, auf den Oberflächennormalenvektor projiziert und dann als Randgeschwindigkeit aufgebracht.

Kollisionsoperatoren Eine einfache Approximation für den Kollisionsoperator Ω_i ist die single relaxation time (SRT) Approximation von Bhatnager, Gross und Krook (BGK) [2]:

$$\Omega_i = -\frac{\Delta t}{\tau} (f_i - f_i^{eq}). \quad [7]$$

f_i^{eq} ist die diskrete Form einer Maxwell'schen Gleichgewichtsverteilung und $\tau = 3\nu + \frac{1}{2}\Delta t$ bezeichnet die Relaxationszeit, die an die kinematische Viskosität des Fluids ν gekoppelt ist. Im MRT Modell [4] werden die Teilchenaufenthaltswahrscheinlichkeiten vor der Relaxation in den Momentenraum transformiert. Zur Relaxation der Momente werden nun verschiedene Relaxationsraten benutzt, was zu einer Erhöhung der Stabilität führt. Gleichzeitig ermöglicht dies die Entwicklung von Randbedingungen höherer Ordnung, die wiederum zu effizienteren Simulationen führen [6]. Der Kollisionsoperator für MRT lautet

$$\Omega_i = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{S} (\mathbf{M} f - m_i^{eq}), \quad [8]$$

mit einer Transformationsmatrix M , die die Teilchenaufenthaltswahrscheinlichkeiten in den Momentenraum abbildet. m_i^{eq} sind die Gleichgewichtsmomente und die Diagonalmatrix $S = s_{i,i}$ enthält die Relaxationsparameter. Die Parameter $s_{9,9} = s_{11,11} = s_{13,13} = s_{14,14} = s_{15,15} = -\frac{\Delta t}{\tau} = s_\omega$ sind über die Relaxationszeit $\tau = 3\frac{v}{c^2} + \frac{1}{2}\Delta t$ mit der kinematischen Viskosität ν des Fluids verknüpft. Die restlichen Relaxationsparameter können im Bereich $[-2, 0]$ frei gewählt werden.

2.2 Turbulenz

Zur Turbulenzmodellierung wird ein LES-Modell [16] verwendet, bei dem ein räumlicher Filter auf das Geschwindigkeitsfeld angewandt wird. Dieser Filter sollte fein genug sein, um die großen turbulenten Strukturen aufzulösen und nicht herauszufiltern. Lediglich der Effekt von kleinen Wirbeln auf die großskaligen Strömungsstrukturen muss modelliert werden. Dies geschieht über eine zusätzliche turbulente Viskosität ν_T . Es wird ein Smagorinski Modell benutzt, bei dem ν_T von der Schergeschwindigkeit abhängt. Der Einfluss der Turbulenz wird letztendlich durch eine modifizierte Relaxationsrate s_{xx} für die Momente zweiter Ordnung $m_{9,11,13,14,15}$

$$s_{xx} = \frac{1}{\tau_{total}} = \frac{1}{\tau_0 + \tau_t} \quad [9]$$

berücksichtigt. Details des Modells sind in Krafczyk et al. [16] zu finden.

2.3 Advektionsgleichung

Für das Verfolgen der freien Oberfläche wird in dieser Arbeit ein *Volume-of-Fluid-Ansatz* (VOF) [13] gewählt und der Füllstand einer Zelle als zusätzliche Variable ε eingeführt:

$$\varepsilon = \frac{V_{fluid}}{V_{cell}} = \frac{m}{\rho}, \quad [10]$$

für ein LB-Gitter mit $\Delta x_i = 1.0$, Zellmasse m und Fluidichte ρ . Neben dem Zellfüllstand wird der Zellzustand (Fluid, Interface oder Gas) gespeichert. Für Fluid- und Interfaceknoten werden die Kollisions- und Propagationschritte ausgeführt, für Gasknoten nicht. Die Advektionsgleichung, die die Bewegung des Interfaces beschreibt, wird nur auf Interfaceknoten gelöst. Darüber hinaus muss sichergestellt werden, dass zwischen Fluid- und Gasknoten eine geschlossene Interfaceschicht existiert. Der Massenaustausch zwischen zwei benachbarten Knoten wird auf Basis der Teilchenaufenthaltswahrscheinlichkeiten f ausgewertet. Sie entsprechen einer gewissen Anzahl an Partikeln, die während der Propagation ausgetauscht werden, so dass die Massenänderung pro Richtung i über

$$\Delta m_i(\vec{x}, t + \Delta t) = f_I(\vec{x} + e_i, t) - f_i(\vec{x}, t) \quad [11]$$

berechnet werden kann. I ist die inverse Richtung zu i , f_I bezeichnet die einfliegende und f_i die ausfliegende Verteilungsfunktion, siehe Thürey und Rüde [19]. Die Begrenzungsfläche zwischen zwei Interfacezellen ist nur teilweise benetzt. Es findet ein reduzierter Massenaustausch statt, bei dem die ausgetauschten Verteilungen f mit dem gemittelten Füllstand der Zellen gewichtet werden. Die endgültige Formulierung für den Massenaustausch lautet somit

$$\Delta m_i(\vec{x}, t + \Delta t) = (f_I(\vec{x} + e_i, t) - f_i(\vec{x}, t)) \begin{cases} 0.0 & \text{Gasnachbar } i \\ \frac{\varepsilon(\mathbf{x} + e_i) + \varepsilon(\mathbf{x})}{2} & \text{Interfacenachbar } i \\ 1.0 & \text{Fluidnachbar } i \end{cases} \quad [12]$$

Die Masse $m(\vec{x}, t + \Delta t)$ berechnet sich durch Summation über alle mikroskopischen Geschwindigkeitsrichtungen

$$m(\vec{x}, t + \Delta t) = m(x, t) + \sum_{i=0}^{18} \Delta m_i(\vec{x}, t + \Delta t), \quad [13]$$

so dass für den Füllstand einer Zelle im Zeitschritt $t + \Delta t$

$$\varepsilon^{t+1} = \frac{m^{t+1}}{\rho^{t+1}} = \frac{m^t + \sum_{i=0}^{18} \Delta m_i^t}{\rho^{t+1}} = \frac{\varepsilon^t \rho^t + \sum_{i=0}^{18} \Delta m_i^t}{\rho^{t+1}} \quad [14]$$

folgt. Als Randbedingung auf den Interfaceknoten wird das Gleichgewicht von Fluiddruck und umgebendem Druck durch ein *Anti-Bounce-Back* auf Verteilungsebene sichergestellt [15].

3 Numerischer Wellentank

Die zu Grunde liegenden Gleichungen für den dreidimensionalen numerischen Wellentank (NWT, University of Rhode Island) werden im Folgenden kurz vorgestellt. Details sind in [7] zu finden. Es wird ein Geschwindigkeitspotential $\Phi(x, y, z, t)$ eingeführt, welches nicht-viskose und rotationsfreie, dreidimensionale Strömungen repräsentiert. Die Geschwindigkeit ist über $u_i^t = \nabla_i \Phi$ als Gradient dieses Potentials definiert. Dadurch kann die Kontinuitätsgleichung in ein Laplace-Problem überführt werden:

$$\nabla_j (u_i^t) = \nabla_j (\nabla_i \Phi) = \nabla^2 \Phi = 0. \quad [15]$$

Zur Lösung mit der BEM wird Gl. [15] in eine Randintegral-Gleichung (boundary integral equation, BIE) umgewandelt. Greens zweite Identität liefert

$$\alpha(\mathbf{x}_l) \Phi(\mathbf{x}_l) = \oint_{\Gamma} \left(G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_l) \frac{\partial \Phi(\mathbf{x})}{\partial n} - \Phi(\mathbf{x}) \frac{\partial G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_l)}{\partial n} \right) d\Gamma. \quad [16]$$

mit der Greenschen Funktion

$$G(x, x_l) = \frac{1}{4\pi r}, \quad \frac{\partial G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_l)}{\partial n} = -\frac{1}{4\pi} \frac{\mathbf{r} \mathbf{n}}{r^3} \quad [17]$$

mit $\mathbf{r} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_l$ und $r = |\mathbf{r}|$ als Abstand vom Punkt $\mathbf{x} = (x, y, z)$ zum Referenzpunkt $\mathbf{x}_l = (x_l, y_l, z_l)$, Normalenvektor \mathbf{n} und einer geometrischen Funktion $\alpha(\mathbf{x}_l) = \theta_l / (4\pi)$, die den äußeren Winkel des Randes an der Stelle x_l angibt.

Auswerten der Werte im Inneren: Die Werte für die Geschwindigkeit an einem beliebigen Punkt im Inneren des Gebiets werden im Anschluss an die Berechnung von Φ aus den Werten auf dem Rand wie folgt ermittelt:

$$u_i^t(\mathbf{x}) = \oint_{\Gamma} \left(\nabla G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_l) \frac{\partial \Phi(\mathbf{x})}{\partial n} - \Phi(\mathbf{x}) \nabla \frac{\partial G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_l)}{\partial n} \right) d\Gamma. \quad [18]$$

Zur Berechnung des Geschwindigkeitsgradienten $\nabla_i u_i^t(\mathbf{x})$ wird der ∇ -Operator erneut auf Gl. [18] angewendet.

Diskretisierung: Die Randintegralgleichung Gl. [16] wird durch die Randelementemethode (boundary element method, BEM) gelöst. Details zur dreidimensionalen BEM und den verschiedenen Lösungsverfahren können in [7] gefunden werden.

4 NWT-NS/LB Kopplung

Die Theorie der Potentialströmungen ist in der Umgebung von Festkörpern und im Brandungsbereich nicht mehr anwendbar. Lokales Brechen der Wellen und/oder signifikante Wirbelablösungen und viskose Dissipation wie etwa bei der Berechnung der Umströmung einer Windkraftanlage, eines schwimmenden Körpers oder eines teilweise eingespülten Objekts auf dem Seeboden müssen unbedingt erfasst werden. Um realistische Aussagen machen zu

können müssen hier die vollständigen Navier-Stokes-Gleichungen mit zusätzlichen Turbulenzmodellen gelöst werden. Anfangs- und Randbedingungen für das Navier-Stokes-Modell werden von einem anderen, vereinfachten Wellenmodell oder einer Wellentheorie ermittelt. Dieser Ansatz erfordert die Modellierung der gesamten Strömung in einem Navier-Stokes-Modell und den Beginn der Berechnung ausgehend von einem Ruhezustand (schwache Kopplung, Abschnitt 4.1). Eine Alternative ist, die durch Struktur, Seeboden oder Strand hervorgerufenen viskosen Anteile der Strömung als Überlagerung zu einem ansonsten nichtviskosen, rotationsfreien Strömungsfeld zu sehen und die Navier-Stokes-Gleichungen lediglich für diese viskosen Anteile in den relevanten Bereichen zu lösen (starke Kopplung, Abschnitt 4.2). Dieser Ansatz soll letztendlich auf unser LB-Verfahren als effiziente Alternative zu klassischen Lösern auf Basis der Navier-Stokes-Gleichungen übertragen werden (Erweiterung der starken Kopplung für die LBM, Abschnitt 4.3).

4.1 Schwache Kopplung

Schwach gekoppelte NWT-NS-Modelle sind seit Ende der 90er Jahre in Entwicklung. Grilli et al. zeigen beispielsweise Simulationen von Einzelwellen, die über einem ansteigenden Meeresboden brechen. Dabei wird ein 3D-Navier-Stokes-Löser mit einem Volume-of-Fluid-Ansatz zur Erfassung der freien Oberfläche mit den Ergebnissen aus einem numerischen Wellentank (NWT) initialisiert. In dieser schwachen Kopplung besteht nur eine initiale, unidirektionale Kopplung des NWT an das *Navier-Stokes-Modell*.

4.2 Starke Kopplung

Eine starke Kopplung erlaubt im Gegensatz dazu genauere und effizientere Simulationen der nichtlinearen Interaktionen zwischen Wellen und Ingenieurbauwerk oder Ufer. Dabei werden die Gleichungen des numerischen Wellentanks und die Navier-Stokes-Gleichungen gleichzeitig und in überlappenden Gebieten formuliert, so dass der NWT das Navier-Stokes-Gebiet vollständig beinhaltet. Letzteres umfasst nur eine kleinere Region um einen eingetauchten Festkörper, einen Strand oder ein Hindernis auf dem Meeresboden. Das Strömungsfeld, welches im numerischen Wellentank berechnet wird, dient in dieser Kopplung nicht als Initialisierung der NS-Simulation, sondern beeinflusst die Berechnungen über Quellterme in der Impulsgleichung des NS-Modells. Druck und Geschwindigkeit werden in einen rotationsfreien und einen viskosen Anteil zerlegt. Der rotationsfreie, nichtviskose Anteil wird aus der Potentialströmungstheorie ermittelt, die Navier-Stokes-Gleichungen werden dagegen nur für den viskosen Anteil gelöst. Grilli et al. haben einen vergleichbaren Ansatz implementiert, um Sedimenttransport um Festkörper zu simulieren, die im Meeresboden eingebettet sind [5]. Ein dreidimensionales Navier-Stokes-Modell mit LES-Turbulenzmodellierung wird dazu in einen numerischen Wellentank integriert. Der dynamische Druckgradient wird im NWT berechnet und als Quellterm in den Navier-Stokes-Gleichungen berücksichtigt. In neueren Arbeiten wurde das Problem neu implementiert und mit dem im Folgenden beschriebenen Ansatz berechnet [8], der auf das LB-Verfahren übertragen werden soll. Zunächst definiert man die Gesamtströmung als Überlagerung von nichtviskosem (*inviscid, I*) und viskosem (*perturbating, P*) Anteil

$$u_i = u_i^I + u_i^P \quad [19]$$

$$p_i = p_i^I + p_i^P \quad [20]$$

Durch diese Definition wird aus der Bilanzgleichung zur Impulserhaltung

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + (\nu + \nu_T) \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial \nu_T}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad [21]$$

mit Geschwindigkeit u_i , Druck p , Viskosität ν und turbulenter Viskosität ν_T durch Einsetzen von [19] und [20] folgender Ausdruck:

$$\frac{\partial u_i^P}{\partial t} + u_j^P \frac{\partial u_i^P}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^P}{\partial x_i} + (\nu + \nu_T) \frac{\partial^2 u_i^P}{\partial x_j^2} + \frac{\partial \nu_T}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i^P}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j^P}{\partial x_i} \right) - \underbrace{u_i^I \frac{\partial u_i^P}{\partial x_j} - u_j^P \frac{\partial u_i^I}{\partial x_j} + \frac{\partial \nu_T}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i^I}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j^I}{\partial x_i} \right)}_{\text{Zusatzterme}} \quad [22]$$

Dieser Umformung liegt die Tatsache zu Grunde, dass u_i^I ein gültiges Geschwindigkeitsfeld ist, welches die Euler-Gleichungen erfüllt und rotationsfrei ist. Zusätzlich zu den viskosen und turbulenten Termen auf der rechten Seite treten konvektionsähnliche Interaktionen zwischen den beiden Geschwindigkeitsfeldern u_i^I und u_i^P auf. Bis auf diese zusätzlichen Quellterme hat die Gleichung dieselbe Form wie Gl. [21]. Die Quellterme sind Funktionen von u_i^I und können aus dem dreidimensionalen Wellentank (analog zu Gl. [18]) gewonnen werden.

4.3 Erweiterung der starken Kopplung für die LBM

Dieser Ansatz wurde bereits erfolgreich für eine Koppelung eines NWT an einen Finite-Volumen-basierten Strömungslöser implementiert und soll nun auf den Lattice-Boltzmann-Ansatz von `VIRTUALFLUIDSclassic` ausgeweitet werden. Die zusätzlichen Quellterme in der Impulsgleichung werden hierbei über das *forcing* berücksichtigt. Dies bedeutet, dass Volumenkräfte \mathbf{F} wie beispielsweise Gravitation oder andere Impulsquellen in der LBM durch Addition eines Zusatzterms zu den Verteilungsfunktionen f_i berücksichtigt werden [12]:

$$\Delta f_i = 3\omega_i \rho \mathbf{e}_i \mathbf{F} \quad [23]$$

mit einem Wichtungsfaktor ω_i und der Dichte ρ . Somit kann sowohl der dynamische Druckgradient analog zu Gilbert et al. [5]) als auch der konvektionsähnliche Interaktionsterm (analog zu Grilli et al. [8] und Gl. [22]) als Impulsquelle in der LBM aufgebracht werden.

5 Ergebnis und Ausblick

Die oben dargelegten Konzepte einer starken Kopplung zwischen numerischem Wellentank und dreidimensionalem LB-Löser werden im Rahmen einer Kooperation des iRMB der TU Braunschweig mit dem Ocean Engineering Department der University of Rhode Island implementiert. Die Vor- und Nachteile der Kopplung über den dynamischen Druckgradienten (analog zu Gilbert et al. [5]) sowie über die zusätzlichen Quellterme in der Impulsgleichung (analog zu Grilli et al. [8]) werden zusammen mit ersten Ergebnissen auf dem Forum Bauinformatik vorgestellt.

Literaturverzeichnis

- [1] B. Ahrenholz. *Massively parallel Simulations of Multiphase- and Multicomponent Flows using Lattice Boltzmann Methods. PhD Thesis, iRMB, TU Braunschweig. 2009.*
- [2] P. L. Bhatnagar, E. P. Gross, and M. Krook. *A Model for Collision Processes in Gases. I. Small Amplitude Processes in Charged and Neutral One-Component Systems. In: Phys. Rev., 94(3). pp. 511–525. 1954.*
- [3] M. Bouzidi, M. Firdaouss, and P. Lallemand. *Momentum Transfer of a Lattice-Boltzmann Fluid with Boundaries. In: Physics of Fluids, 13. pp. 3452–3459. 2001.*

- [4] D. d’Humières, I. Ginzburg, M. Krafczyk, P. Lallemand, and L.-S. Luo. *Multiple Relaxation-Time Lattice Boltzmann Models in three Dimensions*. *Royal Society of London Philosophical Transactions Series A*, 360. pp. 437–451. 2002.
- [5] R. W. Gilbert, E. A. Zedler, S. T. Grilli, and R. L. Street. Progress on Nonlinear-Wave-Forced Sediment Transport Simulation. *In: IEEE J. of Oceanic Engng.*, 32(1). pp. 236–248. 2007.
- [6] I. Ginzburg and D. D’Humières. *Multireflection Boundary Conditions for Lattice Boltzmann Models*. *In: Physical Review E*, 68(6):066614.1–066614.30. 2003.
- [7] S. Grilli, P. Guyenne, and F. Dias. *A Fully Nonlinear Model for Three-Dimensional Overturning Waves over Arbitrary Bottom*. *In: International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 35(7). pp. 829–867. 2001.
- [8] S. T. Grilli, J. Harris, and N. Greene. *Modeling of Wave-induced Sediment Transport in the Shoaling Zone in the Presence of Bottom Obstacle*. *In: 31st Intl. Coastal Engineering Conference, Hamburg, Germany*. 2008.
- [9] S. T. Grilli, J. Skourup, and I. A. S. . *The Modeling of Highly Nonlinear Waves: A Step Toward the Numerical Wave Tank*. *In: Proc. 10th Intl. Conf. on Boundary Elements*, pp.549–564. 1988.
- [10] S. T. Grilli, I. A. Svendsen, and R. Subramanya. *Breaking Criterion and Characteristics for Solitary Waves on Slopes*. *In: J. Waterway Port Coastal and Ocean Engng.*, 123(3). pp. 102–112. 1997.
- [11] S. T. Grilli, S. Vogelmann, and P. Watts. *Development of a 3D Numerical Wave Tank for Modeling Tsunami Generation by Underwater Landslides*. *In: Engng. Analysis Boundary Elemt.*, 26(4). pp. 301–313. 2002.
- [12] Z. Guo, C. Zheng, and B. Shi. *Discrete Lattice Effects on the Forcing Term in the Lattice Boltzmann Method*. *In: Physical Review E*, 65(4):046308.1 – 046308.6. 2002.
- [13] C. Hirt and B. Nichols. *Volume of Fluid Method for Dynamics of Free Boundaries*. *In: Journal of Computational Physics*, 39. pp. 201–221. 1981.
- [14] M. Junk, A. Klar, and L.-S. Luo. *Asymptotic Analysis of the Lattice Boltzmann Equation*. *In: Journal of Computational Physics*, 210. pp. 676–704. 2005.
- [15] C. Körner, M. Thies, T. Hofmann, N. Thürey, and U. Rüde. *Lattice Boltzmann Model for Free Surface Flow for Modeling Foaming*. *In: Journal of Statistical Physics*, 121(1-2). pp. 179–196(18). 2005.
- [16] M. Krafczyk, J. Tölke, and L.-S. Luo. *Large-Eddy Simulations with a Multiple-Relaxation-Time LBE Model*. *In: Int. J. Mod. Phys. B*, 17. pp. 33–39. 2003.
- [17] Y. H. Quian, D. d’Humieres, and P. Lallemand. *Lattice BGK Models for Navier Stokes Equations*. *In: Europhysics Letters*, 17. pp. 479–484. 1992.
- [18] S. Succi. *The Lattice Boltzmann Equation*. Clarendon Press Oxford. 2001.
- [19] N. Thürey and U. Rüde. *Stable Free Surface Flows with the Lattice Boltzmann Method on Adaptively Coarsened Grids*. *In: Computing and Visualization in Science*, 12(5). 2009.

Simulationsbasierte Optimierung von Bauablaufplänen mit Hilfe von Pareto Simulated Annealing

Matthias Hamm

Bauhaus-Universität Weimar, Juniorprofessur Theoretische Methoden des Projektmanagements, 99421 Weimar, Deutschland, E-mail: matthias.hamm@uni-weimar.de, Telefon: +49(0)3643/584585

Kurzfassung

Im Rahmen der Bauablaufplanung komplexer Bauprojekte sind eine Vielzahl an komplexen, teilweise widersprüchlichen Zielkriterien sowie verschiedene Ausführungsrestriktionen wie technologische Abhängigkeiten oder Ressourcenbeschränkungen, zu berücksichtigen. In der Regel führt dies zu einem NP-vollständigen, multikriteriellen Optimierungsproblem und verhindert die analytische Berechnung eines optimalen Bauablaufs. Eine Alternative stellt die Anwendung so genannter *Metaheuristiken* dar, welche die Ermittlung fast-optimaler Ablaufpläne in akzeptabler Rechenzeit erlauben. Im Rahmen dieses Beitrags wird ein auf der bekannten Metaheuristik des *Simulated Annealing* basierendes Verfahren vorgestellt. Die Ermittlung von Lösungen erfolgt hier auf Grundlage eines *Constraint-basierten* Simulationsansatzes. Das Ergebnis des Optimierungsprozesses ist nicht eine optimale Lösung, sondern – dem integrierten Konzept der *Pareto-Optimalität* folgend – eine Menge Pareto-optimaler Bauabläufe bezüglich der definierten Zielkriterien unter Einhaltung aller Restriktionen.

Stichworte

Bauablaufplanung, multikriterielle Optimierung, Constraint Satisfaction, Simulated Annealing, Pareto-Optimalität

1 Einleitung

Die Erstellung effizienter Bauablaufpläne für komplexe Bauprojekte stellt eine höchst anspruchsvolle Aufgabe dar: Die immense Anzahl unterschiedlicher Ausführungsalternativen, komplexe Randbedingungen wie beispielsweise technologische Abhängig-

keiten oder Ressourcenbeschränkungen, sowie das Vorhandensein mehrerer, teilweise widersprüchlicher Zielkriterien führen dazu, dass die Ermittlung optimaler Pläne ein NP-vollständiges, multikriterielles Optimierungsproblem darstellt. Eine analytische Berechnung optimaler Bauablaufpläne anhand exakter mathematischer Methoden ist daher äußerst rechenintensiv und mit dem heutigen Stand der Technik kaum möglich.

Eine Alternative stellt die Anwendung der Metaheuristiken dar, welche es ermöglichen, sehr gute Lösungen in akzeptabler Rechenzeit zu ermitteln. Eine der bekanntesten ist die *Simulated Annealing-Metaheuristik* [1, 2]. Inspiriert von einem Prozess der Metallverarbeitung, vermeidet es dieses Verfahren, in einem lokalen Optimum gefangen zu sein, indem während des Optimierungsprozesses mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit Verschlechterungen bezüglich des Zielfunktionswertes akzeptiert werden.

Zur Beherrschung der Problematik verschiedener, teilweise gegenläufiger Zielkriterien wurde von Czyzak und Jaszkiwicz [3] ein modifizierter Algorithmus des Simulated Annealing entwickelt, welcher auf dem Konzept der Pareto-Optimalität basiert und die Grundlage des hier vorgestellten Ansatzes zur Optimierung von Bauablaufplänen darstellt. Als Ergebnis einer Optimierung mittels des so genannten *Pareto-Simulated Annealing* ergibt sich nicht eine einzige optimale Lösung, sondern eine Menge an Lösungen, welche bezüglich der vorgegebenen Zielkriterien Pareto-optimal sind.

Innerhalb des vorgestellten Optimierungsprozesses basiert die Generierung von Nachbarlösungen auf dem *Constraint Satisfaction-Ansatz* [4]. Indem die vorgegebenen Ausführungsbedingungen in einem ereignisdiskreten Simulationsansatz zur Ermittlung zulässiger Ablaufpläne berücksichtigt werden, ist eine sehr schnelle Generierung zulässiger Nachbarlösungen möglich [5]. In Kapitel 2 wird die Funktionsweise der Constraint-basierten Generierung von zulässigen Nachbarlösungen vorgestellt.

Die Suche nach effizienten Bauabläufen bezüglich mehrerer Zielkriterien führt zu einem multikriteriellen Optimierungsproblem. In Kapitel 3 wird die Möglichkeit der Bewertung von Nachbarlösung bezüglich mehrerer Zielkriterien unter Anwendung des Ansatzes der Pareto-Optimalität beschrieben. Die Grundlagen der Metaheuristik des Simulated Annealing werden in Kapitel 4 vorgestellt, die Funktionsweise des modifizierten Pareto Simulated Annealing-Ansatzes auf Basis der Constraint-basierten Simulation befindet sich im fünften Kapitel. Das abschließende Kapitel 6 enthält eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten Aspekte sowie einen kurzen Ausblick auf zukünftige Fragestellungen.

2 Constraint-basierte Simulation

Die Beschreibung komplexer Bauprojekte mittels Constraint Satisfaction ermöglicht die Generierung zulässiger Bauablaufpläne [5]. Entsprechend der Struktur von Constraint Satisfaction-Problemen [6] werden hier die einzelnen Arbeitsschritte – vorhandenes Material – zur Verfügung stehende Arbeitskräfte mit ihren Qualifikationen sowie die objektbezogenen Eigenschaften des Baustellengeländes mittels Variablen modelliert. *Constraints* ergeben sich durch den Bedarf an maschineller Ausstattung, dem Potenzial an Arbeitskräften, der Verfügbarkeit von Materialien, den vorliegenden Sicherheitsaspekten sowie durch technologische Abhängigkeiten zwischen einzelnen Arbeitsschritten.

Lösungen solcher Constraint Satisfaction-Probleme sind zulässige Bauabläufe mit erfüllten Constraints. Die analytische Berechnung von Lösungen eines komplexen Constraint Satisfaction Problems ist außerordentlich zeitaufwendig. Eine Möglichkeit zulässige Lösungen in sehr kurzer Zeit zu generieren bietet die Anwendung von Simulation. Innerhalb des Forschungsprojektes SIMoFIT („Simulation of Outfitting Processes in Shipbuilding and Civil Engineering“) wurde ein Constraint-basierter Simulationsansatz entwickelt, welcher die Generierung möglicher Ablaufpläne unter Berücksichtigung vorliegender Constraints in einer ereignisdiskreten Simulationsumgebung ermöglicht [5].

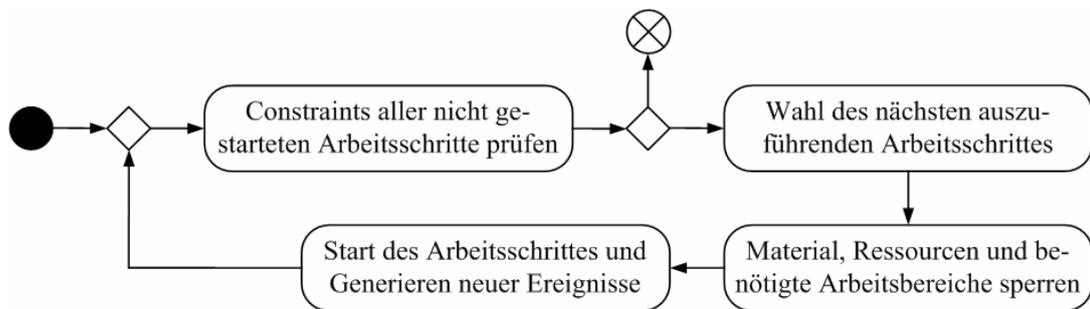


Abb. 1: UML-Diagramm der Prozedur *Starting Tasks*.

In diesem Simulationskonzept ermöglichen die Prozeduren *Starting Tasks* und *Stopping Tasks* die Generierung verschiedener Ereignisse. Beim Eintreten eines neuen Ereignisses, d.h. zum Beispiel nach Beendigung eines Arbeitsschrittes, werden alle noch nicht gestarteten Arbeitsschritte bezüglich ihrer Constraints überprüft (siehe Abb. 1). Aus der Menge der ausführbaren Arbeitsschritte wird ein Schritt ausgewählt und gestartet, die benötigten Ressourcen werden gesperrt und der Arbeitsschritt unter einer fortlaufenden Nummer in

der so genannten *Task Execution List (TEL)* gespeichert. Nach Beendigung eines Arbeitsschrittes werden die gesperrten Ressourcen wieder freigegeben und der Arbeitsschritt als beendet markiert. Dieser Ablauf wird wiederholt, bis alle Arbeitsschritte ausgeführt wurden. Während eines Simulationslaufs werden alle Aktionen inklusive den gesperrten und wieder freigegebenen Ressourcen, sowie der entstehenden Ausführungsreihenfolge (TEL) aufgezeichnet. Mit Beendigung der Simulation ist ein zulässiger Ablaufplan einschließlich zugehöriger Material- und Arbeitskräfteanforderungen generiert.

3 Multikriterielle Optimierung

Bei der Modellierung von Bauprojekten ist eine Reduzierung des Optimierungsproblems auf eine einzige Zielfunktion oftmals nicht möglich. Stattdessen ist es erforderlich, mehrere, teilweise widersprüchliche Zielstellungen wie z.B. Zeit und Qualität zu verfolgen. Dies führt zu einem so *multikriteriellen Optimierungsproblem*. Verschiedene skalare Methoden wie *Goal-Programming* oder die Implementierung einer gewichteten Aggregationsfunktion ermitteln eine optimale Lösung hinsichtlich vorgegebener Eingangsparameter [7]. Diesem *a priori*-Ansatz steht die Möglichkeit gegenüber, dem Entscheider eine Auswahl an guten Lösungen zu präsentieren, aus welchen dieser eine optimale Lösung entsprechend seinen persönlichen Präferenzen auswählt [8]. Dieser *a posteriori*-Ansatz kommt im vorliegenden Beitrag zur Anwendung.

Grundlage ist das Konzept der Pareto-Optimalität. Nach diesem Optimierungsansatz dominiert eine Lösung eine andere Lösung, wenn sie bezüglich keines der Zielkriterien schlechter, sowie für mindestens eines der Zielkriterien besser bewertet wird als die dominierte Lösung. Folglich dominiert eine Lösung A eine Lösung B , wenn für den Fall von M Zielkriterien gelten:

$$f_i(A) \leq f_i(B) \quad \forall i \in \{1, \dots, M\} \quad \text{und}$$

$$\exists j \in \{1, \dots, M\} : f_j(A) < f_j(B). \quad [1]$$

Die beschriebene Dominanz-Relation ist keine totale Ordnung. Somit existieren Lösungen, welche sich nicht gegenseitig dominieren. Wird eine Lösung von keiner anderen Lösung dominiert, so wird sie als Pareto-optimal bezeichnet. Alle während des Optimie-

rungsprozesses ermittelten Pareto-optimalen Lösungen werden im so genannten Pareto-Archiv gespeichert. Falls während der Optimierung eine neue Lösung bereits gespeicherte Lösungen dominiert, werden diese aus dem Archiv entfernt und die neue Lösung rückt stattdessen ins Archiv [8, 9]. Nach Abschluss des Optimierungsvorgangs hat der Entscheider die Möglichkeit, aus der Menge der im Pareto-Archiv gespeicherten Lösungen jene auszuwählen, welche seinen individuellen Präferenzen entspricht.

4 Simulated Annealing

Simulated Annealing ist ein bekannter Optimierungsansatz zur Lösung komplexer kombinatorischer Probleme [1, 2]. Die Grundlage bildet ein Verfahren aus der Metallverarbeitung, bei welchem die langsame Abkühlung eines sehr hoch erhitzten Metalls betrachtet wird. Hierbei ordnen sich die Moleküle so an, dass ein energieärmer, fast-optimaler Zustand erreicht wird [10, 11, 12]. Übertragen auf eine Optimierungssituation repräsentieren die Lösungen des Optimierungsproblems mögliche Molekülkonstellationen des Metalls. Der Zielfunktionswert einer Lösung entspricht somit dem internen Energiestatus des Metalls.

Ausgehend von einer hohen Anfangstemperatur sowie einer zufälligen Startlösung, wird aus einer bestimmten Nachbarschaft der aktuellen Lösung eine neue Lösung generiert. Besitzt diese neue Lösung einen besseren Zielfunktionswert als die aktuelle Lösung, wird diese durch die neue Lösung ersetzt. Anderenfalls wird auf Basis der aktuellen Temperatur eine Wahrscheinlichkeit berechnet, entsprechend welcher auch die schlechtere Nachbarlösung akzeptiert wird. Durch diese Eigenschaft, mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auch Verschlechterungen zu akzeptieren, besitzt das Verfahren des Simulated Annealing die Fähigkeit, ein lokales Optimum wieder verlassen zu können. Die Wahrscheinlichkeit Verschlechterungen zu akzeptieren, ist abhängig von der aktuellen Temperatur und sinkt im Verlauf des Algorithmus (vgl. Abb. 2).

Wird eine Nachbarlösung akzeptiert, stellt sie im weiteren Verlauf des Optimierungsprozesses die Ausgangslösung dar, aus deren Nachbarschaft eine neue Lösung generiert wird. Entscheidend für die Implementierung der Simulated Annealing-Metaheuristik ist zum einen die Definition der Nachbarschaft einer aktuellen Lösung, Zum anderen muss definiert werden, wie die Wahrscheinlichkeit der Akzeptanz schlechterer Nachbarlösungen berechnet wird. Zusätzliche Parameter, welche zu Beginn des Optimierungsprozesses bestimmt werden müssen, betreffen die Starttemperatur, die Abkühlungsrate sowie das Abbruchkriterium.

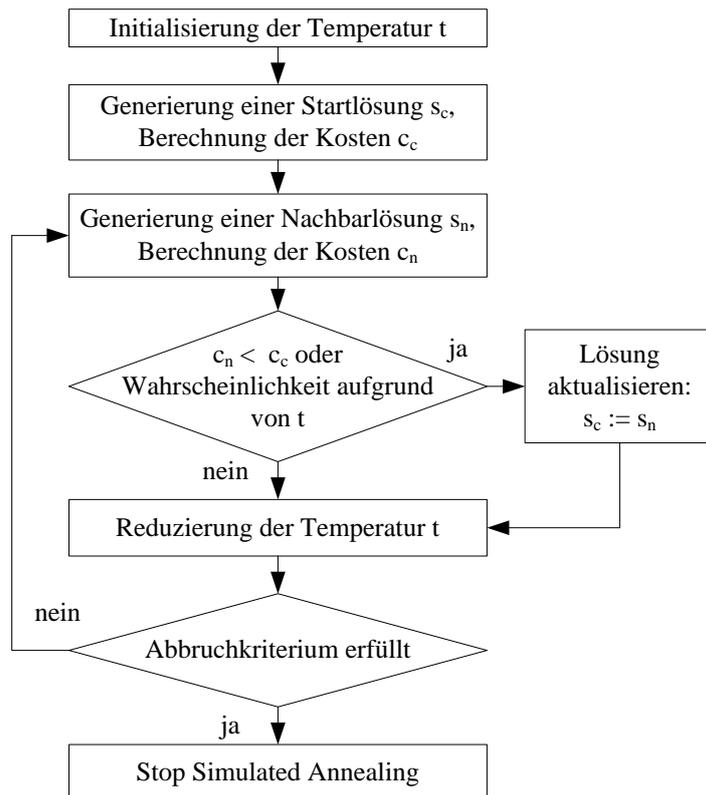


Abb. 2: Allgemeiner Simulated Annealing-Algorithmus [10].

5 Constraint-basiertes Pareto Simulated Annealing

Der im Folgenden vorgestellte Algorithmus generiert mittels Constraint-basierter Simulation in Kombination mit Simulated Annealing fast-optimale Ablaufpläne für Bauprojekte. Ergebnis des Optimierungsprozesses ist dabei nicht ein einziger optimaler Bauablauf, sondern eine Menge Pareto-optimaler Ablaufpläne. Aus diesen wählt der Entscheider in einem *a posteriori* stattfindenden Entscheidungsfindungsprozess entsprechend seinen Präferenzen. Ähnliche Ansätze finden sich bei Smith et al. [9], Bandyopadhyay et al. [13] und Suppapitnarm et al. [14]. Im Gegensatz zu den Ansätzen in der Literatur wird im vorgestellten Konzept Pareto Simulated Annealing mit einem Constraint-basierten Simulationsansatz kombiniert. Nachfolgend werden charakterisierende Eigenschaften des Ansatzes im Detail erläutert.

5.1 Nachbarschaft einer Lösung

Die Definition der Nachbarschaft einer vorhandenen Lösung stellt einen entscheidenden Unterschied zwischen den genannten Ansätzen und dem entwickelten Algorithmus dar, in

welchem die Generierung von Nachbarlösungen auf Grundlage der Constraint-basierten Simulation erfolgt. Ausgehend von der aktuellen Lösung werden während eines Simulationslaufs zu verschiedenen Zeitpunkten, Ereignisse genannt, Modifikationen des aktuellen Ablaufplans unter Berücksichtigung vorhandener Constraints vorgenommen.

Beim Eintritt eines Ereignisses wird die Menge der ausführbaren Arbeitsschritte bestimmt. Sind mehrere Arbeitsschritte ausführbar, werden in Bezugnahme auf die TEL der aktuellen Lösung zwei zufällig ausgewählte Arbeitsschritte ausgetauscht. Alle anderen Arbeitsschritte werden in derselben Reihenfolge zur Ausführung angeordnet wie in der aktuellen TEL.

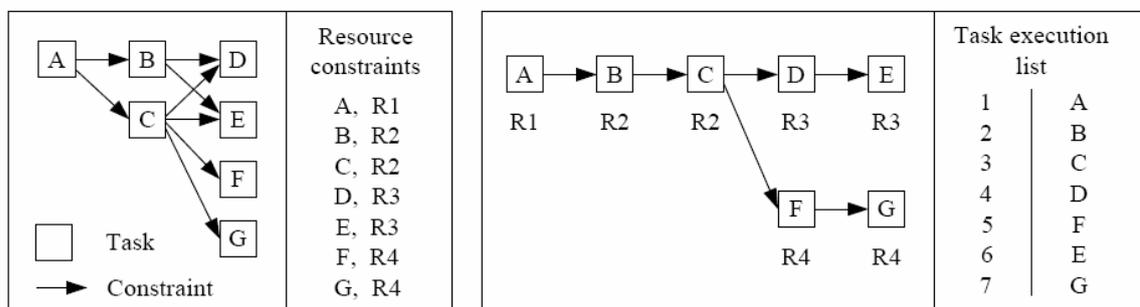


Abb. 3: Topologische Sortierung von Arbeitsschritten (links), Startlösung für die Nachbarschaftssuche (rechts).

Abb. 3 zeigt ein einfaches Planungsproblem, bestehend aus sieben Arbeitsschritten, vier verschiedenen Ressourcen, sowie den links dargestellten Abhängigkeiten aufgrund technologischer Randbedingungen. Eine mögliche Startlösung ist rechts abgebildet. Die zugehörige Task Execution List ist $\langle A, B, C, D, F, E, G \rangle$.

Ausgehend von dieser Lösung läuft die Generierung einer zulässigen Nachbarlösung wie folgt ab. Aufgrund der vorliegenden technologischen Abhängigkeiten muss Arbeitsschritt A als erstes ausgeführt werden. Mit dessen Beendigung tritt ein Ereignis ein und die Menge der ausführbaren Arbeitsschritte wird ermittelt. Dies sind die Schritte $\langle B, C \rangle$. Die beiden Arbeitsschritte werden ausgetauscht und Arbeitsschritt C wird ausgeführt. Alle Austausche werden in einer kapazitätsbegrenzten Tabu Liste gespeichert und sind für spätere Optimierungsschritte gesperrt. Bei Erreichen der Kapazitätsgrenze der Tabu Liste werden die gesperrten Austausche entsprechend der *FIFO*-Methode wieder freigegeben. Bei Fortführung der Prozedur ergibt sich stets eine zulässige Nachbarlösung. Ein möglicher Ablaufplan ist in Abbildung 4 abgebildet. Ist eine Nachbarlösung generiert, wird entschieden, ob diese als aktuelle Lösung akzeptiert wird.

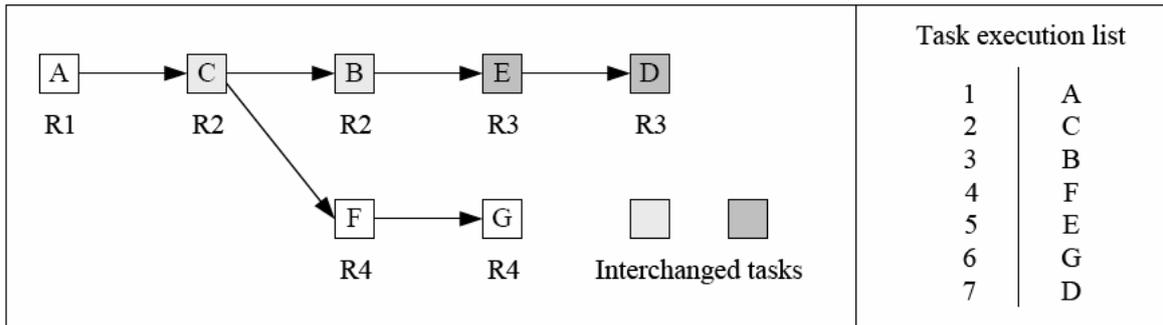


Abb. 4: Neue Lösung nach Austausch von zwei Arbeitsschritten.

5.2 Amount of Domination und Akzeptanz-Regeln

Eine Nachbarlösung wird immer als neue aktuelle Lösung akzeptiert, wenn sie von der aktuellen Lösung nicht dominiert wird. Anderenfalls entscheiden die aktuelle Temperatur sowie die so genannte *Amount of Domination-Kennzahl* darüber, ob die dominierte Nachbarlösung dennoch als neue aktuelle Lösung übernommen wird und somit die Grundlage für die Generierung neuer Nachbarlösungen wird. Sind die aktuelle Lösung A , sowie die Nachbarlösung B gegeben, ist die Amount of Domination-Kennzahl definiert als:

$$dom_{A,B} = \prod_{i=1, f_i(A) \neq f_i(B)}^M \left(\left| \frac{f_i(A) - f_i(B)}{R_i} \right| \right). \quad [2]$$

Dabei beschreibt M die Anzahl an Zielkriterien und R_i die Spannweite der Funktionswerte der i -ten Zielfunktion. Die Wahrscheinlichkeit der Akzeptanz einer dominierten Nachbarlösung als neue aktuelle Lösung ist gegeben durch:

$$prob = 1 - \exp(-dom_{A,B} * temp). \quad [3]$$

Zu Beginn des Optimierungsprozesses beträgt diese Wahrscheinlichkeit nahezu 1, was bedeutet, dass fast alle Nachbarlösungen akzeptiert und somit auch Verschlechterungen in Kauf genommen werden. Aufgrund abnehmender Temperatur im Verlauf der Optimierung sinkt auch die Wahrscheinlichkeit dominierte Lösungen zu akzeptieren. Die vorzuziehenden Temperatur-Parameter spielen hierfür eine entscheidende Rolle.

5.3 Temperatur-Parameter

Vor Beginn eines Optimierungsprozesses ist es notwendig, verschiedene Temperatur-Parameter zu definieren. Der offensichtlichste ist die Anfangstemperatur, welche im entwickelten Algorithmus entsprechend der von Kirkpatrick [15] beschriebenen Methode bestimmt wird. Ausgehend von einer relativ niedrigen Temperatur (z.B. 10) sowie einer vorgegebenen Akzeptanz-Wahrscheinlichkeit dominierter Nachbarlösungen (z.B. 0,8), wird eine gewisse Anzahl an Testläufen durchgeführt. Falls weniger als 90 Prozent der dominierten Nachbarlösungen akzeptiert werden, wird die Temperatur verdoppelt und erneut Testläufe durchgeführt. Dies geschieht so lange, bis mindestens 90 Prozent der dominierten Nachbarlösungen akzeptiert werden.

Im Laufe des Optimierungsprozesses sinkt das Temperaturniveau. Ausgehend von einer aktuellen Temperatur T_k wird das nächstniedrigere Temperaturniveau T_{k+1} in Abhängigkeit der sogenannten Abkühlungsrate α ($\alpha < 1$) berechnet durch:

$$T_{k+1} = \alpha * T_k. \quad [4]$$

Je Temperaturniveau wird eine bestimmte Anzahl an Iterationen durchgeführt, d.h., Nachbarlösungen ermittelt und gegebenenfalls im Pareto-Archiv gespeichert. Diese Anzahl an Iterationen je Temperaturniveau nimmt im Verlauf des Optimierungsprozesses zu. Ausgehend von N_0 Iterationen auf dem Niveau der Anfangstemperatur, wächst diese Anzahl jeweils um den konstanten Faktor ρ :

$$N_{k+1} = \rho * N_k. \quad [5]$$

Als Abbruchkriterien des Optimierungsprozesses wird zum einen eine Mindesttemperatur definiert, zum anderen stoppt der Algorithmus, falls für eine gewisse Anzahl an Temperatur-Verringerungen keine Nachbarlösung akzeptiert worden ist.

5.4 Constraint-basierter Pareto Simulated Annealing Algorithmus

Abbildung 5 zeigt den vollständigen Constraint-basierten Pareto Simulated Annealing-Algorithmus. Die Generierung zulässiger Nachbarlösungen erfolgt auf der Basis

Constraint-basierter Simulation. Die Bewertung von Nachbarlösungen hinsichtlich der verschiedenen Zielkriterien basiert auf dem Ansatz der Pareto-Dominanz. Pareto-optimale Lösungen werden in einem Pareto-Archiv gespeichert. Basierend auf dem Simulated Annealing Konzept werden mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auch dominierte – und somit schlechtere – Nachbarlösung als neue aktuelle Lösung akzeptiert.

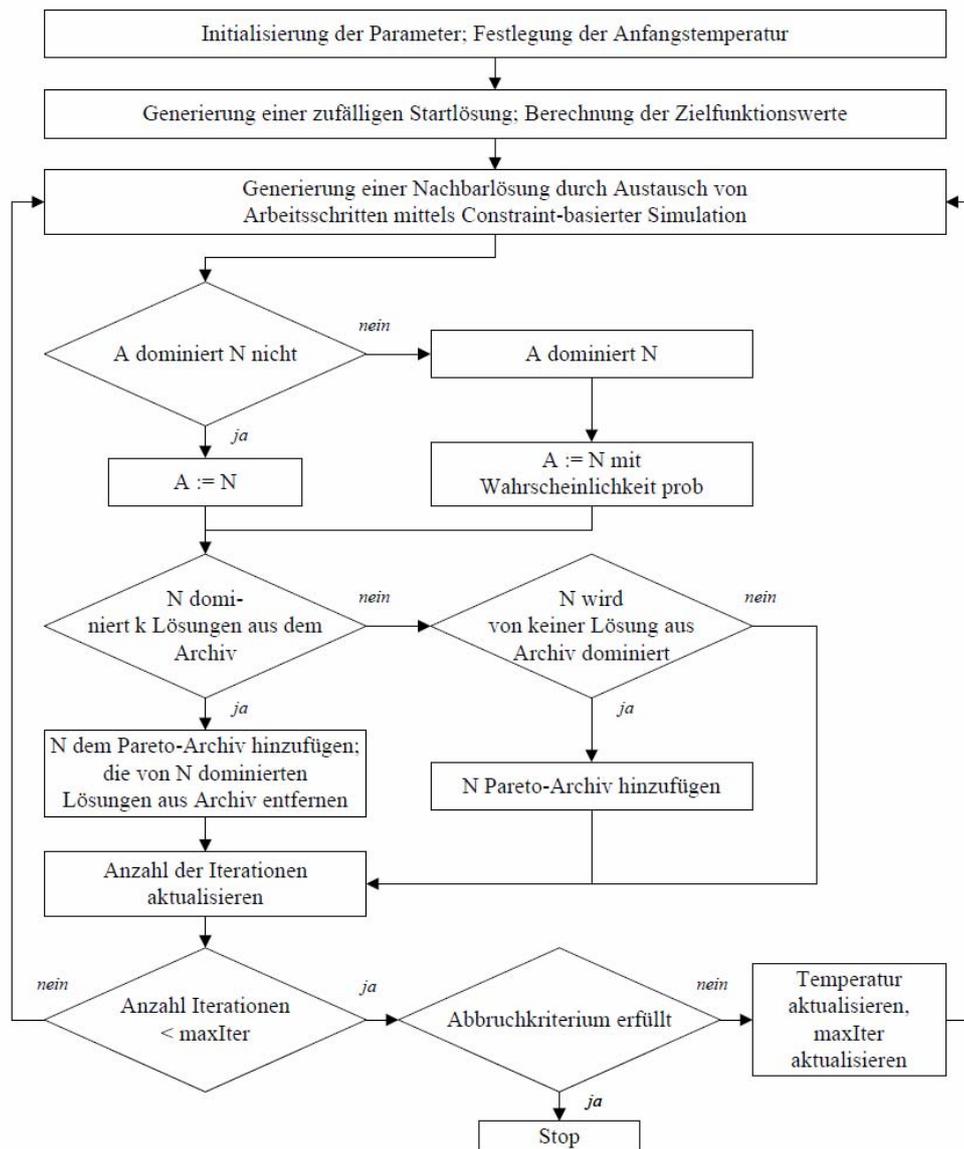


Abb. 5: Constraint-basierter Pareto-Simulated Annealing-Algorithmus.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag präsentiert einen Algorithmus zur Ermittlung fast-optimaler Ablaufpläne für komplexe Bauprojekte. Da die analytische Berechnung optimaler Ablaufpläne mit exakten mathematischen Methoden zu einem NP-schweren, multikriteriellen Optimierungsproblem führt, beruht der vorgestellte Algorithmus auf dem Konzept der Simulated Annealing-Metaheuristik.

Der Ansatz der Pareto-Optimalität wird angewendet um die Güte ermittelter Lösungen bezüglich mehrerer Zielkriterien zu bestimmen. Die Generierung von Nachbarlösungen erfolgt durch den Austausch von Arbeitsschritten mittels Constraint-basierter Simulation. Pareto-optimale Lösungen werden im so genannten Pareto-Archiv gespeichert. Das Ergebnis eines Optimierungsprozesses ist folglich nicht eine optimale Lösung, sondern eine Menge Pareto-optimaler Lösungen, welche dem Entscheider in einem a-posteriori stattfindenden Entscheidungsfindungsprozess zur Auswahl gestellt werden.

Momentan erfolgt die Implementierung des vorgestellten Algorithmus in einer ereignisdiskreten Simulationsumgebung [16]. Ziel ist es, die Effizienz des Optimierungskonzeptes mittels einer Fallstudie zu überprüfen.

Mögliche zukünftige Forschungsthemen sind zum einen die Modellierung unsicherer Optimierungsziele wie Qualität oder Robustheit. Zum anderen stellt die Integration von effektiven Bauablaufstrategien als so genannte *Soft-Constraints* einen interessanten Ansatz für weitere Untersuchungen dar [17].

Literaturverzeichnis

- [1] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi. *Optimization by Simulated Annealing*, Science. 1983.
- [2] V. Cerny. *A Thermo Dynamical Approach to the Travelling Salesman Problem*. In: *Journal of Optimization Theory and Applications*. 1985.
- [3] P. Czyzak and A. Jaskiewicz. *Pareto Simulated Annealing - A Metaheuristic Technique for Multiple Objective Combinatorial Optimization*. In: *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*. 1998.
- [4] J. Blazewicz, K. Ecker, E. Pesch, G. Schmidt, and J. Weglarz. *Handbook on Scheduling. From Theory to Applications*. 2007.
- [5] U. Beißert, M. König, and H.-J. Bargstädt. *Constraint-Based Simulation of Outfitting Processes in Building Engineerign*, 24th W78 Conference. 2007.

- [6] F. Rossi, P. van Beek, and T. Walsh. *Handbook of Constraint Programming*, Elsevier. 2006.
- [7] Y. Collette and P. Siarry. *Multiobjective Optimization – Principles and Case Studies*. 2003.
- [8] M. Ehrgott. *Multicriteria Optimization*. 2005.
- [9] K. I. Smith, R. M. Everson, and J. E. Fieldsend. *Dominance Measures for Multi-Objective Simulated Annealing*. *Proceedings of Congress on Evolutionary Computation*. 2004.
- [10] E. Aarts, J. Korst, and W. Michiels. *Simulated Annealing*. In: *Search Methodologies - Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques*. 2005.
- [11] J. Dreo, P. Siarry, A. Petrowski, and E. Taillard. *Metaheuristics for Hard Optimization*. 2006..
- [12] K. Y. Lee and M. A. El-Sharkawi. *Modern Heuristic Optimization Techniques*. 2008.
- [13] S. Bandyopadhyay, S. Saha, U. Maulik, and K. Deb. *A Simulated Annealing-Based Multiobjective Optimization Algorithm*. *AMOSA, IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2008.
- [14] A. Suppapitnarm, K.A. Seffen, G.T. Parks and P.J. Clarkson. *A Simulated Annealing Algorithm for Multiobjective Optimization*. 2005.
- [15] S. Kirkpatrick. *Optimization by Simulated Annealing*. *Quantitative Studies*. In: *Journal of Statistical Physics*. 1984.
- [16] M. König, U. Beißert, D. Steinhauer, and H.-J. Bargstädt. *Constraint-Based Simulation of Outfitting Processes in Shipbuilding and Civil Engineering*. *6th Eurosim Congress in Modeling and Simulation*. 2007.
- [17] U. Beißert, M. König, and H.-J. Bargstädt. *Execution Strategy Investigation Using Soft Constraint-Based Simulation*. *IABSE ICT Conference 2008*.

Virtual Climate Chamber

Entwicklung einer interaktiven Simulationsumgebung für thermische Komfortanalysen

Jérôme Frisch, Christoph van Treeck

Technische Universität München, Lehrstuhl für Computation in Engineering, 80290 München, Deutschland, E-mail: frisch@bv.tum.de, Telefon: +49(0)89/28925128

Kurzfassung

Im Zuge der integralen Gebäudeplanung werden heutzutage vermehrt Anstrengungen unternommen, sodass ohne viel Aufwand ein möglichst optimales Innenraumklima für Benutzer erzeugt werden kann. Vor allem in den frühen Planungsphasen ist diese Art der Optimierung sehr wichtig, da dort noch ohne wesentliche Kostensteigerungen in das Design eingegriffen werden kann.

In diesem Beitrag wird ein Konzept vorgestellt, das es ermöglicht, den Einfluss des Raumklimas auf einen späteren Benutzer interaktiv zu simulieren, um den beschriebenen Optimierungsprozess sowohl zu beschleunigen als auch teilweise zu automatisieren. Zu diesem Zweck wurde die *Virtual Climate Chamber* entworfen, die eine interaktive Umgebung zur Simulation menschlicher Thermoregulation darstellt. Zudem wird ein Beispiel berechnet, um die Anwendbarkeit der *Virtual Climate Chamber* zu zeigen.

Stichworte

Menschliche Thermoregulation, interaktive thermische Simulation, graphische Benutzeroberfläche, Datensynchronisation, Fiala Modell, THESEUS-FE

1 Einleitung

Für die objektive Bewertung der Qualität des Innenraumklimas stehen in nationalen und internationalen Normen wie zum Beispiel der DIN EN ISO 7730 [4] oder ANSI/ASHRAE Standard 55 [1] diverse Verfahren zur Verfügung. Das am weitesten verbreitete Modell von Fanger [5] betrachtet die stationäre Energiebilanz des Körpers als Gesamtsystem und liefert ein *Predicted Mean Vote* (PMV) zurück. Das PMV ist ein

Index, der den Durchschnittswert für die Klimabeurteilung durch eine große Personengruppe anhand einer siebenstufigen Klimabeurteilungsskala nach ISO 7730 [4] vorher sagt. Ein PMV Wert kann in einen *Predicted Percent Dissatisfied Index (PPD)* umgerechnet werden kann, der besagt, wie viele Personen sich aus einer größeren Gruppe bei den gegebenen Bedingungen unwohl fühlen würden. Dieses Modell kann allerdings nur bei homogenen, uniformen und stationären Umgebungen nahe der thermischen Neutralität eines Menschen eingesetzt werden. Das Verfahren eignet sich gut, um die Behaglichkeit im Rahmen einer Ganzjahresbetrachtung zu analysieren. Bei der Auslegung von raumluftechnischen Anlagen und Raumkonditionierungssystemen spielt jedoch auch der Aspekt der lokalen thermischen Behaglichkeit eine wichtige Rolle. Beispielsweise führen Strahlungsasymmetrien oder Zugeffekte zu nicht-uniformen und transienten Zuständen, bei denen der Körper nicht mehr nur „als Ganzes“ bewertet werden kann.

Um den Einfluss des Raumklimas auf eine menschliche Testperson im Detail zu untersuchen, wurde eine Virtual Climate Chamber (VCC) entwickelt. Es handelt sich hierbei um eine interaktive Simulationsumgebung, in der ein Benutzer Randbedingungen während einer laufenden Simulation eines Gebäudeteils interaktiv beeinflussen und Ergebnisse der veränderten Simulation sofort betrachten kann. Es können Oberflächentemperaturen auf der Bekleidung sowie Hauttemperaturen oder Äquivalenttemperaturen nach DIN 14505-2 [3] dargestellt werden. Diese können wiederum als Eingangswerte für ein Bewertungsschema hinsichtlich einer lokalen thermischen Behaglichkeitsanalyse verwendet werden. Zusätzlich können auch integrale Werte für den gesamten Körper bestimmt und ausgegeben werden.

Die Entwicklung eines solchen Simulationssystems wird in den folgenden Punkten erläutert und beschrieben. Dabei wird besonderer Wert auf die programmtechnische Umsetzung der VCC gesetzt. Weitere Einzelheiten können ebenfalls Frisch [7] oder van Treeck et al. [13] entnommen werden.

2 Berechnungsmodell

Zur Simulation des menschlichen Blutkreislaufes und Stoffwechsels wird das Thermoregulationsmodell von Fiala [6] verwendet. Dieses numerische Modell basiert zum einen auf einem so genannten passiven System, das für die physikalische Beschreibung des Körpers zuständig ist, die Wärmeübertragung im Gewebe und zwischen einzelnen Elementen berechnet, und den Wärmeaustausch mit der Umgebung modelliert. Zum anderen beschreibt das so genannte aktive System, welche Regulationsmechanismen einsetzen für

den Fall, dass der Körper sich nicht mehr im thermischen Gleichgewicht befindet. Schwitzen, Zittern, Gefäßverengung und -erweiterung werden dabei nach Fiala in Abhängigkeit von der Haut- und Körperkerntemperatur ein- bzw. ausgeschaltet.

Um die physikalischen Effekte des passiven Systems korrekt modellieren zu können, ist eine Anpassung der Geometrie an den menschlichen Körper notwendig. Das Mensch-Modell ist dabei in 10 beziehungsweise 15 zylindrische oder sphärische Körperelemente unterteilt. Diese bestehen wiederum aus mehreren Schichten (Layern) und sind weiterhin in unterschiedliche Sektoren gegliedert um Asymmetrien im Körperaufbau besser beschreiben zu können.

Die oben beschriebene Zylinderstruktur ist allerdings nicht optimal für Untersuchungen geeignet, die geometrische Berechnungen beinhalten, wie zum Beispiel die geometrische Verteilung kurz- oder langwelliger Strahlungsenergie auf der Manikin-Oberfläche. Dazu wurde in Yue [15] ein parametrisches Geometriemodell entwickelt, das durch die Transformation einzelner Körpersegmente und Anpassung der Vernetzung in jede beliebige Position gebracht werden kann und die gleiche Element- und Sektorunterteilung wie das Modell nach Fiala aufweist.

3 Datenstruktur

3.1 Thermoregulationsinterface

Zur Berechnung des Thermoregulationsmodells aus Abschnitt 2 wird die Softwarekomponente FIALA-FE benutzt, die als Teilpaket von THESEUS-FE [9] bereitgestellt wird. FIALA-FE lässt sich allerdings nur über eine Textschnittstelle ansteuern und liefert Berechnungsergebnisse als komprimierte HDF-Datei¹ zurück. Zur Anbindung an andere Programme wurde das Thermoregulationsinterface entwickelt, das in C++ implementiert ist, und dessen Klassenstruktur in Abb. 1 dargestellt ist.

Der strukturelle Aufbau des Thermoregulationsinterfaces leitet sich aus dem Körperaufbau nach Fiala ab. Lokale Daten wie Oberflächen- oder Hauttemperaturen und lokale

¹ Hierarchical Data Format – <http://hdfgroup.com/HDF5>

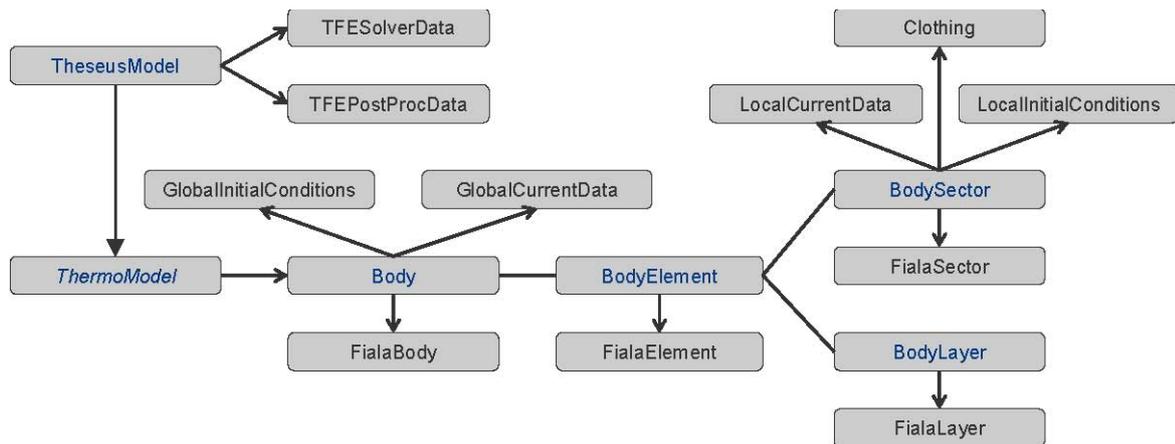


Abb. 1: Klassenstruktur des Thermoregulationsinterfaces.

Randbedingungen sind für jeden Sektor einzeln definiert. Globale Daten und Randbedingungen gelten jeweils für den gesamten Körper. Aus dieser Datenstruktur werden die jeweiligen Steuerungsdateien für FIALA-FE geschrieben, und die Ergebnisse nach vollbrachter Berechnung dort wieder abgelegt, sodass externe Programme ohne Umwege darauf zugreifen können.

Das Thermoregulationsinterface ist so konzipiert, dass prinzipiell jedes Thermoregulationsmodell benutzt, und hinter dem Interface versteckt werden kann. So wäre es nach leichter Anpassung der Struktur möglich, das Zwei-Knoten-Modell von Gagge [8] oder das 65MN-Modell von Tanabe [11] zu implementieren.

3.2 Kopplungsmodelle

Abb. 2 zeigt das Kopplungskonzept der Virtual Climate Chamber mit dem Thermoregulationsinterface und dem parametrischen Geometriemodell. Beim Start der VCC wird das Geometriemodell geladen, das ausschließlich zur Darstellung der lokalen Größen wie Haut- und Oberflächentemperatur dient.

Anschließend kann der Benutzer in der VCC Randbedingungen für Raum- und Oberflächentemperaturen der Umschließungsflächen, Oberflächenemissivität, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie metabolische Aktivität des Körpers festlegen. Diese werden dem Thermoregulationsinterface übergeben und von dort aus an THESEUSFE weitergeleitet. Die Ergebnisse werden nach erfolgter Berechnung zur VCC zurück-

geliefert, und der Benutzer kann nun entscheiden, ob die Randbedingungen geändert werden sollen oder nicht.

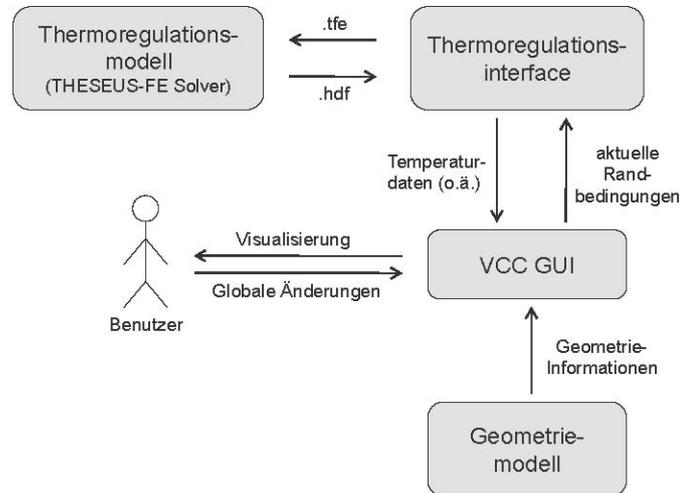


Abb. 2: Kopplungskonzept der Virtual Climate Chamber.

Das Thermoregulationsinterface bietet ferner die Möglichkeit, eine Kopplung mit einer zonalen Simulationsumgebung nach Clarke [2] vorzunehmen, mit der die instationäre Temperaturverteilung in einem Gebäude über ein ganzes Jahr berechnet werden kann. Ansätze hierzu werden zur Zeit von den Autoren entwickelt und sind in van Treeck & Frisch [12] beschrieben. Mit dem Interface kann auch die Verbindung zu einem CFD-Solver² hergestellt werden, der beispielsweise in van Treeck et al. [14] entwickelt wurde.

4 Virtual Climate Chamber

Die VCC Umgebung ist in C++ mit der freien Bibliothek wxWidgets, einer Cross Platform GUI-Library [16], geschrieben, die sowohl unter Linux als auch unter Windows übersetzt werden kann.

In Abb. 3 ist das benutzte Threadmodell inklusive *Data Transfer Queues* zu sehen. Die graphische Benutzeroberfläche (GUI) läuft in einem Thread, die eigentliche Berechnung der menschlichen Thermoregulation in einem zweiten sogenannten *Worker-Thread*. Zur Implementierung der Threads wurden die Threadklassen von wxWidgets benutzt. Die

² Computational Fluid Dynamics

Techniken zur Datensynchronisierung beruhen auf *mutual exclusion (mutex)* und *critical sections-Klassen* von wxWidgets. Somit musste nur eine Bibliothek eingebunden werden.

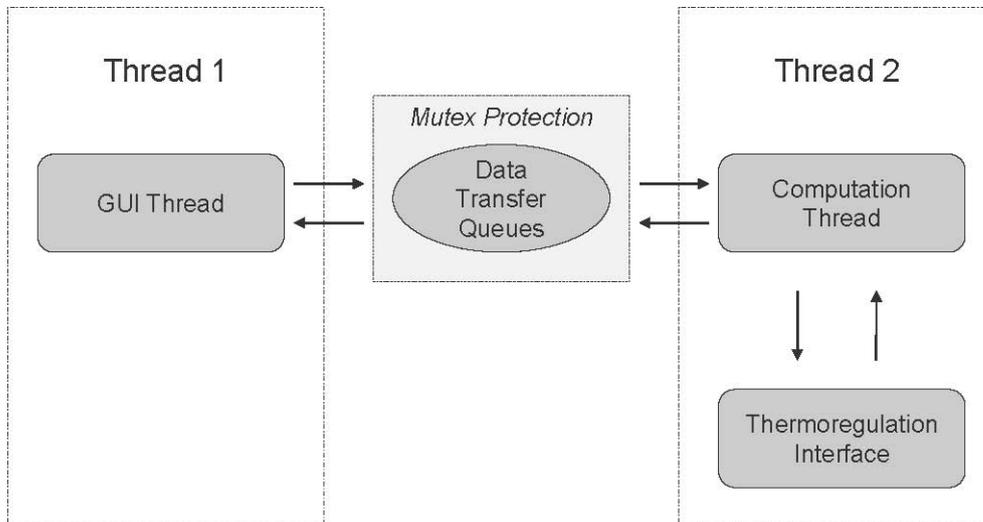


Abb. 3: Threadmodell der Virtual Climate Chamber.

4.1 Berechnung im Worker-Thread

Der *Worker-* oder *Computation-*Thread lässt die eigentlichen Berechnungen nach folgendem Schema ausführen:

setze globale Zeit zu Null

Wiederhole

 prüfe ob Thread weiterlaufen soll

 transferiere Eingangsdaten aus *Data Transfer Queues* in diesen Thread

 übergebe Randbedingungen an Thermoregulations-Interface

 führe eigentliche Berechnung aus

 schreibe Ergebnisse zurück in *Data Transfer Queues*

 erhöhe globale Zeit um letzten Berechnungszeitschritt

Ende Wiederhole

Dieser Algorithmus läuft, sobald die Simulation gestartet und der Worker-Thread aktiviert wurde.

4.2 Datensynchronisation

Die Kommunikation zwischen den beiden Threads funktioniert ausschließlich über zugangsgeschützte Warteschlangen, so genannte *Data Transfer Queues*, die als *FIFO*³ *Standard Template Library Queues* implementiert sind. In der VCC-Kommunikation existieren vier verschiedene Queues: Die erste Queue enthält die aktuell gültigen Randbedingungen, die aus der GUI extrahiert, und an die Queue angehängt worden sind. Diese Daten sind vor allem von Bedeutung, um eine lückenlose Auflistung der verwendeten Randbedingungen zu erstellen. Die zweite Queue beinhaltet globale Ergebnisse wie die Hypothalamus- oder mittlere Hauttemperatur des Körpers, die dritte enthält ein Fließkomma-Array mit allen aktuellen lokalen Temperatur- oder Bewertungsergebnissen, und die letzte beinhaltet Protokollnachrichten, die vom Worker-Thread an die GUI weitergeleitet werden sollen. Die Kontrolle vor konkurrierendem Zugriff wird hierbei durch Mutex-Konstrukte gewährleistet.

Der Umweg über die *Data Transfer Queues* ist notwendig, da einige der nativen wxWidgets-Klassen, wie zum Beispiel die Textein- und -ausgabefelder, nicht thread-sicher sind und deshalb nicht zum Datentransfer benutzt werden können. Eventhandler der GUI rufen solche Felder in unregelmäßigen Abständen ab, und es besteht bei gleichzeitigem Aufrufen aus einem anderen Thread als der GUI die Wahrscheinlichkeit eines Programmabsturzes. Eine Möglichkeit zur Vermeidung dieses Problems ist die Benutzung einer vordefinierten GUI-Mutex-Konstruktion, die den Zugriff auf die GUI regelt. Allerdings birgt diese Lösung den Nachteil einer Verzögerung von bis zu fünf Sekunden oder länger, da der *Worker-Thread* warten muss, bis alle laufenden Zugriffe der Eventhandler der GUI beendet sind. Während dieser Zeit kann keine Berechnung ausgeführt werden, und folglich resultiert eine unausgewogene Auslastung der Ressourcen und eine stockende Ausführung des Programms. Die hier dargestellte Lösung mittels Queues führt zu annähernd keiner Wartezeit im Berechnungsalgorithmus und sorgt für einen fließenden Programmablauf, da die Mutex-Konstrukte lediglich den Zugang während einer kurzen Kopierphase sperren.

³ First in, first out

4.3 Graphische Benutzeroberfläche

Die graphische Benutzeroberfläche der VCC ist in Abb. 4 zu sehen. Wie bereits in 3.2 beschrieben, können dort unter anderem die Randbedingungen für die interaktive Simulation gesetzt und Ergebnisse visualisiert werden. In der GUI kann gegebenenfalls der *Worker-Thread* angehalten, reaktiviert oder komplett gestoppt werden. Damit ist es möglich, gegenwärtige lokale Daten genauer zu analysieren oder zu betrachten.

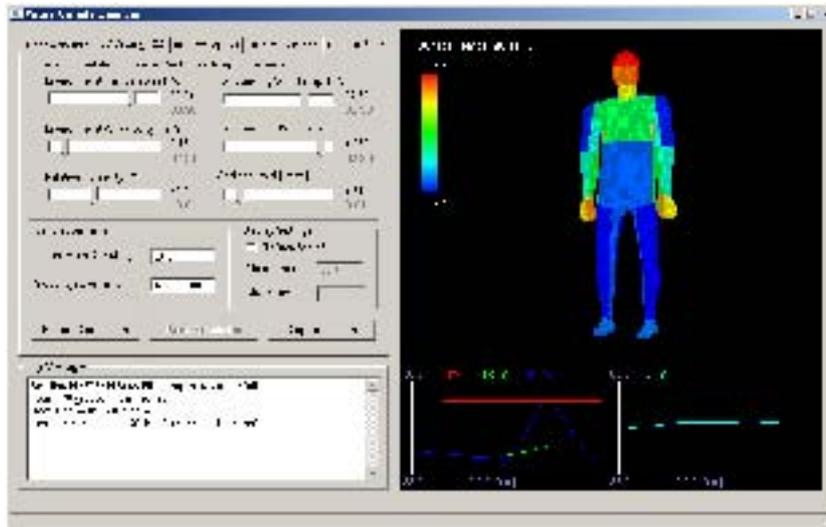


Abb. 4: GUI der Virtual Climate Chamber.

5 Validierung

Als Validierungsbeispiel wurde das Experiment von Raven und Horvath [10] benutzt. Dabei wurden elf bei 28° C akklimatisierte Versuchspersonen in einer Klimakammer über eine Versuchszeit von zwei Stunden einer Raumtemperatur von 5° C ausgesetzt. Unter anderem wurden Messungen der Hauttemperatur und des Metabolismus durchgeführt, anhand derer Fiala später sein Modell kalibriert hat.

Die gleichen Ergebnisse wurden ebenfalls bei der Validierung von FIALA-FE und der VCC benutzt. Die Resultate der Virtual Climate Chamber stimmten zufrieden stellend mit diesen Versuchsergebnissen überein. Für weitere Details sei auf Frisch [7] oder van Treeck et al. [13] verwiesen.

6 Anwendung und Ausblick

Abb. 5 zeigt ein Anwendungsbeispiel, bei dem aus Gründen der Übersichtlichkeit nur zwei Parameter interaktiv während der Simulation über 50 Minuten geändert wurden: die Umgebungstemperatur T_{amb} , die in Graph a), sowie die Bekleidungsisolierung, die in Graph b) zu sehen ist.

Die Ergebnisse wurden übereinander dargestellt, um die Einwirkungen der einzelnen Parameter deutlicher zu erkennen. Graph a) zeigt zusätzlich zu T_{amb} die mittlere Hauttemperatur $T_{sk;m}$, die sich zwischen Hautoberfläche und Bekleidung einstellt, sowie die mittlere Oberflächentemperatur $T_{sf;m}$ an der Bekleidungsoberfläche. Die Variationen der Kurven zeigen das transiente Verhalten bei veränderten Randbedingungen. Graph c) zeigt den PMV-Index nach Fanger sowie den DTS-Index nach Fiala auf einer siebenstufigen Bewertungsskala nach ISO 7730 [4]. Hier ist gut erkennbar, dass eine rein globale Betrachtung der Randbedingungen, wie sie zur Bewertung des PMVs benutzt werden, in diesem Fall nur eine sehr grobe Einschätzung des Temperaturempfindens widerspiegelt. Die *Dynamic Thermal Sensation* nach Fiala, die den Körperzustand mit berücksichtigt, bietet genaue Aufschlüsse über das dynamische Empfinden einer Person.

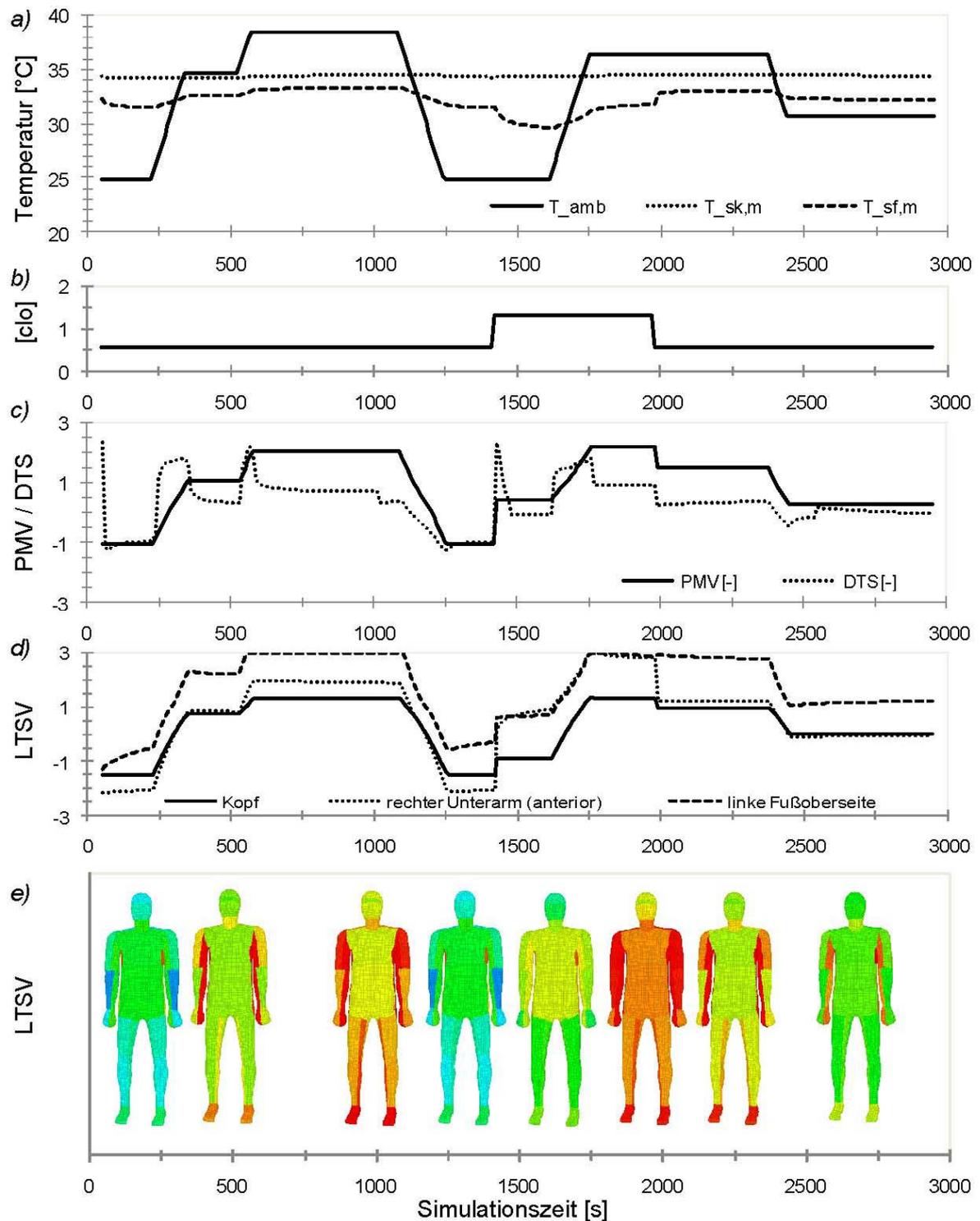


Abb. 5: Anwendungsbeispiel

Noch detaillierter ist die lokale Betrachtung der Temperaturempfindung. Das „Local Thermal Sensation Vote“ (LTSV) nach van Treeck et al. [13] betrachtet jedes Körperelement einzeln und bewertet es anhand der sich einstellenden Äquivalenttemperatur. In

Graph d) ist dieser Index für drei Körperteile (Kopf, rechter Unterarm (Sektor anterior) und linke Fußoberseite) während der Simulation aufgetragen. Es ist ein ähnliches Verhalten zu PMV- und DTS-Index zu erkennen, jedoch existieren lokal wesentliche Unterschiede. Beispielsweise ist das Votum am Fuß immer höher als am Kopf. Es ist demnach nötig eine solch detaillierte Betrachtung der einzelnen Körperpartien durchzuführen.

In e) ist der LTSV-Index für jedes Körpersegment farbkodiert zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgetragen, wobei sich das Spektrum von blau bis rot erstreckt, was einer Bewertungsskala von -3 bis $+3$ entspricht.

Literaturverzeichnis

- [1] ASHRAE. *Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta. 2004.
- [2] J. Clarke. *Energy Simulation in Building Design*. 2001.
- [3] DIN EN ISO 14505-2. *Entwurf: Ergonomie der thermischen Umgebung-Beurteilung der thermischen Umgebung in Fahrzeugen – Teil 2: Bestimmung der Äquivalenttemperatur*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2004.
- [4] DIN EN ISO 7730. *Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und der lokalen thermischen Behaglichkeit*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2006.
- [5] P. Fanger. *Thermal comfort*. 1982.
- [6] D. Fiala. *Dynamische Simulation des menschlichen Wärmehaushalts und der thermischen Behaglichkeit*. Band 41. 1998.
- [7] J. Frisch. *Parametrisches Modell zur interaktiven Simulation menschlicher Thermoregulation*. Diplomarbeit, *Computation in Engineering*, TU München. 2008.
- [8] A. Gagge, J. Stolwijk, and J. Hardy. *Comfort and thermal sensation and associated physiological responses at various ambient temperatures*. *Environ. Res.*, 1:1–20. 1967.
- [9] P+Z Engineering GmbH. *THESEUS-FE Theory manual, rel. 2.1*. <http://www.theseus-fe.de>.
- [10] P. Raven and S. Horvath. *Variability of Physiological Parameters of Unacclimatized Males during a Two-Hour Cold Stress of 5° C*. *Int. J. Biometeorol.*, 14:309–320. 1970.
- [11] S.-I. Tanabe, K. Kobayashi, J. Nakano, and Y. Ozeki. *Evaluation of Thermal Comfort using combined Multi-Node Thermoregulation (65MN) and Radiation Models and Computational Fluid Dynamics (CFD)*. *Energy and Buildings*, 34:637–646. 2002.

- [12] C. van Treeck, J. Frisch, M. Egger, and E. Rank. *Model-adaptive Analysis of Indoor Thermal Comfort*. In: *Building Simulation 2009, Glasgow, Scotland*. 2009.
- [13] C. van Treeck, J. Frisch, M. Pfaffinger, E. Rank, S. Paulke, I. Schweinfurth, R. Schwab, R. Hellwig, and A. Holm. *Integrated Thermal Comfort Analysis using a parametric Manikin Model for Interactive Real-Time Simulation*. *J Building Performance Simulation*. 2009.
- [14] C. van Treeck, P. Wensch, A. Borrmann, M. Pfaffinger, O. Wensch, and E. Rank. *ComfSim - Interaktive Simulation des thermischen Komforts in Innenräumen auf Höchstleistungsrechnern*. In: *Bauphysik*, 29(1). 2007. pp. 2-7.
- [15] Z. Yue. *A Computational Human Model for Thermal Comfort Simulation*. Master Thesis, *Computation in Engineering*, TU München. 2008.
- [16] <http://www.wxwidgets.org>.

Application of the Gauss-Bonnet Algorithm to the Computation of the Gaussian Curvature of Shells

Quanji Cai

Technische Universität München, Lehrstuhl für Computation in Engineering, 80290 München, Deutschland, E-mail: cai@bv.tum.de, Telefon: +49(0)89/28922436

Abstract

Modern architecture uses more and more free form surfaces which differ completely from classical constructions and are much more alike those which have been used extensively in aerospace or automotive engineering. Moreover, artistic construction surfaces are shaped very often in physical models, a situation which is similar to the automotive industry which starts new designs with physical models. For example, a new design of a car body consists of a clay model and its geometry information comes from optical scans in discrete form. To analyze the stiffness of the corresponding shell model, Gaussian curvature computation, which is normally derived from continuous surfaces, is required for the discrete data. In this paper, we analyze the *Gaussian curvature estimation algorithm* based on the discrete *Gauss-Bonnet algorithm*. An industrial application of the algorithm is presented by means of the shell model of a car body [4].

Keywords

Gaussian curvature, data clouds, Gauss-Bonnet algorithm

1 Introduction

Stiffness analysis of shells described by free-form surfaces becomes more and more important in civil and mechanical engineering. For example, it is required to estimate the stiffness of shell models of car bodies in automotive engineering. Flat surfaces in particular, which have the worst stiffness compared to other types of surfaces, should be intuitively noticed in the virtual planning process to guarantee the safety of the vehicle.

The *Gaussian curvature*, one of the intrinsic properties of differential geometry, offers indication of local geometric shapes. Points with zero Gaussian curvatures are considered to be parabolic or planar surface points lying on the locally flat surface

geometries. Therefore, computing Gaussian curvature of the shell surface plays an important role in analyzing the geometric shape of the surface.

Unfortunately, the Gaussian curvature is defined for surfaces which can be differentiated by two categories only. In the automotive industry, the first input geometric data is usually obtained from the scanned information of the styling model in the form of data clouds. To calculate the Gaussian curvature out of a smooth surface, extra work is needed in order to transform the discrete data into continuous CAD data. Due to the fact that the transformation procedure is labour-intensive, it is desirable to skip the procedure to transform discrete data to continuous CAD data. Therefore, another simplified approach to obtain the Gaussian curvature is required – to estimate the Gaussian curvature directly out of the discrete surface, which consists of data clouds on the surface represented by an unstructured triangular mesh [1].

A number of approaches have been proposed to analyze the Gaussian curvature from discrete surfaces. In this paper, we apply the algorithm based on the Gauss-Bonnet algorithm.

2 Evaluation of the algorithm with different mesh qualities

2.1 Models in the evaluation

In this paper, we focus on a spherical surface model which is part of the whole sphere with a 5000 mm radius. It is called *umbrella structures*, as illustrated in fig. 1.

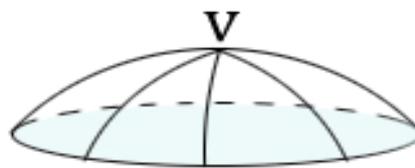


Fig. 1: Umbrella structure of the spherical model.

According to the definition, principal curvatures at the vertex v are:

$$\kappa_1 = \kappa_2 = \frac{1}{r} = \frac{1}{5000} = 2 \times 10^{-4} (mm^{-1}) \quad [1]$$

Thus, the exact *Gaussian curvature* is:

$$K = \kappa_1 \cdot \kappa_2 = 4 \times 10^{-8} (\text{mm}^{-2}) \quad [2]$$

Because we are using several discrete facets to approximate a smooth surface, the estimated curvature will be different from the exact value. Comparing differences between the experimental result and the theoretical value of different models tells us how the algorithm behaves with respect to variable meshes and helps us to evaluate the accuracy and stability of the algorithm.

There are several parameters of the models which affect the accuracy of the estimation: The smallest angle, the distribution of the different-size mesh, as well as the obtuse angle. We will introduce an *umbrella structure-mesh* to discuss the effect of each parameter in the following sections.

2.2 Gauss-Bonnet algorithm

Supposing that M is a compact two-dimensional Riemannian manifold with boundary ∂M , the *Gauss-Bonnet theorem* states:

$$\iint_M K d\sigma + \int_{\partial M} k_g ds = 2\pi\chi(M) \quad [3]$$

Here, k_g is the geodesic curvature of ∂M and χ is the Euler characteristic of M . Euler characteristic is classically defined for the surfaces of polyhedral.

Applying this theorem to umbrella structure-models, the Gaussian curvature over the discrete surface A around a certain vertex can be calculated with the following equation:

$$\iint_A K dA = 2\pi - \sum_i \varepsilon_i \quad [4]$$

A is a properly defined area around the corresponding vertex as it is depicted in fig. 2 which has a direct influence on the result [7]. Therefore, how to select the proper area A is a relevant issue.

For non-obtuse elements, we simply use the *Voronoi area* which is composed of the surface area formed by using the circum-center of the triangles. Due to the property of circum-center, the external angle ϵ_i is equal to θ_i in fig. 2. Consequently, the equation [4] can be rewritten in terms of θ_i :

$$\iint_A K dA = 2\pi - \sum_i \theta_i \quad [5]$$

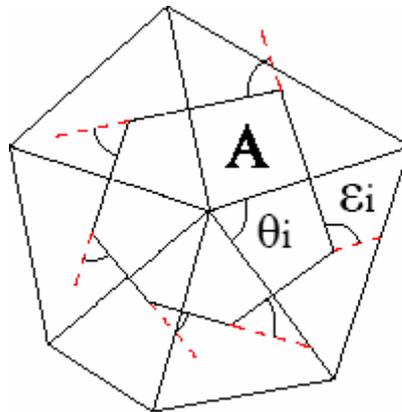


Fig. 2: *Voronoi region* is chosen as a properly defined area.

2.3 The effect of mesh qualities

We use the spherical coordinate system for the models, hence the surface can be simply represented by two angle parameters φ and θ , a longitudinal and a latitudinal angle, see fig. 3.

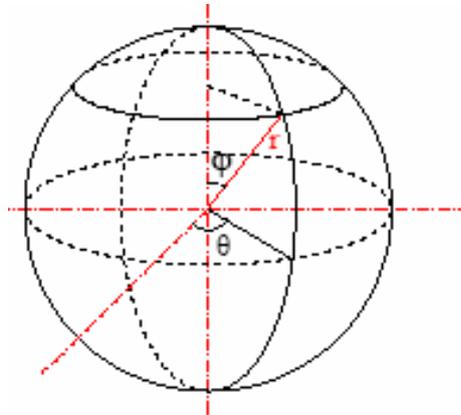


Fig. 3: Parameters in the spherical coordinate system.

2.4 Latitudinal angle θ

We keep the constant longitudinal angle $\varphi = 10^\circ$ and vary the latitudinal angle θ . All the triangle elements are equally distributed around the vertex. We change the latitudinal angle in a range of $0 < \theta < 90^\circ$. In fig. 4, the meshes in different quantities of θ are illustrated.

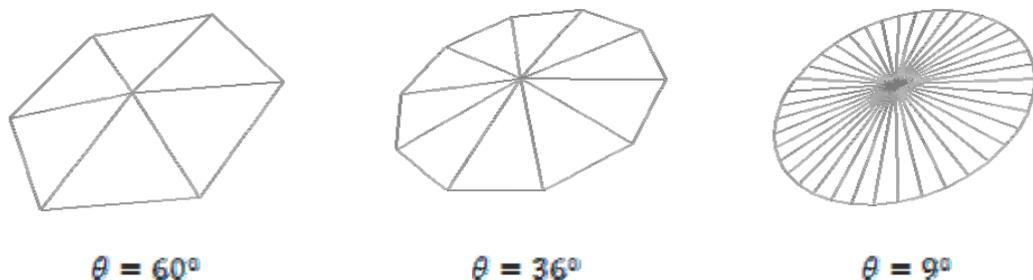


Fig. 4: Meshes in different quantities of θ .

In fig. 5, the comparison of *Gaussian curvature* between the experimental result and theoretical value is illustrated.

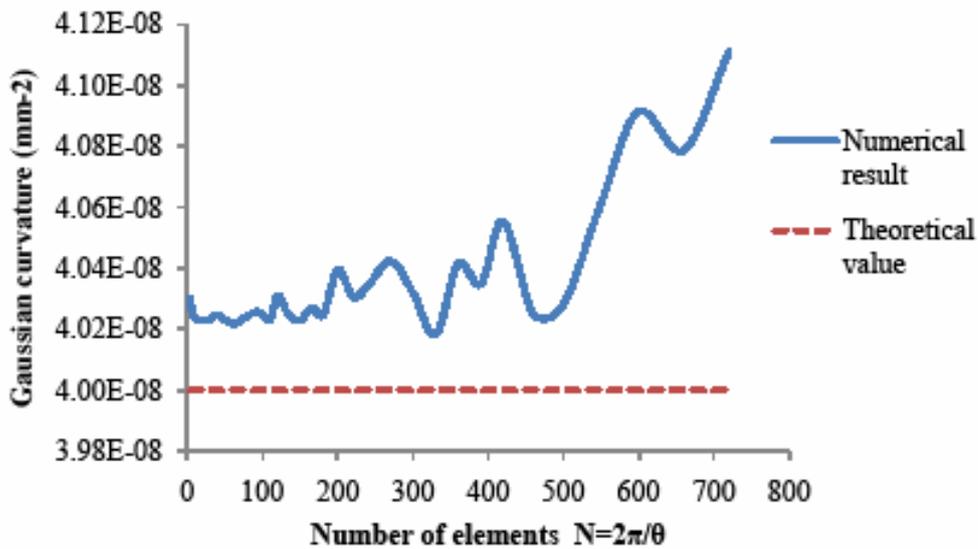


Fig. 5: The comparison between the numerical result and theoretical value.

We can see that the error is generally increasing while the number of elements increases, which means that the angle in the triangle element decreases. In addition, the graph oscillates significantly when the angle θ is smaller than approximately 2° .

This means that the accuracy of the algorithm is influenced by the latitudinal angle of triangle elements when it reaches the critical value. In order to keep the algorithm stable, we should control θ to be larger than 2° .

2.5 Longitude angle φ

We retain the latitudinal angle $\theta = 36^\circ$ and change the longitudinal angle φ . All the elements are equally distributed around the vertex as well. The meshes in different quantities of φ are demonstrated in fig. 6.



Fig. 6: Meshes in different quantities of φ .

From fig. 7, we can see that while the angle φ is increasing, the error of estimation is also increasing due to the fact that the discrete surfaces are increasingly farther away from the real smooth spherical surface.

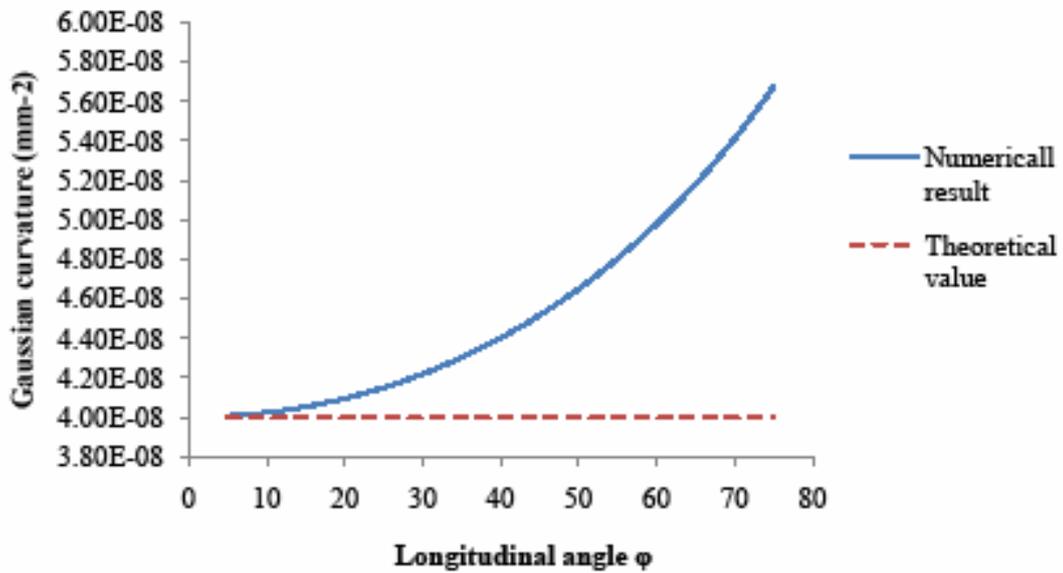


Fig. 7: The comparison between the numerical result and theoretical value.

It is also can be observed that if the mesh is too rough, such as $\varphi > 30^\circ$, the error - being higher than 20% - is not acceptable anymore. A good initial triangle mesh can guarantee accurate results of the curvature estimation.

2.6 Distribution of elements

In addition, the distribution of elements can also influence the estimation result. Now, we will keep the constant of $\varphi = 10^\circ$ and the number of elements $N = 8$, change the distribution of elements around the top vertex in order to discuss the effect of inequality. To quantify the inequality of the elements in the mesh, we introduce a renowned coefficient in economics - the *Gini coefficient*.

The Gini coefficient measures statistical dispersion, most prominently used as a measure of inequality of income distribution or inequality of wealth distribution [6]. The Gini coefficient tells us how even the variable is spread and is applied here to reflect the distribution of element angles around the top vertex. It is defined as a ratio between 0 and 1. 0 which corresponds to perfect equality. In our case, this means that the angle related to the top vertex is the same for all the elements. In contrast, 1 corresponds to a perfect inequality. This leads to the interpretation that there is only one element which covers the whole area around the top vertex.

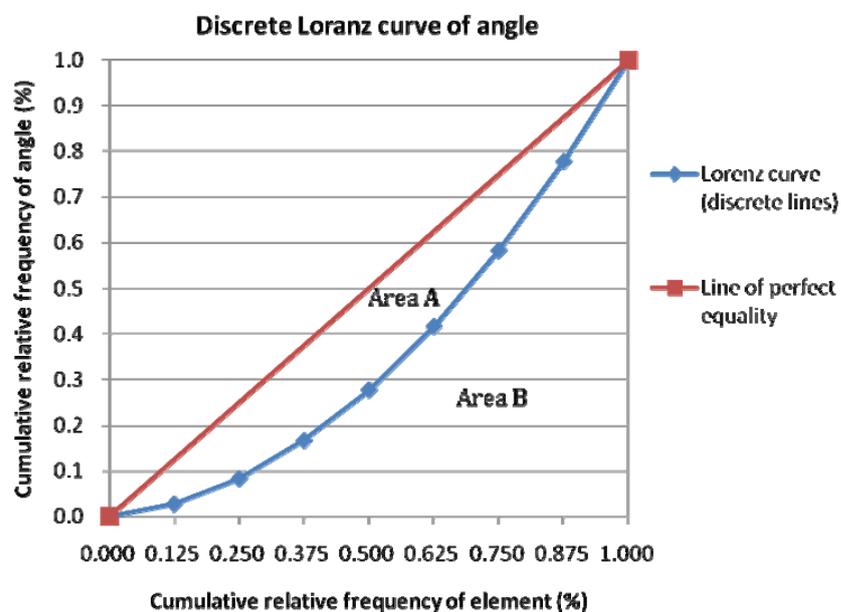


Fig. 8: Discrete *Lorenz curve*.

Offering an intuitive geometric interpretation [2] makes the Gini coefficient attractive and suitable for our application: It can be defined geometrically as the ratio of two areas in a box as shown in fig. 8. A is the area between the so-called *Lorenz curve* and the 45 degree line in the box. B is the area below the Lorenz curve. The Lorenz curve is the graphical representation of the cumulative distribution of a probability distribution [7].

Then the Gini coefficient can be illustrated as:

$$G = \frac{A}{A + B} \quad [6]$$

By applying the concept of the Gini coefficient, we work on a discrete distribution because of a limited number of elements. Consequently, the Lorenz curve is not smooth any more but it consists of piecewise continuous lines. With a discrete distribution, the area under the Lorenz curve can be calculated with the following formula:

$$B = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} (x_{i+1} - x_i)(y_{i+1} + y_i) \quad [7]$$

Here, x_i and y_i stand for the coordinates of the points within the Lorenz curve. x_i is the cumulative relative frequency of the element while y_i is the cumulative relative frequency of the angle.

We can artificially distribute the angles in a different way to get a range of Gini coefficients. With the same longitudinal angle and the number of elements, the angle around the top vertex can be dispersed in a different way as shown in fig. 9.

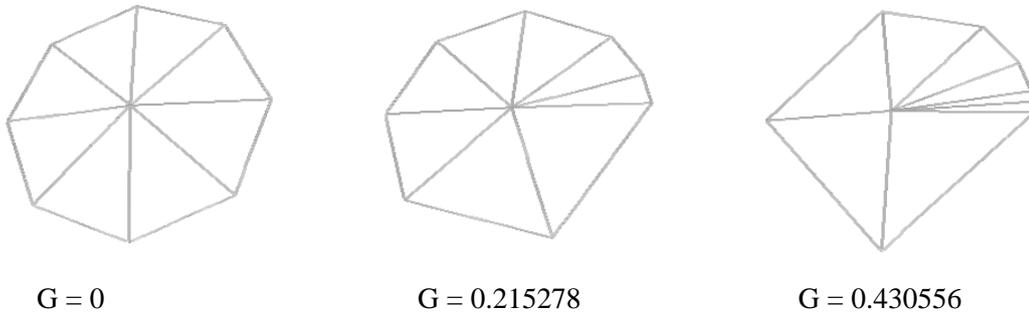


Fig. 9: Meshes with different Gini coefficients.

In fig. 10, the effect of inequality on the estimation result can be observed. In general, the error of the Gaussian curvature estimation is increasing while the Gini coefficient increases. However, according to the value in the y-axis, one can also notice that this change is not very significant compared to the exact value (up to approximately 0.75%).

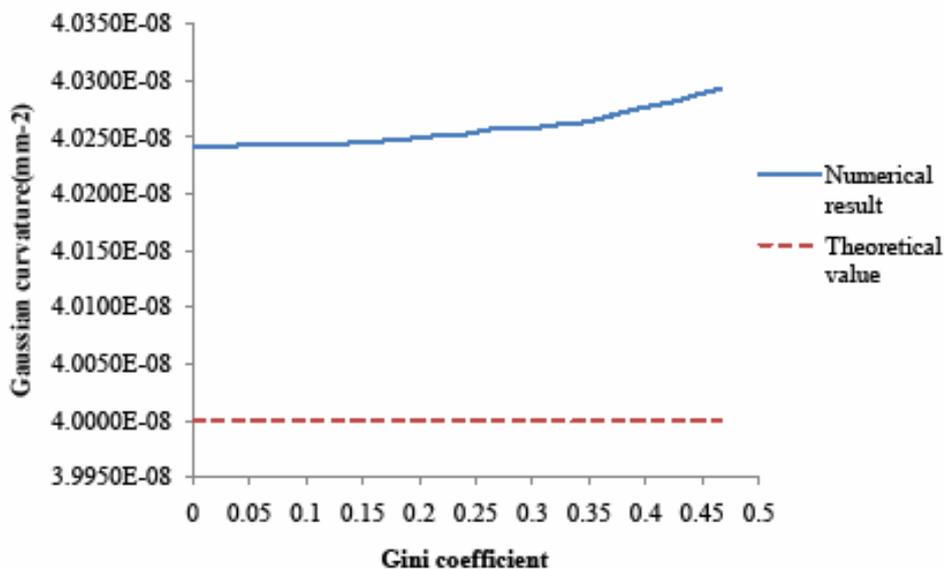


Fig. 10: The effect of inequality on the estimation result.

3 Application

In order to observe the application of the Gauss-Bonnet algorithm on discrete shell surfaces, we use the metal sheet model of a car body, which is in our case a piece of the door of BMW 3 series.

After building triangle meshes from data clouds, we apply the Gauss-Bonnet algorithm to estimate the *Gaussian curvature* of the sheet metal model and compare it to the analytical solution.

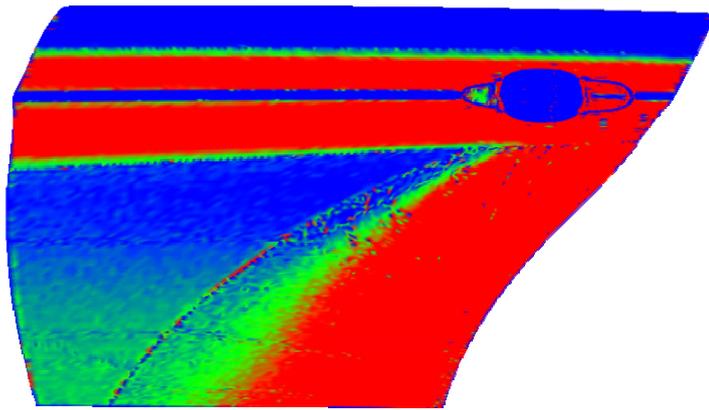


Fig. 11: The estimating result computed from discrete data.

The triangle meshes in fig. 11 are built based on the geometry of the smooth surface in fig. 12. We apply the Gauss-Bonnet algorithm to the meshes in order to compute the Gaussian curvature of this shell surface. The maximum value of the Gaussian curvature is assigned to the color blue, zero Gaussian curvature to the color green and the minimum value to the color red.

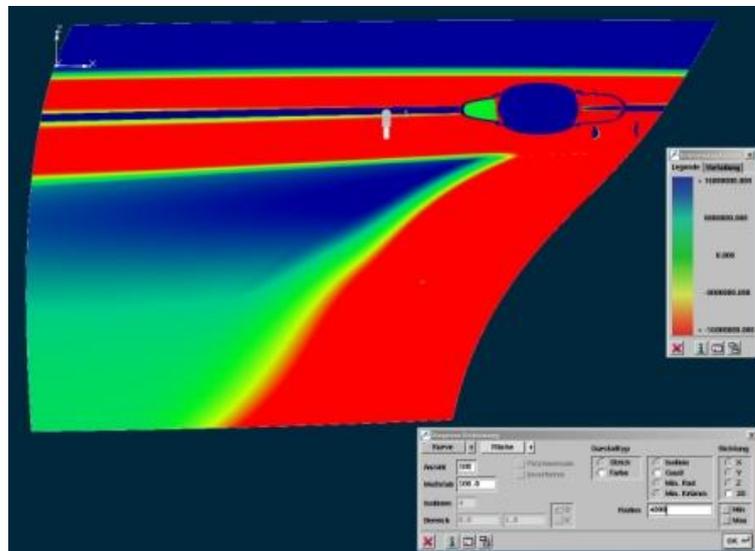


Fig. 12: The analytical solution from continuous CAD data.

Comparing it to fig. 12, we can observe that the most critical region (which has the Gaussian curvature value zero) is marked out in green. These areas have the relatively low load-carrying capacity which is of great importance to car body designers.

4 Conclusion

In this paper, we analyzed the Gauss-Bonnet algorithm, which can estimate the Gaussian curvature of surfaces based on data clouds.

To analyze the effect of mesh quality on the algorithm, we considered a wide variety of umbrella structure-models which represent discrete spherical surfaces with radii of 5000 mm, close to the value of sheet metal in the industry. The error analysis of the algorithm was performed by comparing the estimates to the analytical Gaussian curvature values.

Error analysis with umbrella structures told us that when there are only non-obtuse triangles in the meshes, the accuracy of the estimation is influenced by the latitudinal angle, θ , the longitudinal angle, φ of the spherical coordinate and the distribution of the elements. If $\theta < 2^\circ$, the estimation value of the Gaussian curvature is highly oscillatory which lets unstable results arise. With an increasing longitudinal angle, φ , the error increases as well. Therefore, one should avoid too distorted elements in triangle meshes in order to guarantee the accuracy of the algorithm.

Inequality of the element distribution was quantified by the Gini coefficient used in economics. It was shown that when the Gini coefficient increases (i.e. the unevenness of elements grows), the error of estimation also increases. However, compared to the longitudinal and latitudinal angles, the distribution of elements has less influence on the results.

We applied the algorithm to the real model of shell structure to see the feasibility of the application. Comparing it to the theoretical result, we conclude that the algorithm is accurate in general.

Bibliography

- [1] E. Magid, P. Soldea, E. Rivlin. A Comparison of Gaussian and Mean Curvature Estimation Methods on Triangular Meshes of Range Image Dat.
- [2] K. Xu. How Has the Literature on Gini's Index Evolved in the Past 80 Years? 2004.

- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Gauss-Bonnet_theorem
- [4] Quanji Cai. Computation of Gaussian Curvature Based on Data Clouds, Master Thesis at Technische Universität München. 2008.
- [5] M. Meyer, M. Desbrun, P. Schroeder, and Alan H. Barr. Discrete Differential Geometry Operators for Triangulated 2-Manifolds, Visualization and mathematics. 2002. pp. 34-57.
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/Gini_coefficient
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Lorenz_curve

Nicht-konvexe Abstandsbestimmung und Quadratische Programmierung

Norbert Paul

Technische Universität München, Computation in Engineering, 80333 München, Deutschland, E-mail: paul@bv.tum.de, Telefon: +49(0)89/28925054

Kurzfassung

Zur computergestützten kooperativen Bauplanung ist es notwendig, den Datenaustausch zwischen den einzelnen Fachplanungen durch Definition eines gemeinsam genutzten Datenmodells zu standardisieren. Idealerweise bildet dieses Datenmodell eine räumliche Datenbank, die dann auch in der Lage sein muss, räumliche Informationen und Abfragen zu verarbeiten. Zu diesen Abfragen gehört auch die Abfrage des Abstandes zweier Objekte. Es ist wohlbekannt, dass dies im Falle konvexer Körper im wesentlichen ein quadratisches Optimierungsproblem ist. Der vorliegende Artikel stellt einen Algorithmus zur Abstandsbestimmung konvexer Polyeder auf der Basis des bekannten Active-Set-Algorithmus vor. Zudem wird die besondere Problematik bei den nicht-konvexen Polyedern diskutiert. Insbesondere gibt es Hinweise, die vermuten lassen, dass eine bessere als quadratische Laufzeitkomplexität der Abstandsbestimmung bei allgemeinen Polyedern gar nicht möglich ist.

Stichworte

Geometrische Algorithmen, Quadratische Optimierung

1 Einleitung

Im Forschungsprojekt „Definition und Umsetzung einer Anfragesprache mit räumlich-topologischen Operatoren“¹ wird an einer Erweiterung von SQL um räumliche Abfrageoperatoren gearbeitet, die sich laut [1] unterteilen lassen in

- metrische Operatoren,
- direktionale Operatoren,
- topologische Operatoren,
- modifizierende Operatoren.

¹gefördert von der DFG unter RA624/17.

Dieser Beitrag diskutiert nun die Implementierung der metrischen Operatoren. Ein Beispiel für eine metrische Abfrage wäre etwa: „Gib alle Bauelemente mit einem Abstand von weniger als 1,5 m zu einer roten Türe“, oder in SQL:

```
select be.*
from Doors d, BuildingElements be
where d.color=red
      and distance(d,be)<=1.5;
```

[1]

wobei angenommen wird, es gebe eine Tabelle *BuildingElements* von Bauelementen und auf diese eine Sicht namens *Doors*. Um die Abfrage [1] effizient ausführen zu können, werden natürlich zuerst all jene Objekte aussortiert (culling), für die die Abschätzung „distance(d, be) <= 1.5“ ohne größeren algorithmischen Aufwand bestimmt werden kann [5, 9]. Diese Heuristiken lassen aber im Allgemeinen Objekte zurück, welche bei der Bearbeitung der Abfrage eingehender untersucht werden müssen. Um diesen, den deterministischen Teil der Abstandsberechnung geht es hier.

2 Abstand und Quadratische Programmierung

Der euklidische Abstand $d((x, y, z), (u, v, w))$ zweier Punkte (x, y, z) und (u, v, w) ist

$$d((x, y, z), (u, v, w)) = \sqrt{(x-u)^2 + (y-v)^2 + (z-w)^2}. \quad [2]$$

Der Abstand $d(A, B)$ zweier geometrischer Körper A und B ist der kleinste Abstand $d(a, b)$ für jeweils einen Punkt von a in A und b in B , also

$$d(A, B) = \min\{d(a, b) \mid a \in A \text{ und } b \in B\} \quad [3]$$

Da genau dann auch das Quadrat des Abstandes minimal ist, kann auf das Wurzelziehen oft verzichtet werden. Daher sollte auch ein Abfrageoptimierer das Prädikat „distance(d, be) <= 1.5“ intern durch das äquivalente „distanceSq(d, be) <= 2.25“ ersetzen, was natürlich eine entsprechende Funktion *distanceSq* voraussetzt.

Konvexe Polyeder A und B sind nun allein durch die Eckpunkte $\{a_1, \dots, a_n\}$ und $\{b_1, \dots, b_m\}$ definiert. Damit ist jeder Punkt $a \in A$ und $b \in B$ durch Linearkoeffizienten $a = \lambda_1 \cdot a_1 + \dots + \lambda_n \cdot a_n$ und $b = \mu_1 \cdot b_1 + \dots + \mu_m \cdot b_m$ darstellbar. Damit hat auch deren quadrierter Abstand *distanceSq(a, b)* eine Darstellung als Funktion $f(\lambda_1, \dots, \lambda_n, \mu_1, \dots, \mu_m)$ der Linearkoeffizienten von a und b in der Form

$$f(\vec{x}) = \vec{x}^T G \vec{x} \quad \text{mit} \quad \vec{x}^T = (\lambda_1, \dots, \lambda_n, \mu_1, \dots, \mu_m). \quad [4]$$

Dabei ist G die (Gramsche) Matrix der Skalarprodukte von $(a_1, \dots, a_n, -b_1, \dots, -b_m)$. Die Linearkoeffizienten müssen folgende Gleichungen als Einschränkungen einhalten;

$$\begin{aligned} \lambda_1 + \dots + \lambda_n &= 1 \\ \mu_1 + \dots + \mu_m &= 1 \end{aligned} \quad [5]$$

bzw., in Vektorschreibweise,

$$\begin{aligned} (1, \dots, 1, 0, \dots, 0) \cdot \vec{x} &= 1 \\ (0, \dots, 0, 1, \dots, 1) \cdot \vec{x} &= 1. \end{aligned} \quad [6]$$

Diese Einschränkungen erlauben nur affine Linearkombinationen. Zudem müssen die Ungleichungen

$$\vec{x} \geq \vec{0} \quad (\text{komponentenweise}) \quad [7]$$

erfüllt sein, die nur konvexe Linearkombinationen erlauben. Abstandsberechnung ist also ein Sonderfall eines konvexen quadratischen Optimierungsproblems [6]. Eine bekannte Methode, derartige Optimierungsprobleme zu lösen, ist die sog. *Active-Set-Methode*.

3 Die Active-Set-Methode

Zu jedem Punkt x , der alle obigen Einschränkungen erfüllt, gibt es einerseits Einschränkungen, die x als Gleichung erfüllt und weitere, die x als echte Ungleichung erfüllt. So ist zum Beispiel für ein Dreieck A mit Eckpunkten (a, b, c) und für eine Kante B mit Endpunkten (p, q) der Punkt $x^T = (1, 0, 0, 1, 0)$ zulässig, da er die Koeffizienten für $a = 1 \cdot a + 0 \cdot b + 0 \cdot c$ und für $p = 1 \cdot p + 0 \cdot q$ enthält und mit $(1, 1, 1, 0, 0) \cdot x = 1$ und $(0, 0, 0, 1, 1) \cdot x = 1$ die beiden Gleichungen [6] erfüllt. Zudem ist jede Komponente größer oder gleich Null und erfüllt damit auch die Ungleichungen [7]. Nun ist die erste und die vierte Komponente von x echt größer Null, erfüllt also die entsprechende Ungleichung als echte Ungleichung, die anderen Komponenten hingegen sind gleich Null, erfüllen die Ungleichungen also als Gleichung, welche somit aktiv sind. Die aktive Menge unseres Beispiels x besteht folglich aus den fünf Gleichungen

$$\mathcal{A}(x) = \{(1, 1, 1, 0, 0) \cdot x = 1, (0, 0, 0, 1, 1) \cdot x = 1, x_2 = 0, x_3 = 0, x_5 = 0\}. \quad [8]$$

Die Idee der Active Set Methode [8] ist, mit einem möglichen Punkt x_0 und einer Teilmenge W_0 (working set) der an diesem Punkt aktiven Menge $\mathcal{A}(x_0)$ zu beginnen, so dass x_0 die eindeutige Lösung eines durch W_0 definierten linearen Gleichungssystems ist. Dann wird für jeden Schritt $k = 0, 1, \dots$ die Menge W_k durch Entfernen und Hinzufügen von Ungleichungen derart verbessert, dass x_k eine entsprechend bessere Lösung des zugehörigen Gleichungssystems ist, solange eine solche Verbesserung möglich ist. Ansonsten ist mit $W^* = W_k$ das optimale x^* gefunden. Insgesamt hat diese Methode viel Ähnlichkeit mit dem GJK-Algorithmus zur Abstandsbestimmung [7].

Wir wollen dies nun an einem Beispiel illustrieren: Habe unser obiges Dreieck A die Eckpunkte

$$a = (1, 0, 0), b = (0, 1, 0), c = (0, 0, 1) \quad [9]$$

und die Kante B verlaufe von p nach q mit

$$p = (1, 1, -2), q = (1, 1, 0). \quad [10]$$

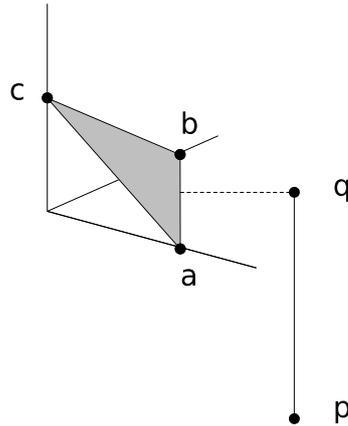


Abb. 1: Die Beispielmengen A und B

Zur Abstandsbestimmung benötigen wir fünf Koeffizienten: x_a, x_b, x_c für die Dreieckspunkte und x_p, x_q für die Endpunkte der Kante. Der Abstand der zwei Punkte $x_a \cdot a + x_b \cdot b + x_c \cdot c$ und $x_p \cdot p + x_q \cdot q$ als Funktion d von $x = (x_a, x_b, x_c, x_p, x_q)$ ist dann

$$d(x) = (x_a, x_b, x_c, x_p, x_q) \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 0 \\ -1 & -1 & 2 & 6 & 2 \\ -1 & -1 & 0 & 2 & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \\ x_p \\ x_q \end{pmatrix} \quad [11]$$

und wäre offensichtlich minimal, wenn alle Koeffizienten gleich Null sind. Dies verstößt zunächst aber gegen die Bedingung, dass es sich um eine *affine* Linearkombinationen handeln muss, also gegen die zwei Gleichungen

$$\begin{aligned} \text{aff}_A: \quad 1x_a + 1x_b + 1x_c + 0x_p + 0x_q &= 1 \\ \text{aff}_B: \quad 0x_a + 0x_b + 0x_c + 1x_p + 1x_q &= 1. \end{aligned} \quad [12]$$

Wir können nun die Lagrange-Multiplikatorenregel verwenden: Wenn die Abstandsfunktion an einer Stelle minimal ist und dabei aber gleichzeitig beide Eigenschaften erfüllt, dann muss der Gradient (die Steigung) der Abstandsfunktion an dieser Stelle zu einer Linearkombination der Gradienten der Einschränkungen parallel sein. Es muss also zwei Zahlen λ_A und λ_B geben, so das

$$\frac{\partial d(x)}{\partial x_i} = \lambda_A \cdot \frac{\partial \text{aff}_A(x)}{\partial x_i} + \lambda_B \cdot \frac{\partial \text{aff}_B(x)}{\partial x_i}, \quad i \in \{a, b, c, p, q\} \quad [13]$$

gilt. In Matrixschreibweise ist dies

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & 2 & 6 & 2 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 & 2 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \\ x_p \\ x_q \\ \lambda_A \\ \lambda_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad [14]$$

Jede optimale Lösung muss also auch eine Lösung eines solchen Gleichungssystem sein und umgekehrt. Wir suchen somit das Optimum (die Koeffizienten der Punkte mit minimalem Abstand), indem wir ein optimales Gleichungssystem suchen und dieses lösen. Man beachte, dass wir bei unserer Formel ein paar unschädliche „Rechenfehler“ gemacht haben: Da $d(x)$ genau dann minimal ist, wenn $0.5d(x)$ minimal ist, können wir den Faktor 2 bei der Ableitung von d einfach ignorieren. Zudem haben wir die Vorzeichen der Lagrange-Multiplikatoren einfach umgekehrt. Diese Matrix wird auch als *Karush-Kuhn-Tucker-Matrix* oder kurz KKT-Matrix bezeichnet. Die ersten fünf Zeilen repräsentieren Formel [13], die zwei letzten Zeilen die aktiven Einschränkungen. Man beachte, dass diese auch die transponierten zwei letzten Spalten sind – die Matrix ist symmetrisch.

In unserem Fall hat das Gleichungssystem eine eindeutige Lösung

$$(x_a, x_b, x_c, x_p, x_q, \lambda_A, \lambda_B) = (1, 1, -1, 0.5, 0.5, 0, 0). \quad [15]$$

Die Punkte mit minimalem Abstand sind also $a + b - c = (1, 1, -1)$ und $0.5 \cdot p + 0.5 \cdot q = (1, 1, -1)$, der Schnittpunkt der Geraden pq mit der vom Dreieck A aufgespannten Ebene. Diese Lösung ergibt also den Punkt des minimalen Abstands der beiden affinen Unterräume, sie ist jedoch nicht zulässig, da der Schnittpunkt außerhalb des Dreiecks liegt. Mit $x_c = -1 < 0$ verstößt diese Lösung auch gegen die Ungleichung $x_c \geq 0$, die wir nun als *Gleichung* $x_c = 0$ in unserer System aufnehmen müssen:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 2 & 6 & 2 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 2 & 2 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \\ x_p \\ x_q \\ \lambda_A \\ \lambda_B \\ \lambda_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad [16]$$

Dieses System hat die Lösung

$$(x_a, x_b, x_c, x_p, x_q, \lambda_A, \lambda_B, \lambda_c) = (0.5, 0.5, 0, 0, 1, 0.5, -1, -0.5). \quad [17]$$

Die nächstgelegenen Punkte sind $0.5 \cdot a + 0.5 \cdot b = (0.5, 0.5, 0)$ und $q = (1, 1, 0)$. Die Menge \mathcal{W}^* enthält die Einschränkungen aff_A und aff_B und $x_c \geq 0$, repräsentiert durch die drei rechten Spalten bzw. unteren Zeilen unserer Matrix. Sie ist Teilmenge der an dieser Stelle aktiven Menge. Diese aktive Menge enthält zudem noch die Ungleichung $x_p \geq 0$, diese wird aber nicht mehr benötigt, da die Lösung ja bereits gefunden ist.

Der negative Wert von $\lambda_c = -0.5$ zeigt nun an, dass diese Einschränkung, würde sie fallen gelassen, zu einer Verletzung führen würde. Ist jedoch der Lagrange-Multiplikator einer aktiven Ungleichung größer null, dann kann diese Einschränkung fallen gelassen werden, was zu einer Verringerung des Abstandes der gefundenen Punkte führt, ohne dass diese Einschränkung verletzt würde. Diese Lösung würde aber eventuell andere Einschränkungen verletzen, die dann wiederum aktiviert werden müssten.

Die Active-Set-Methode wechselt also zwischen dem Entfernen und Hinzufügen von Einschränkungen hin und her, bis sich die Menge der verwendeten Einschränkungen nicht mehr ändert. Genau dann ist das Optimum gefunden. Als Startwert bietet es sich an, jeweils einen Eckpunkt eines Polyeders auszuwählen und alle anderen Punkte aktiv zu setzen.

Da es bei großen Polyedern zu einem enormen Speicher- und Rechenaufwand führen würde, wenn man die gesamte KKT-Matrix in dieser Form explizit erstellen und das Gleichungssystem lösen würde, werden wir diesen Aufwand reduzieren müssen.

3.1 Komplexitätsreduktion

Abstandsbestimmung zweier konvexer Polyeder führt nicht zur Quadratischen Programmierung in ihrer allgemeinen Form $f(x) = \frac{1}{2}x^T Qx + q^T x$. Der lineare Teil $q^T x$ fehlt hier, weshalb wir ja auch den Faktor $\frac{1}{2}$ bei der Bildung des Gradienten einfach ignorieren konnten. Zudem sind die Gleichheits- und Ungleichheitsbedingungen sehr einfach: Die Koordinaten von x bestehen aus zwei Teilen von denen jeder Teil die baryzentrischen Koordinaten des entsprechenden Punktes im Polyeder darstellt und sich somit auf 1 aufsummieren muss. Zudem muss jede Koordinate größer oder gleich Null sein. Außerdem ist aus geometrischen Gründen das Gleichungssystem nur dann eindeutig lösbar, wenn es höchstens fünf nicht aktive Einschränkungen gibt.

Die obigen Eigenschaften werden wir nun ausnutzen: Die Gleichung

$$\begin{pmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & \cdots & m_{1,n} & 1 \\ m_{2,1} & m_{2,2} & \cdots & m_{2,n} & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ m_{n,1} & m_{n,2} & \cdots & m_{n,n} & 0 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \\ \lambda_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \\ 0 \end{pmatrix} \quad [18]$$

ist äquivalent zu

$$\begin{pmatrix} m_{2,2} & \cdots & m_{2,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n,2} & \cdots & m_{n,n} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} \quad [19]$$

$$x_1 = 0 \quad [20]$$

$$x_2 \cdot m_{1,2} + \cdots + x_n \cdot m_{1,n} = -\lambda_1. \quad [21]$$

„Aktiv setzen“ ist in unserem Fall also stets gleichbedeutend mit „gleich Null setzen“. Daher können wir, anstelle ein Gleichungssystem wie Gl. [16] zu verwenden, einfach die entsprechenden Zeile und Spalte herausstreichen. „Aktivieren“ einer Ungleichung bedeutet also in unserem Fall das Ignorieren des entsprechenden Punktes bzw. Entfernen der entsprechenden Zeile und Spalte von unserer Matrix und „Deaktivieren“ entsprechend das Erweitern der Matrix. Wir wollen daher die entsprechenden Eckpunkte zu den *nicht aktiven* Einschränkungen als die *berücksichtigten* Punkte bezeichnen.

Lösen des Gleichungssystems liefert die Koeffizienten und Lagrange-Multiplikatoren $(x_{j_1}, \dots, x_{j_n}, \lambda_A, \lambda_B)$ für ein Punktpaar. Die Lagrange-Multiplikatoren λ_i für die nicht berücksichtigten Eckpunkte ergeben sich durch Einsetzen dieser Lösung in die „große“ KKT-Matrix:

$$-\lambda_i = m_{i,j_1} \cdot x_{j_1} + \cdots + m_{i,j_k} \cdot x_{j_k} + \lambda_A$$

bzw. [22]

$$-\lambda_i = m_{i,j_1} \cdot x_{j_1} + \cdots + m_{i,j_k} \cdot x_{j_k} + \lambda_B$$

Je nachdem, ob i zum Polyeder A oder zum Polyeder in B gehört. Umrechnen ergibt für den Fall, dass i zu A gehört:

$$\lambda_i = -a_i^T (\pm p_{j_1} \cdot x_{j_1} \pm \cdots \mp p_{j_k} \cdot x_{j_k}) - \lambda_A, \quad [23]$$

wobei \pm bzw. \mp immer als Plus zu setzen ist, wenn der entsprechende Punkt p_{j_i} zu A gehört, ansonsten als Minus. Ist eines dieser λ_i größer Null, dann wird dasjenige i mit maximalem λ_i ausgewählt und dem Gleichungssystem die entsprechende Zeile und Spalte hinzugefügt. Dieses wird gelöst und falls sich ein negativer Koeffizient ergibt, wird die entsprechende Zeile/Spalte aus der Matrix gestrichen und das System erneut gelöst, bis nur noch nichtnegative Lösungen vorkommen. Dies wird so lange wiederholt, bis keine Veränderung am Gleichungssystem mehr stattgefunden hat. Einsetzen der gefundenen Koeffizienten in die Gl. [11] gibt das Quadrat des minimalen Abstands.

4 Nicht-konvexe Polyeder

Der vorgestellte Algorithmus funktioniert nur mit konvexen Polyedern. Es fällt nun auf, dass die wesentlichen Veröffentlichungen für den nicht-konvexen Fall (z.B. Quinlan [9]) einen heuristischen Ansatz verfolgen. Komplexitätseigenschaften werden dann meist empirisch anhand von anerkannten Benchmark-Polyedern wie z.B. dem Stanford-Hasen ermittelt. Eine untere Komplexitätsschranke der Abstandsbe-

rechnung ist natürlich $\Omega(n)$ bei n Punkten: Der Algorithmus hat jeden gegebenen Punkt zu berücksichtigen. Angaben über genauere Schranken sind jedoch in der Literatur kaum zu finden.

Ein naiver Algorithmus trianguliert einfach alle Flächen, iteriert über alle Paare von Dreiecksflächen und berechnet jeweils deren Abstand. Das Minimum der Abstände ist dann der Abstand der Polyeder, es sei denn eines ist vollständig im anderen enthalten. Der Aufwand ist $O(n^2)$, den der Rechenaufwand für das vorangehende Triangulieren ist geringer und der Speicheraufwand linear. Es ist theoretisch mit $O(n)$ Rechenzeit möglich [4], übliche gebräuchliche Algorithmen liegen in $O(n \log n)$.

Weniger naive Algorithmen schließen vorher gewisse Paare von Flächen aus, indem sie zB. die Zellen des Polyeders in eine Hierarchie von Volumenkörpern einordnen, so dass bereits von vorne herein viele derartige Flächenpaare ausgeschlossen werden können [2]. Wir vermuten aber, dass es zu jeder Heuristik zur Beschleunigung der Abstandsbestimmung einen Fall gibt, in dem eben diese Heuristik versagt.

Eine wichtige Charakteristik von nicht-konvexen Polyedern ist die Existenz von Kanten, die eine Vertiefung (Einkerbung, notch) in den Polyeder bilden. Eine solche Einkerbung ist leicht zu finden: Zunächst berechnet man die Flächennormalen $\vec{n}(f)$ für jede Fläche f . Jede Kante k hat nun eine linke Fläche f_L und eine rechte Fläche f_R , einen Anfangsknoten \vec{v}_- und einen Endknoten \vec{v}_+ . Ist das Spatprodukt

$$\begin{vmatrix} \vec{n}(f_L).x & \vec{n}(f_L).y & \vec{n}(f_L).z \\ \vec{n}(f_R).x & \vec{n}(f_R).y & \vec{n}(f_R).z \\ \vec{e}.x & \vec{e}.y & \vec{e}.z \end{vmatrix} \quad [24]$$

der drei Vektoren $\vec{n}(f_L)$, $\vec{n}(f_R)$ und $\vec{e} = \vec{v}_+ - \vec{v}_-$ negativ, dann ist die Kante eine Einkerbung, ist es hingegen positiv, dann bildet die Kante einen Grat. Ist es Null, dann liegen beide Flächen in einer Ebene, etwa weil sie durch eine konvexe Zerlegung der Flächen erzeugt wurde.

Diese Einkerbungen spielen bei vielen Algorithmen zur Abstandsbestimmung nicht-konvexer Polyeder eine wichtige Rolle und sind zB. Ausgangspunkt zur Zerlegung in konvexe Teile. Unser naiver Algorithmus könnte nun anstelle der Flächen diese konvexen Teile des Polyeders paarweise vergleichen. Allerdings liegt bei einem Polyeder der Größe n im ungünstigsten Fall die Anzahl der konvexen Teile in $\Omega(n^2)$ [3]. Damit hätte dieser Algorithmus die sehr schlechte Komplexität von $\Omega(n^4)$. Allerdings ist eine konvexe *Zerlegung* auch gar nicht notwendig – eine konvexe *Überdeckung*, bei der sich Teile auch überlappen dürfen, würde ausreichen.

Wir schlagen hier vor, die obige Active-Set-Methode zu modifizieren: Zunächst werden alle Flächen in konvexe Teile zerlegt und es werden die Kerben bestimmt. Dann werden alle Paare von Endpunkten einander zugewandter Kerben als Startpunkte für die Active-Set-Methode verwendet. Die dabei berücksichtigten Punkte müssen nun stets zu einer Polyederfläche gehören: Bei jeder Iteration gibt es ein aktuelles Paar von Flächen – jeweils eine pro Polyeder. Von diesen Flächen werden die zwei nächstgelegenen Punkte mit der Active-Set-Methode bestimmt. Liegt einer dieser Punkte an einer Kante, wird mit den entsprechend angrenzenden Flächen fortgefahren. Gibt es mehrere Flächen, für die der Abstand verringert werden kann, liegen die momentan berücksichtigten Punkte in einer Kerbe. Diese bildet eine Verzweigung eines Suchbaums, den der Algorithmus in einer Breitensuche abarbeitet. Wenn es keine derartige

angrenzende Fläche mehr gibt, wird untersucht, ob die berücksichtigten Punkte an einander zugewandten Seiten liegen. In diesem Fall ist ein lokales Minimum der Abstandsfunktion gefunden. Andernfalls werden die jeweils entsprechend zugewandten Seiten bestimmt und mit diesen fortgefahren. Von den so gefundenen lokalen Minima der Abstandsfunktion wird das kleinste als Ergebnis zurückgegeben.

5 Komplexität der Abstandsbestimmung

Zum allgemeinen Problem der nicht-konvexen Abstandsbestimmung finden sich in der Literatur kaum Aussagen über untere Komplexitätsschranken. Wir vermuten jedoch, dass die Laufzeit zur Abstandsbestimmung im ungünstigsten Fall stets in $\Omega(n^2)$ liegt und wollen diese Vermutung mit folgenden Überlegungen untermauern.

Angenommen wir haben zwei endliche Mengen $R \subset \mathbb{R}^3$ und $G \subset \mathbb{R}^3$ von Geraden. Diese Mengen kann man sich vorstellen als eine Menge R von ungekochten *roten* Spaghetti und entsprechend eine Menge G ungekochter *grüner* Spaghetti, die beide zusammen in die Luft geworfen werden. Ein Schnappschuss dieser Fliegenden-Spaghetti-Mengen (FSM) unterscheidet sich von unserer Konstruktion zwar durch die Beschränktheit seiner Elemente, wir werden aber gleich sehen, dass dieser Unterschied nicht wesentlich ist.

Wir vermuten, dass der Abstand von R und G , also der Abstand $d(r, g)$ der beiden zueinander am nächsten gelegenen Geraden, nur ermittelt werden kann, indem die Geraden von R und G jeweils paarweise miteinander verglichen werden. Dies gilt auch, wenn wir anstelle von Geraden ausreichend dünne Stäbe mit z.B. quadratischem Querschnitt verwenden. Diese an sich einleuchtende Überlegung wird hier jedoch nicht bewiesen und verbleibt als offenes Problem.

Aus jeder derartigen Menge von Stäben S lässt sich nun jeweils ein Polyeder S' konstruieren, indem in diese Stäbe an geeignet gewählten Ebenen abgeschnitten und durch einen einfachen Volumenkörper, etwa einem Quader, zu einem Polyeder vereinigt werden. Deren Abstandsberechnung ist dann genauso aufwändig wie die Berechnung von $d(R, G)$.

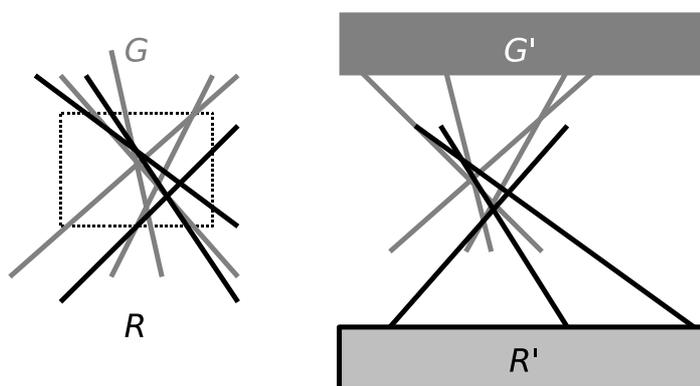


Abb. 2: Die Konstruktion von Polyedern G' und R' (rechts) aus Fliegenden-Spaghetti-Mengen R und G (links). Alle nahe gelegenen Punkte liegen dabei im gestrichelten Bereich.

Für je zwei verschiedene Stäbe g und r gibt es nämlich zwei Punkte $p_g \in g$ und $p_r \in r$ mit minimalem Abstand. Da nur endlich viele derartige Punkte existieren, gibt es eine beschränkte Region, in der diese jeweils nächstgelegenen Punkte je zweier Stäbe liegen, und außerhalb dieser Region streben alle Stäbe voneinander fort, wenn sie nicht parallel sind. In ausreichender Entfernung zu dieser Region können die Stäbe also abgeschnitten und beide Mengen jeweils zu einem Polyeder verbunden werden, ohne dass dies die Komplexität unseres Abstandsproblems beeinflusst, wie auf Abb. 2 veranschaulicht wird. Es gibt nämlich eine Ebene, die zu keiner der Geraden parallel ist. Ohne Einschränkung sei dies die XY-Ebene. Sei zudem h_b die maximale und h_s die minimale der Koordinaten der oben erwähnten nächstgelegenen Punkte und sei $h := 2 \cdot \max(|h_b|, |h_s|) + 2$. Dann schneiden wir die roten Stäbe an den Ebenen $\mathbb{R}^2 \times \{h\}$ und $\mathbb{R}^2 \times \{-2 \cdot h\}$ ab und beschneiden die grünen Stäbe analog an den Ebenen $\mathbb{R}^2 \times \{-h\}$ und $\mathbb{R}^2 \times \{2 \cdot h\}$. Zudem setzen wir jeweils einen ausreichend großen Quader an die Ebene $\mathbb{R}^2 \times \{-2 \cdot h\}$, um alle roten Stäbe zu einem Polyeder R' zu vereinigen und verbinden analog die grünen Stäbe durch einen Quader bei $\mathbb{R}^2 \times \{2 \cdot h\}$. Damit erhalten wir zwei Polyeder R' und G' , deren Abstand nicht wesentlich einfacher zu berechnen ist als bei den ursprünglichen Mengen von Stäben und dieser Rechenaufwand ist aufgrund unserer anschaulichen Überlegung immer in $\Omega(n^2)$.

Wie bereits erwähnt, beruht diese Vermutung auf einer bisher unbewiesenen anschaulichen Überlegung, deren Beweis noch aussteht. Aus dieser Vermutung würde jedoch folgen, dass jeder effiziente Algorithmus zur Abstandsbestimmung von Polyedern nur heuristisch ist und stets auf Situationen stoßen kann, in denen doch nichts wesentlich Besseres übrig bleibt, als die Flächen der Polyeder jeweils paarweise zu vergleichen.

6 Ergebnis und Ausblick

Abstandsbestimmung zweier Polyeder ist ein vereinfachter Sonderfall der quadratischen Optimierung. Hier wurde ein Algorithmus zur effizienten Abstandsbestimmung konvexer Polyeder vorgestellt, der auf einer entsprechend vereinfachten Version der Active-Set-Methode beruht, und es wurden Modifikationen dieses Algorithmus für den nicht-konvexen Fall vorgeschlagen.

Es gibt jedoch einige Hinweise darauf, dass jeder Algorithmus, der den Abstand zweier nicht-konvexer Polyeder berechnet, keine bessere Worst-Case-Laufzeit als $\Omega(n^2)$ haben kann. Für diese, vermutlich noch offene Frage, wurde eine möglicherweise tragfähige Beweisidee vorgestellt.

Literaturverzeichnis

- [1] A. Borrmann. *Computerunterstützung verteilt-kooperativer Bauplanung durch Integration interaktiver Simulationen und räumlicher Datenbanken*. 2008.
- [2] A. Borrmann, S. Schraufstetter, and E. Rank. *Implementing Metric Operators of a Spatial Query Language for 3D Building Models: Octree and B-Rep Approaches*. In: *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 23 No. 1, 2009. pp. 34–46.
- [3] B. Chazelle. *Convex Partitions of Polyhedra: A Lower Bound and worst-Case optimal Algorithm*. In: *SIAM Journal on Computing*, Vol. 13 No. 3. 1984. pp. 488–507.
- [4] B. Chazelle. *Triangulating a simple Polygon in linear Time*. In: *Discrete and Computational Geometry*, Vol. 6. 1991. pp. 485–524.
- [5] E. Dyllong. *Akkurate Abstandsalgorithmen mit Ergebnisverifikation*. 2004.
- [6] K. Fischer, B. Gärtner, T. Herrmann, M. Hoffmann, and S. Schönherr. *Optimal distances*. In: *C. E. Board (Ed.). CGAL User and Reference Manual*. 2008.
- [7] E. Gilbert, D. Johnson, and S. Keerthi. *A fast Procedure for computing the Distance between complex Objects in three-dimensional Space*. In: *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 4 No. 2. 1988. pp. 193–203.
- [8] J. Nocedal and S. Wright. *Numerical Optimization*. 2006.
- [9] S. Quinlan. *Efficient Distance Computation between non-convex Objects*. In: *Robotics and Automation, 1994 Proceedings., 1994 IEEE International Conference on*, Vol. 4. 1994. pp. 3324–3329.

Applying Dynamic Load Balancing Techniques to the Parallel p -Version FEM using Nested Dissection

Jovana Knežević, Ralf-Peter Mundani

Technische Universität München, Computation in Engineering, 80333 München, Deutschland, E-mail: jovana.knezevic.83@gmail.com, Telefon: +49(0)89/28925057

Abstract

Typically, parallelisation strategies based on hierarchical structures suffer from limited speed-up and parallel efficiency values. Hence, sophisticated load balancing techniques become inevitable in order to exploit the underlying computing power. In this paper, we describe a modified master-slave concept for distributed task queues applied on problems from the field of computational structure dynamics. Therefore, the elements of a p -version finite element discretisation are hierarchical organised via an octree structure to be solved using the nested dissection method.

Keywords

Parallelisation, dynamic load balancing, numerical simulation, nested dissection, p -FEM

1 Introduction

Numerical simulation of structure dynamics is a challenging task which entails a huge computational effort and, thus, typically arises the necessity of parallelisation. Classical domain decomposition methods are often not sufficient to exploit the full computation power of the underlying hardware. Hence, sophisticated approaches are necessary in order to obtain good speed-up and efficiency values. Otherwise, sophisticated data structures also play a dominant role to organise the computational tasks and to provide easy access to the underlying data. Here, octrees are advantageous due to their spatial substructuring and their hierarchical organisation of the computational domain.

In our approach, we use octrees for the hierarchical organisation of elements stemming from a p -version finite element discretisation in order to apply a nested dissection method for the solution of the resulting equation system. As on the one hand, the nested dissection method profits from the octree organisation, on the other hand, tree structures

do not provide the best scalability properties for the parallelisation in this case and, thus, make it difficult to harvest the benefits of distributed computing. Therefore, load balancing techniques are inevitable to achieve proper speed-up and efficiency values. Based on a modified master-slave concept, we will describe a technique that uses distributed task queues to cover the dependencies within nested dissection and that allows to foster a maximum degree of parallelism.

The remainder of this paper is as follows: After a short overview of the numerical treatment of the problem in section 2, we will discuss the load balancing strategy and its communication pattern among all processes in section 3. Section 3 also contains first results of our approach, before in the last section we finalise with a short conclusion.

2 Numerical Treatment

Within our structure simulation we use p -version finite elements which are advantageous as higher accuracy can be obtained by increasing the polynomial degree p of the Ansatz functions without changing the underlying mesh, too. Nevertheless, the resulting equation systems have very poor condition numbers and, thus, any sophisticated iterative solvers such as *Conjugate Gradients* (CG) or *multigrid methods* cannot outperform – and typically even underlie – their direct counterparts such as Gauss and relatives. Unfortunately, *Gaussian elimination* is quite expensive and also has a limited potential regarding parallelisation. Hence, different approaches for solving the equation system are necessary.

2.1 Nested Dissection

From the field of domain decomposition, non-overlapping substructuring methods based on the Schur complement are known since the early beginnings. J. A. George was the first to apply these methods on finite element problems [1] by recursively splitting a *domain* Ω in *subdomains* Ω_i and eliminating all unknowns in the interior of Ω_i . The remaining equation system – the Schur complement system – is then associated with the interfaces of Ω_i and can be solved. This already shows the potential of the *nested dissection* (ND) method as all Ω_i are independent from each other and, thus, can be easily processed in parallel.

To eliminate the unknowns in the interior of Ω_i , the matrix K of the corresponding equation system $K \cdot u = d$ is therefore divided into parts belonging to the interior (I) and to the interface (O). Written in block form, the equation system looks like

$$\begin{pmatrix} K_{II} & K_{IO} \\ K_{OI} & K_{OO} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_I \\ u_O \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_I \\ d_O \end{pmatrix}. \quad [1]$$

Expanding this system in two equations and substituting the first one for u_I in the second one leads to the Schur complement system

$$(K_{OO} - K_{OI} \cdot K_{II}^{-1} \cdot K_{IO}) \cdot u_O = d_O - K_{OI} \cdot K_{II}^{-1} \cdot d_I \quad [2]$$

where the influence of the unknowns in the interior has been eliminated¹. Assembling all Schur complements and right-hand sides provides a new equation system that can be solved. In case of more than one recursion step for the substructuring all nested subdomains Ω_j^i of Ω_i are first successively processed in the aforementioned way before ready to be solved.

2.2 Applying Nested Dissection to the p -Version

The finite element discretisation already provides a sufficient sub-structuring, hence, ND can be directly applied on these elements. In order to retrieve a hierarchical organisation necessary to identify interfaces among the subdomains, the single elements are assigned to an octree where each leaf node stores at most one element, i. e. the corresponding element stiffness matrix and right-hand side, or stays empty. Unknowns – referred to as *degrees of freedom* (DOF) – are stored to those nodes from which all elements that contain a certain DOF in the interface can be reached. It's obvious, that the higher, i. e. the closer to the root node, a DOF is stored the later it will be eliminated and, thus, the more computational effort has to be invested [2]. A nice property of this approach can be observed when the input data (material parameters, geometry ...) is modified as only those parts have to be re-computed. From all other parts, the pre-computed Schur complements can be re-used which reduces the total run time on the average at least by an

¹ This can be achieved without directly computing K_{II}^{-1} by a partial Gaussian elimination.

order of magnitude [3]. Even the computations are typically still far beyond real time, ND applied to the p -version provides an important ingredient for interactive applications such as *computational steering* [4].

3 Parallelisation

As one node of the tree always depends on the results, i.e. the Schur complements, of its child nodes, there exists a “natural” order \leq among the nodes² which defines the order of processing. Nevertheless, nodes of different branches do not depend on each other, thus, they can be processed in parallel. Due to the octree structure, the amount of nodes on each level decreases by a factor of 8 and so do speed-up and parallel efficiency. A similar problem stated by Minsky et al. [5] on the parallel summation of $2N$ numbers on N processors shows that speed-up and efficiency of parallel programs based on hierarchical structures are limited. Hence, load balancing strategies are inevitable to exploit the computing power of any underlying architecture such as clusters or supercomputers. Therefore, a modified master-slave strategy is used, where several masters serve the requests of the worker processes. To prevent the typical bottleneck in serving requests when using only one master process, a concept with one main master and several sub masters – so-called traders – has been developed. Here, the main master is the direct interface to the workers while the traders handle all the necessary data exchange.

3.1 Initialisation

In the beginning, the main master analyses the tree structure according to the size of the stored element stiffness matrices and, thus, calculates the total number of operations needed for a Gaussian elimination to be performed for each node and sub-tree, resp. This number is used as weight, i.e. as rough estimation of the amount of work to be done, in order to achieve a fair distribution of tasks among all traders instead of just horizontally cutting the tree at some level. The main master immediately stores the root node in its own queue of tasks. Afterwards, it visits the nodes with the forward edge pointing to the root and compares the calculated number of operations for each of them to the limit. Here, the limit is set as the average number of operations that should be performed by a single trader. If the maximum number of operations for all nodes visited so far is not larger than this limit, the main master is only responsible for the root node. Otherwise, it

² For a set T of tasks, a partial order \leq can be declared by $t_1 \leq t_2$ for $t_1, t_2 \in T$ and \leq representing a reflexive, antisymmetric, transitive relation.

stores the node's identifier which corresponds to the one with the maximum weight in its own task queue and examines the next hierarchy level for the sub-tree having that particular node as the local root. In the latter case, all nodes from the previous step (except the one referred to the main master) as well as the additional ones, i.e. the sons of the mentioned node, will be considered for the next step.

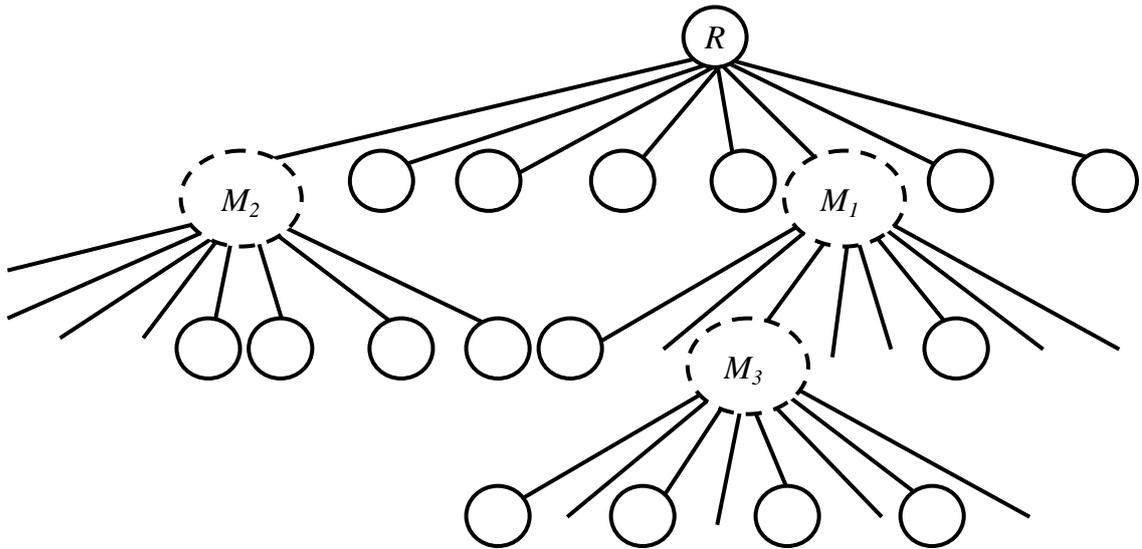


Fig. 1: Starting from the tree root (R) several nodes (M_1 , M_2 , and M_3) with weights exceeding the limit are detected in that order and further processed until all nodes and sub-trees, resp., are below the limit and, thus, ready to be assigned to the different traders.

This step is repeated – visiting nodes in breadth-first fashion, assigning the one with a maximum weight to the main master and taking its sons instead – until all node weights are estimated not to exceed the proposed limit. At this point, all nodes exceeding the limit have been assigned to the main master and all remaining nodes (i.e. local roots of sub-trees not exceeding the limit) are ready for being assigned to the traders. Figure 1 shows a sample tree which has been processed by the main master until all nodes and corresponding sub-trees have weights below the limit.

Once finished with processing the tree according to the algorithm stated above, the main master sorts the remaining nodes in descending order regarding their weights, passing through them from left to right and assigning the corresponding tasks to individual traders, taking care that none of them gets more than the limit allows. If in the end some nodes, due to their size, cannot be assigned to any trader without exceeding the

limit, they will be assigned to the traders with minimum work load. Figure 2 shows the achieved load distribution for 4171 tasks assigned to 4, 8, and 16 traders, resp. Even the single tasks were of both small and large sizes, the final distribution is quite fair and heavy imbalances are not to be observed.

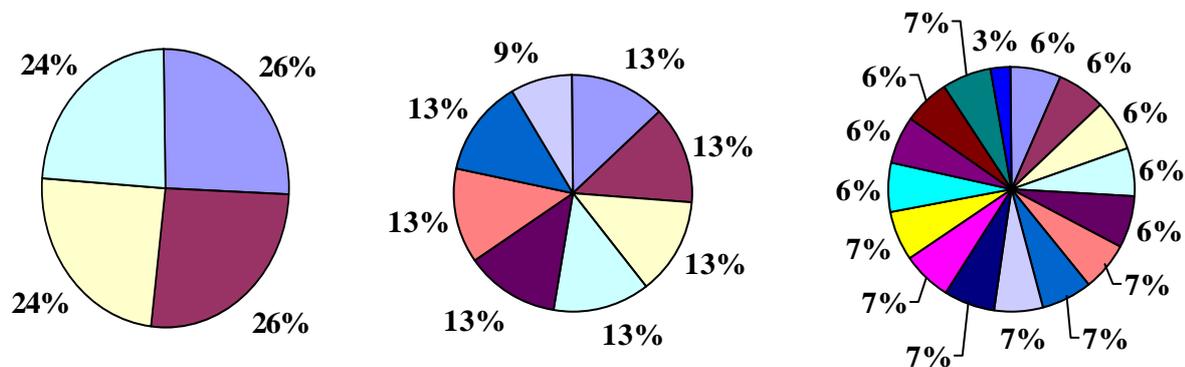


Fig. 2: Load distribution for 4171 tasks, i.e. elements, of different sizes assigned to 4, 8, and 16 traders (from left to right) by the main master.

Up to now, balancing based purely on processor loading has been discussed. Since in parallel systems it is also desired to take into consideration the locality of the data which might be required by the different processes, any load balancing strategy depending on the workload only and, thus, neglecting all kind of neighbourhood information of the data obviously seems to incorporate disadvantages. This seems even more obvious, if we take a simple example of four jobs j_1, j_2, j_3, j_4 with corresponding weights w_1, w_2 much smaller than w_3, w_4 to be run on two processors P_1 and P_2 .

The first two jobs j_1, j_2 should share common input blocks of the data as do the third and the fourth j_3, j_4 . If initially j_1 is located on P_1 and j_3 is located on P_2 , it may be optimal if j_2 is run on P_1 and j_4 is run on P_2 , even if j_1 and j_2 are not time-consuming computations relative to j_3 and j_4 . Our load balancing scheme, for instance, would allocate j_1 and j_3 to P_1 and j_2 and j_4 to P_2 in order to achieve a fair load distribution. However, due to the shared input blocks it may be far more advantageous to assign j_1 and j_2 to P_1 and j_3 and j_4 to P_2 . Even though P_1 will be idle while P_2 is still busy, by allocating the tasks with similar data requirements at the same processor, we reduce the amount of necessary communication (in a message passing system) and, thus, lower the total execution time.

On the other hand, this is, evidently, dependent on the size of the data blocks and the time needed to move these blocks, so having conflicts of this kind in mind, one should rather make a decision based on his own, specific, data and application requirements. In our case, by visiting nodes in breadth-first manner and traversing more into depth only for those nodes whose weight is over the limit, we at least assure to minimise the amount of sub-trees and, thus, to disperse the data more than necessary. Nevertheless, a possible improvement of the algorithm could be to check the locality of the data and to make decisions dependent on both cost of the communication and operations required.

Finally, it is the main master's responsibility to distribute the identifiers of tasks (sub-trees) to the traders. Each trader then analyses all edges of its sub-trees in order to identify dependencies, i. e. the order of processing among its tree nodes. All identifiers of tasks are stored in a queue, together with the information about the dependencies between the single tasks. It is obvious that tasks related to leaf nodes are free of dependencies as the nested dissection approach proceeds bottom-up and, hence, parent nodes always depend on the elimination results of their children. When all sub masters generated their local queue of tasks the initialisation stage has been finished.

3.2 Communication

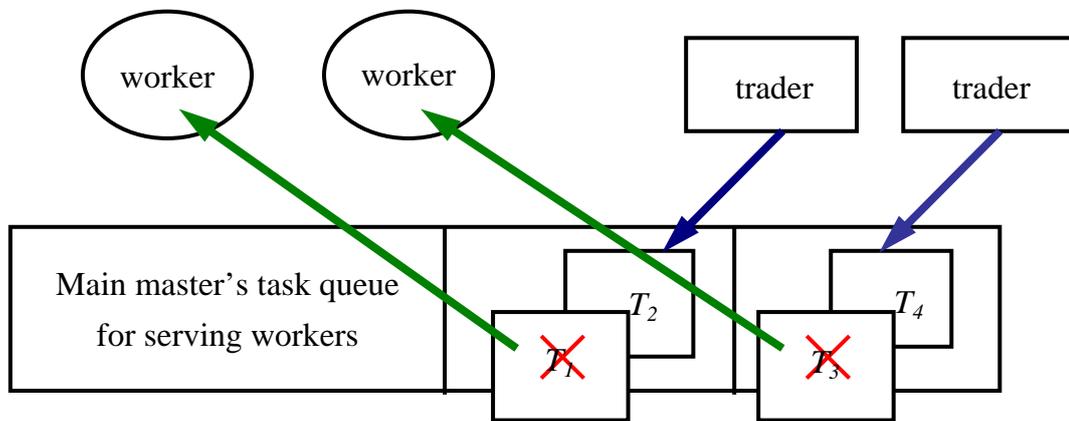


Fig. 3: Main master advertising different tasks T_i from the traders and picking randomly some of these tasks to serve request issued by the workers.

Now, workers can request tasks from the main master. In the same time, traders give away one arbitrary task (free of dependencies) still to be processed from their queue, thus

these tasks become available to the main master for being advertised to the workers. Once a worker requests a task, the main master selects randomly one task and *virtually* couples it to a worker (Figure 3). To avoid the main master becoming a bottleneck due to severe data exchange, a worker process is immediately advised to the respective trader (which owns the task) in order to retrieve all subsequent data necessary for the computation. As soon as one task has been assigned to a worker, the trader gives a new task – if available – to the main master for advertising.

When finished with the computation, the worker sends back the results to the trader it received the task from, thus, the trader can check if any of its dependencies can be solved and new tasks are ready to be offered. Furthermore, the trader forwards this information about resolved dependencies to the main master, thus, it can check its own dependencies as well.

Due to the updates of dependencies in the main master’s queue, at some point, there are tasks available from the main master itself. Since the main master is not likely to have all the data needed for this calculation – moreover, the data is stored in the memory of the traders – it is obliged to find out to which trader(s) the data belongs and to advise the worker process to request the data from the appropriate one(s). When the computation is finished, a worker sends the corresponding task identifier to the main master, hence, it can check for updates within its own queue of tasks.

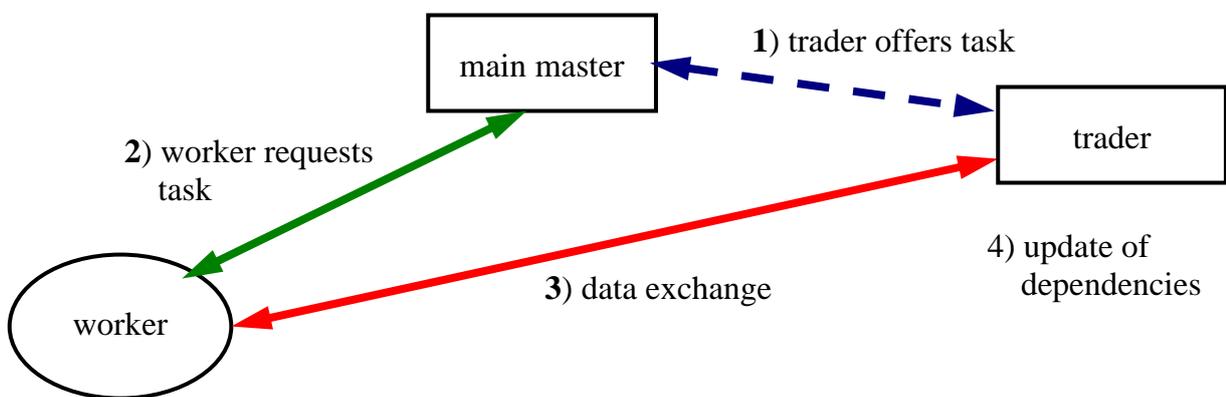


Fig. 4: Communication pattern.

Fig. 4 shows the main part of the communication pattern. Workers are always initiating the communication stage by sending a message to the main master or the traders. This message can either be a request for a task to be processed, a request for a task’s

subsequent data (stiffness matrix, loading vector, Schur complements, ...) or the result of a computation. On the other hand, traders are always catching up the communication stage by receiving a message from the main master or some worker process. The main master is the crucial coordinator of all other processes – its initial operation is also receiving and it only switches to “active” sending in case the entire problem has been solved and both traders and workers have to shut down.

4 Conclusion

In this paper, we have shown a modified master-slave concept for load balancing that tackles the problems related to tree parallelisation which on the other hand is necessary in order to apply a nested dissection method to solve structural problems stemming from a p -version finite element discretisation. As this is work in progress, first results sound very promising. Nevertheless, further research is necessary to study the benefits of our approach concerning speed-up and efficiency values.

Acknowledgements

This work has been financially supported by the International Graduate School of Science and Engineering (IGSSE) at Technische Universität München.

Literaturverzeichnis

- [1] J.A. George. *Nested Dissection of a Regular Finite Element Mesh*. In: *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 10. 1973. pp. 345–363.
- [2] R.-P. Mundani, H.-J. Bungartz, E. Rank, A. Niggel, and R. Romberg. *Extending the p -version of finite elements by an octree-based hierarchy*. *Proc. of the 16th Int. Conf. on Domain Decomposition Methods*. In: *LNCSE Vol. 55*. 2006. pp. 699–706.
- [3] R.-P. Mundani. *Hierarchische Geometriemodelle zur Einbettung verteilter Simulationsaufgaben*. 2006.
- [4] T. Trummer. *Implementierung eines hochperformanten Lösungskonzepts einer Simulations- und Steering-Umgebung im Bereich der Medizintechnik*. *Bachelor's Thesis, Institut für Informatik, Technische Universität München*. 2008.
- [5] M. Minsky, S. Papert. *On some Associative, Parallel and Analog Computations*. *Associative Information Technologies*. 1971.

Efficient computation of sparse saddle-point approximations arising from dual-primal FETI discretization

Kai Schrader, Carsten Könke

Bauhaus-Universität Weimar, Institute of Structural Mechanics, D-99423 Weimar, Germany,

E-mail: kai.schrader@uni-weimar.de, Phone: +49 (0) 3643 / 584506

Abstract

Modern digital material approaches allow to study detailed response of complex, heterogeneous elastic and physical nonlinear material behaviour on various scales (Fig. 1). These approaches require enormous hardware resources with respect to computing power and main memory, due to large number of degrees of freedom in the discretized models. For the numerical part the algorithms to be implemented should then be executed in the best way of efficiency and computation time. Actually the modern FETI-DP algorithm based on non-overlapping domain decomposition techniques [3] provide a scalable approach solving large and distributed FE systems. In this paper a modified and robust computation procedure based on reformulated FETI-DP Saddle Point system will be presented. Thereby the solving of the basic FETI-DP equation systems is done by using approximated Jacobi-preconditioners. This approach avoids large numerical efforts of inverting domain stiffness matrices according to the dual variables.

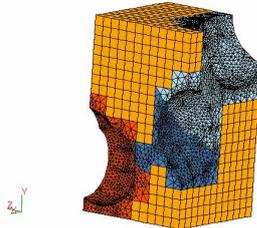


Fig. 1: Hybrid partitioned mesh of an artificial heterogeneous specimen.

Keywords

Domain decomposition, Saddle Point, FETI-DP, preconditioners, elasticity problems.

1 Introduction

Modern digital material approaches, such as multiscale and molecular dynamic simulations, allow to study detailed response of complex, heterogeneous elastic and physical nonlinear material behaviour on various scales. These approaches require enormous hardware resources with respect to computing power and main memory, due to large number of degrees of freedom in the discretized models. For the

numerical part the algorithms to be implemented should then be executed in the best way of efficiency and computation time. Actually the modern FETI-DP algorithm based on non-overlapping domain decomposition techniques provide a scalable approach solving large and distributed FE systems. In this paper a modified and robust computation procedure based on reformulated FETI-DP Saddle Point system will be presented. Thereby the solution of the basic FETI-DP equation systems is done by using approximated Jacobi-preconditioners. This approach avoids large numerical efforts of inverting domain stiffness matrices associated with the dual variables.

This paper will present in section 2 the basic dual-primal FETI [1] method. In section 3 the reformulation to a saddle-point equation system (SPE) will be shown as well as approximation techniques for the inversion of the saddle point matrix using special Jacobi-preconditioners. Section 4 continues with two versions of the algorithmic implementation of the FETI-DP SPE, showing a possible adaption of the conjugate gradient (CG) method for the iterative computation of the reformulated FETI-DP saddle-point approximation.

2 FETI-DP discretization methods

Iterative domain decomposition methods for non-overlapped partitionings like the FETI-DP method are more efficient as classical Schur complement methods with respect to computational efficiency. For any dual-primal FETI (Finite Element Tearing and Interconnecting, [2]) decomposition the d.o.f. of the resulting domain boundaries are described as primal and dual variables, indicated by index Π and Δ , respectively. All other domain interior d.o.f. are denoted as interior variables. After summarizing the dual and interior variables denoted by index B the unknown nodal vector has three components:

- the displacement vector with interior and dual variables \mathbf{u}_B
- the displacement vector with primal variables $\tilde{\mathbf{u}}_\Pi$
- and the vector of Lagrangian multipliers λ

2.1 Fundamental equation of FETI-DP discretization methods

The fundamental equation for the FETI-DP discretization is given as:

$$\begin{bmatrix} K_{BB} & \tilde{K}_{\Pi B}^T & B^T \\ \tilde{K}_{\Pi B} & \tilde{K}_{\Pi\Pi} & 0 \\ B & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{u}_B \\ \tilde{\mathbf{u}}_\Pi \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{f}_B \\ \tilde{\mathbf{f}}_\Pi \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad [1]$$

which has been sorted with regard to variables \mathbf{u}_B , $\tilde{\mathbf{u}}_\Pi$, λ . The global FETI-DP matrix in the equation above has the following components described as:

- K_{BB} as block-diagonal matrix resulting from global interior and dual d.o.f.
- $\tilde{K}_{\Pi\Pi}$ as assembled block-diagonal matrix resulting from primal d.o.f.
- B as jump operator connecting dual d.o.f. of different domains

The final classical FE equation system can be formulated using the above notation. The local stiffness matrices, load vector and vector of unknown variables follow then as:

$$K^{(i)} = \begin{bmatrix} K_{II}^{(i)} & K_{\Delta I}^{(i)T} & K_{\Pi I}^{(i)T} \\ K_{\Delta I}^{(i)} & K_{\Delta\Delta}^{(i)} & K_{\Pi\Delta}^{(i)T} \\ K_{\Pi I}^{(i)} & K_{\Pi\Delta}^{(i)} & K_{\Pi\Pi}^{(i)} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{u}^{(i)} = \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_I^{(i)} \\ \mathbf{u}_\Delta^{(i)} \\ \mathbf{u}_\Pi^{(i)} \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{f}^{(i)} = \begin{Bmatrix} \mathbf{f}_I^{(i)} \\ \mathbf{f}_\Delta^{(i)} \\ \mathbf{f}_\Pi^{(i)} \end{Bmatrix} \quad [2]$$

with I as interior, Δ as dual and Π as primal indices. Summarizing interior and dual variables denoted by index B the vectors results in:

$$\mathbf{u}_B^{(i)} = [\mathbf{u}_I^{(i)} \quad \mathbf{u}_\Delta^{(i)}]^T; \quad \mathbf{f}_B^{(i)} = [\mathbf{f}_I^{(i)} \quad \mathbf{f}_\Delta^{(i)}]^T$$

For the stiffness matrices (local/domain based and assembled) without primal d.o.f. it follows:

$$K_{BB}^{(i)} = \begin{bmatrix} K_{II}^{(i)} & K_{\Delta I}^{(i)T} \\ K_{\Delta I}^{(i)} & K_{\Delta\Delta}^{(i)} \end{bmatrix}; \quad \text{assembled: } K_{BB} = \text{diag}_{i=1}^N (K_{BB}^{(i)})$$

The elimination of the interior, dual and primal d.o.f. leads to:

$$\begin{bmatrix} K_{BB} & \tilde{K}_{\Pi B}^T & B^T \\ 0 & \tilde{S}_{\Pi\Pi} & -\tilde{S}_{\alpha\Pi}^T \\ 0 & 0 & -F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_B \\ \tilde{\mathbf{u}}_\Pi \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_B \\ \tilde{\mathbf{f}}_\Pi - \tilde{K}_{\Pi B} K_{BB}^{-1} \mathbf{f}_B \\ -\mathbf{d} \end{bmatrix} \quad [3]$$

with

$$\tilde{S}_{\Pi\Pi} = \tilde{K}_{\Pi\Pi} - \tilde{K}_{\Pi B}^T K_{BB}^{-1} \tilde{K}_{\Pi B} \quad [4]$$

as Schur complement operator of \tilde{K}

$$F = BK_{BB}^{-1}B^T + BK_{BB}^{-1}\tilde{K}_{\Pi B}^T\tilde{S}_{\Pi\Pi}^{-1}\tilde{K}_{\Pi B}K_{BB}^{-1}B^T \quad [5]$$

$$\mathbf{d} = BK_{BB}^{-1}\mathbf{f}_B - BK_{BB}^{-1}\tilde{K}_{\Pi B}^T\tilde{S}_{\Pi\Pi}^{-1}(\tilde{\mathbf{f}}_\Pi - \tilde{K}_{\Pi B}K_{BB}^{-1}\mathbf{f}_B) \quad [6]$$

The final reduced equation system is given as:

$$F\lambda = \mathbf{d} \quad [7]$$

In most cases F will not be explicitly generated and a (preconditioned) conjugate gradient method is used for the iterative computation of the particular equation systems. In the following section it will be shown how to solve the saddle-point equation system obtained from the above described FETI-DP discretization. Thereby a conjugate gradient version of an Uzawa [4] iteration scheme will be modified for solving the resulting FETI-DP SPE.

3 Solving the FETI-DP saddle-point problem

The basic formulation for FETI-DP discretizations of chapter 2 can be reformulated as Saddle Point equation system (SPE) by simply eliminating the primal variables. The basic notation of the FETI-DP Saddle Point system is given by

$$\begin{bmatrix} K_{BB} & B^T \\ B & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_B \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{B,mod} \\ 0 \end{bmatrix} \quad [8]$$

with $\mathbf{f}_{B,mod} = \mathbf{f}_B - \tilde{K}_{\Pi B}^T \tilde{\mathbf{u}}_\Pi$. The second row of the basic equation system (1) can be written as

$$\tilde{K}_{\Pi\Pi} \tilde{\mathbf{u}}_\Pi = \tilde{\mathbf{f}}_\Pi - \tilde{K}_{\Pi B} \mathbf{u}_B \quad [9]$$

The main feature of Saddle Point equation systems results in comfortable solution approach which allows iterative solver techniques for eq. (8) without knowing the exact inversion of K_{BB} and without loosing the optimal scaling properties of the FETI-DP algorithm. One additional advantage occurs with the resulting right hand side, where all terms according to the Langragian multipliers λ are zero, which reduces the original inverting problem to block K_{BB} if \mathbf{u}_B should be iteratively solved. With the first row of eq. (8) it follows:

$$K_{BB} \mathbf{u}_B = \mathbf{f}_B - \tilde{K}_{\Pi B}^T \tilde{\mathbf{u}}_\Pi - B^T \lambda \quad [10]$$

Introducing eq. (9) into eq. (10) we obtain

$$K_{BB} \mathbf{u}_B = \mathbf{f}_B - \tilde{K}_{\Pi B}^T \tilde{K}_{\Pi\Pi}^{-1} (\tilde{\mathbf{f}}_\Pi - \tilde{K}_{\Pi B} \mathbf{u}_B) - B^T \lambda \quad [11]$$

with the definition of $\tilde{\mathbf{f}}_{B,S}$ and introduction of the interior-dual Schur complement operator \tilde{S}_{BB} as follows

$$\tilde{\mathbf{f}}_{B,S} = \tilde{K}_{\Pi B}^T \tilde{K}_{\Pi\Pi}^{-1} \tilde{\mathbf{f}}_\Pi ; \quad \tilde{S}_{BB} = K_{BB} - \tilde{K}_{\Pi B}^T \tilde{K}_{\Pi\Pi}^{-1} \tilde{K}_{\Pi B} \quad [12]$$

the final notation leads to:

$$K_{BB} \mathbf{u}_B = \mathbf{f}_B - \tilde{\mathbf{f}}_{B,S} + (K_{BB} - \tilde{S}_{BB}) \mathbf{u}_B - B^T \lambda \quad [13]$$

The reduced and inverted FETI-DP SPE is obtained by:

$$\mathbf{u}_B = \tilde{S}_{BB}^{-1} \left(\mathbf{f}_B - \tilde{\mathbf{f}}_{B,S} - B^T \lambda \right) = \tilde{S}_{BB}^{-1} \left(\tilde{\mathbf{g}}_{B,S} - B^T \lambda \right) \quad [14]$$

The modified FETI-DP SPE follows with

$$\begin{bmatrix} \tilde{S}_{BB} & B^T \\ B & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_B \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{g}}_{B,S} \\ 0 \end{bmatrix} \quad [15]$$

Taking the condition $B\mathbf{u}_B = 0$ and replacing \mathbf{u}_B with the first row of eq. (15) results in

$$B\tilde{S}_{BB}^{-1}B^T \lambda = B\tilde{S}_{BB}^{-1}\tilde{\mathbf{g}}_{B,S} \quad [16]$$

With

$$\tilde{Q}_{BB} = B\tilde{S}_{BB}^{-1}B^T \quad \text{and} \quad \tilde{\mathbf{c}}_{B,S} = B\tilde{S}_{BB}^{-1}\tilde{\mathbf{g}}_{B,S} \quad [17]$$

the gradient of the quadratic function

$$F(\lambda) = \frac{1}{2} \lambda^T \tilde{Q}_{BB} \lambda - \tilde{\mathbf{c}}_{B,S}^T \lambda \quad [18]$$

results in

$$-\nabla F(\lambda^{(k)}) = \tilde{\mathbf{c}}_{B,S} - \tilde{Q}_{BB} \lambda = B\tilde{S}_{BB}^{-1}\tilde{\mathbf{g}}_{B,S} - B\tilde{S}_{BB}^{-1}B^T \lambda^{(k)} = B\mathbf{u}_B^{(k)} \quad [19]$$

which corresponds to the basic functional of the conjugate gradient method. Backsubstitution into eq. (19) yields:

$$-\nabla F(\lambda^{(k)}) = B \left[K_{BB} - \tilde{K}_{\Pi B}^T \tilde{K}_{\Pi\Pi}^{-1} \tilde{K}_{\Pi B} \right]^{-1} \left(\mathbf{f}_B - \tilde{K}_{\Pi B}^T \tilde{K}_{\Pi\Pi}^{-1} \tilde{\mathbf{f}}_{\Pi} \right) \quad [20]$$

$$- \left[B \left[K_{BB} - \tilde{K}_{\Pi B}^T \tilde{K}_{\Pi\Pi}^{-1} \tilde{K}_{\Pi B} \right]^{-1} B^T \right] \lambda^{(k)} = B\mathbf{u}_B^{(k)} \quad [21]$$

The convergence is ensured if

$$\rho(B\tilde{S}_{BB}^{-1}B^T) < \frac{2}{\alpha} \quad [22]$$

is fulfilled - with α as fixed step size and ρ as spectral radius. Before presenting the algorithmic implementation the next section describes different methods to create a usefull preconditioning matrix M_{BB}^{-1} either approximating the inversion of the interior-dual Schur complement operator or used as implicit preconditioning matrix solving iteratively the Schur problem with the conjugate gradient method.

3.1 Various techniques in building the left-side preconditioner M^{-1}

In this section three different preconditioners will be defined for performing the element based test examples as well as numerical results as of chapter 4. The following notation for M^{-1} will be used during the next chapters:

- M_J^{-1} as the classical Jacobi preconditioning technique
- M_D^{-1} defined from the main diagonal of M_J^{-1}
- M_{triD}^{-1} as approximate tri-diagonal matrix of K_{BB}^{-1}

Of course more versions are possible but their investigation should not be the task of this paper. In matrix notation the first preconditioner is defined as:

$$M^{-1} = \begin{bmatrix} M_{BB}^{-1} & M_{\lambda B}^{T-1} \\ M_{\lambda B}^{-1} & M_{\lambda\lambda}^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G & B^T \\ B & 0 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \alpha E & B^T \\ B & 0 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad [23]$$

with B as the FETI-DP jump operator, G as an original or approximated version of K_{BB} and E as the identity matrix. Since the block M_{22} , the most important characteristic of Saddle Point equations, is equal to zero a simple inversion of M is directly given with only sparse matrix-matrix operations and thereby very low numerical effort if B is known:

$$M^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha}(E - B^T(BB^T)^{-1}B) & B^T(BB^T)^{-1} \\ (BB^T)^{-1}B & -\alpha(BB^T)^{-1} \end{bmatrix} \quad [24]$$

The introduction of the scaling factor α means the approximation of the main diagonal of G as well as K_{BB} as scaled identity matrix αE . Considering the original main diagonal of K_{BB} as matrix C leads to the Jacobi preconditioner M_J^{-1} :

$$M_J^{-1} = \begin{bmatrix} C^{-1}(E - B^T(\beta E)^{-1}B) & B^T(\beta E)^{-1} \\ (\beta E)^{-1}B & -C(\beta E)^{-1} \end{bmatrix} \quad [25]$$

In most of the investigated examples the product of the FETI-DP jump operators results in a scaled identity matrix βE seen in the equation above. For the reduced SPE it is only necessary to construct M_{BB}^{-1} as M_J^{-1} :

$$M_J^{-1} = M_{BB}^{-1} = C^{-1}(E - B^T(\beta E)^{-1}B) \quad [26]$$

The second version M_D^{-1} takes only the main diagonal of M_J^{-1} into account:

$$M_D^{-1} = \text{diag}[M_J^{-1}] \quad [27]$$

Further M_{triD}^{-1} is an approximate inversion of K_{BB} using the main diagonal and additionally one neighboring diagonal from above and below of the main diagonal as written as:

$$M_{triD}^{-1} = \text{tridiag}[x_i, z_i, y_i] \sim \left[\text{tridiag}[K_{BB}] \right]^{-1} \quad [28]$$

The construction of each row i with three entries x_i, z_i, y_i of M_{triD}^{-1} results from solving a 3 by 3 linear equation system which can be done by the scheme:

$$\begin{bmatrix} c_{i-1}^2 + a_{i-1}^2 + b_{i-1}^2 & c_i a_{i-1} + a_i b_{i-1} & c_{i+1} b_{i-1} \\ c_i a_{i-1} + a_i b_{i-1} & c_i^2 + a_i^2 + b_i^2 & c_{i+1} a_i + a_{i+1} b_i \\ c_{i+1} b_{i-1} & c_{i+1} a_i + a_{i+1} b_i & c_{i+1}^2 + a_{i+1}^2 + b_{i+1}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ z_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{i-1} \\ a_i \\ c_{i+1} \end{bmatrix}$$

with $c_0 = c_1 = a_0 = b_0 = b_n = b_{n+1} = a_{i+1} = c_{n+1} = 0$.

Further K_{BB} must be symmetric positiv definite and regular for sucessfull solving the 3 by 3 equation systems which is the case for most of the FE discretization of elasticity problems. It should be mentioned that this technique will lead to bad results related to convergence behaviour as well as accuracy of the resulting vector of nodal unknowns according to the referenced literature [5]. To enable the evaluation of the approximation quality for the different preconditioners the Frobenius norm is used:

$$\| B \|_F^2 = \sum_i^n \sum_j^n b_{ij}^2 \quad [29]$$

The approximation error results in

$$\varepsilon_F = \lim \frac{\| E - M_{BB}^{-1} K_{BB} \|_F}{\| K_{BB} \|_F} \quad [30]$$

which finally reproduces an equivalent error in the nodal solution vector $\mathbf{u} = [\mathbf{u}_I \mathbf{u}_\Delta \mathbf{u}_\Pi]^T$ of the FETI-DP discretization. In the next sections a modified (conjugate gradient-)version of the Uzawa algorithm for the computation of the FETI-DP saddle-point problem and some numerical tests will be presented.

4 Algorithmic implementation and numerical tests

4.1 Sequential versions of Uzawa and Uzawa-CG

The following sequential algorithms are describing the iterative solution process of the FETI-DP saddle-point equation. Therefore the Uzawa iteration scheme for saddle-point problems was adapted and modified. The first version, seen below in algorithm 4.1, is the standard Uzawa algorithm solving the FETI-DP SPE. After obtaining the solution of the dual-interior d.o.f. and of the vector of the Lagrangian multipliers an update step at the end of the iteration computes the vector of primal nodal unknowns. A second (conjugate gradient) Uzawa version includes additionally the preconditioned CG method for iterative computation of the (interior-dual) Schur complement problem $\tilde{S}_{BB} \mathbf{h} = \mathbf{p}$.

Algorithm 4.1: Uzawa algorithm with exact iteration steps for FETI-DP SPE.

Require: \tilde{S}_{BB} is invertable.

1. Choose $\lambda^{(0)}$ and $\mathbf{u}_B^{(1)} = \tilde{S}_{BB}^{-1} (\mathbf{f}_B - \tilde{\mathbf{f}}_{B,S} - B^T \lambda^{(0)})$; factorize $\tilde{K}_{\Pi\Pi}$ with $\tilde{\mathbf{f}}_{B,S} = \tilde{K}_{\Pi B}^T \tilde{K}_{\Pi\Pi}^{-1} \tilde{\mathbf{f}}_{\Pi}$ and $\tilde{S}_{BB}^{-1} = (K_{BB} - \tilde{K}_{\Pi B}^T \tilde{K}_{\Pi\Pi}^{-1} \tilde{K}_{\Pi B})^{-1}$
 2. **for** $k = 1, 2, \dots$ **do**
 3. $\mathbf{q}^{(k)} = -B\mathbf{u}_B^{(k)}$
 4. $\mathbf{p}^{(k)} = B^T \mathbf{q}^{(k)}$
 5. $\mathbf{h}^{(k)} = \tilde{S}_{BB}^{-1} \mathbf{p}^{(k)}$
 6. $\alpha^{(k)} = \frac{\mathbf{q}^{(k)T} \mathbf{q}^{(k)}}{\mathbf{p}^{(k)T} \mathbf{h}^{(k)}}$
 7. $\lambda^{(k)} = \lambda^{(k-1)} - \alpha^{(k)} \mathbf{q}^{(k)}$
 8. $\mathbf{u}_B^{(k+1)} = \mathbf{u}_B^{(k)} + \alpha^{(k)} \mathbf{h}^{(k)}$
 9. **end for**
 10. Update $\tilde{\mathbf{u}}_{\Pi}^{(k+1)} = \tilde{K}_{\Pi\Pi}^{-1} (\tilde{\mathbf{f}}_{\Pi} - \tilde{K}_{\Pi B} \mathbf{u}_B^{(k+1)})$
-

With the introduction of three additional vectors the conjugate gradient version of the standard Uzawa algorithm can be obtained. Furthermore a preconditioned conjugate gradient method is implicit introduced for iteratively solving the Schur complement problem and therefore avoiding the (direct) factorization of \tilde{S}_{BB} . The algorithm is shown below (algorithm 4.2).

Algorithm 4.2: CG version of Uzawa algorithm for FETI-DP SPE with implicit PCG computation of $\tilde{S}_{BB}\mathbf{h}^{(k)} = \mathbf{p}^{(k)}$.

Require: \tilde{S}_{BB} is invertable.

1. Choose $\lambda^{(0)}$ and $\mathbf{u}_B^{(1)} = \tilde{S}_{BB}^{-1}(\mathbf{f}_B - \tilde{\mathbf{f}}_{B,S} - B^T \lambda^{(0)})$; factorize $\tilde{K}_{\Pi\Pi}$ with $\tilde{\mathbf{f}}_{B,S} = \tilde{K}_{\Pi B}^T \tilde{K}_{\Pi\Pi}^{-1} \tilde{\mathbf{f}}_\Pi$ and $\tilde{S}_{BB} = (K_{BB} - \tilde{K}_{\Pi B}^T \tilde{K}_{\Pi\Pi}^{-1} \tilde{K}_{\Pi B})$ and build preconditioner M
2. Set $\mathbf{d}^{(1)} = -\mathbf{q}^{(1)} = B\mathbf{u}_B^{(1)}$
3. **for** $k = 1, 2, \dots$ **do**
4. $\mathbf{p}^{(k)} = B^T \mathbf{d}^{(k)}$
5. $\mathbf{h}^{(k)} = \tilde{S}_{BB}^{-1} \mathbf{p}^{(k)}$ as
 - 5.01 Choose $\mathbf{h}_0^{(k)}$ and $\tilde{\mathbf{r}}_0 = \mathbf{p}^{(k)} - \tilde{S}_{BB} \mathbf{h}_0^{(k)}$
 - 5.02 $\tilde{\mathbf{h}}_0 = M\tilde{\mathbf{r}}_0$
 - 5.03 $\tilde{\mathbf{d}}_0 = \tilde{\mathbf{h}}_0$
 - 5.04 **for** $j = 1, 2, \dots$ **do**
 - 5.05 $\tilde{\alpha}_j = \frac{\tilde{\mathbf{r}}_j^T \tilde{\mathbf{h}}_j}{\tilde{\mathbf{d}}_j^T \tilde{S}_{BB} \tilde{\mathbf{d}}_j}$
 - 5.05 $\mathbf{h}_{j+1}^{(k)} = \mathbf{h}_j^{(k)} + \tilde{\alpha}_j \tilde{\mathbf{d}}_j$
 - 5.06 $\tilde{\mathbf{r}}_{j+1} = \tilde{\mathbf{r}}_j - \tilde{\alpha}_j \tilde{S}_{BB} \tilde{\mathbf{d}}_j$
 - 5.07 $\tilde{\mathbf{h}}_{j+1} = M\tilde{\mathbf{r}}_{j+1}$
 - 5.08 $\tilde{\beta}_j = \frac{\tilde{\mathbf{r}}_{j+1}^T \tilde{\mathbf{h}}_{j+1}}{\tilde{\mathbf{r}}_j^T \tilde{\mathbf{h}}_j}$
 - 5.09 $\tilde{\mathbf{d}}_{j+1} = \tilde{\mathbf{h}}_{j+1} + \tilde{\beta}_j \tilde{\mathbf{d}}_j$
 - 5.10 **end for** (implicit PCG)
6. $\alpha^{(k)} = \frac{\mathbf{q}^{(k)T} \mathbf{q}^{(k)}}{\mathbf{p}^{(k)T} \mathbf{h}^{(k)}}$
7. $\lambda^{(k)} = \lambda^{(k-1)} + \alpha^{(k)} \mathbf{d}^{(k)}$
8. $\mathbf{u}_B^{(k+1)} = \mathbf{u}_B^{(k)} - \alpha^{(k)} \mathbf{h}^{(k)}$
9. $\mathbf{q}^{(k+1)} = -B\mathbf{u}_B^{(k+1)}$
10. $\beta^{(k)} = \frac{\mathbf{q}^{(k+1)T} \mathbf{q}^{(k+1)}}{\mathbf{q}^{(k)T} \mathbf{q}^{(k)}}$
11. $\mathbf{d}^{(k+1)} = -\mathbf{q}^{(k+1)} + \beta^{(k)} \mathbf{d}^{(k)}$
12. **end for** (Uzawa-CG)

$$13. \quad \text{Update } \tilde{\mathbf{u}}_{\Pi}^{(k+1)} = \tilde{\mathbf{K}}_{\Pi\Pi}^{-1} \left(\tilde{\mathbf{f}}_{\Pi} - \tilde{\mathbf{K}}_{\Pi B} \mathbf{u}_B^{(k+1)} \right)$$

4.2 Numerical convergence tests

The first test examples in 2D with 2 elements, each for one domain, uses the (FETI-DP) Saddle Point discretization solving the six nodal unknowns with the sequential version of a conventional iterative Dirichlet-Neumann relaxation algorithm. Fig. 2 indicates primal d.o.f. at the node marked with a black dot. The dual d.o.f. are in the node marked with the small rectangle. The computation is based on linear elastic material and plane stress state.

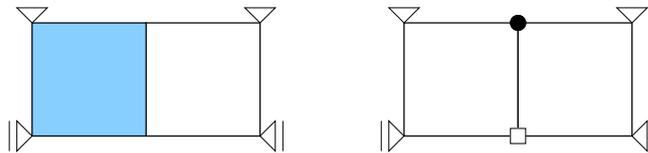


Fig. 2: Example (1) with 1 element per domain (left) and the resulting FETI-DP discretization (right).

This test should show the slow convergence behaviour as well as the dependency on the choice of the relaxation parameter as disadvantages of this kind of (D-N) iteration schemes. Three different types of preconditioners are considered (see section 3.2) during the convergence analysis. The relaxation parameter ω was varied between 0.8-2.0 and the obtained accuracy was taken from the 10th iteration step as illustrated in fig. 3. The optimal value of ω was 1.55.

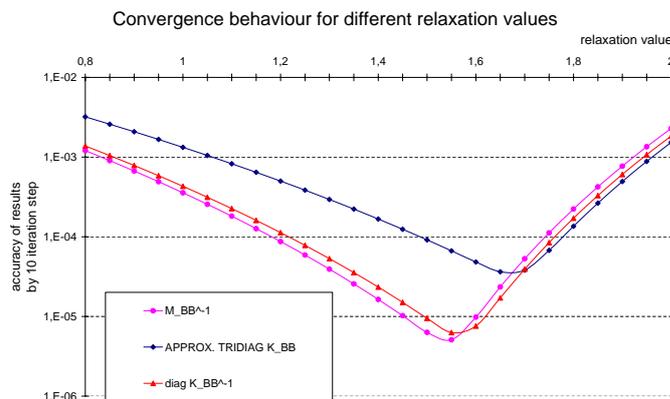


Fig. 3: Convergence behaviour regarding to different relaxation values and preconditioning techniques.

The next example discretized by 6 elements with 2 elements per domains is partitioned in a way that all domains are sequentially coupled and each boundary is only connecting 2 domains. Again the primal nodes are denoted with black dots and the dual nodes with small rectangles, respectively. The partitioning is illustrated in fig. 4, upper left, the FETI-DP discretization is shown at the bottom left and on the right the duplication of the dual nodes are shown. For this example the algorithm 4.2 was used for computation of the unknowns of \mathbf{u}_B and λ of the FETI-DP saddle-point problem.

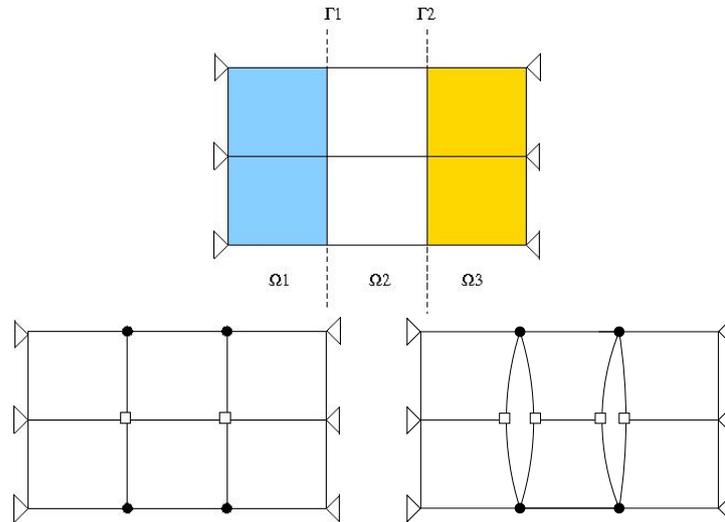


Fig. 4: Example (2) with FETI-DP discretization for 3 domains with 2 elements per domain: upper left - partitioning in 3 domains; bottom left - FETI-DP discretization; bottom right - duplication of the dual nodes.

The results with respect to necessary iteration steps (if $TOL \leq 1e-06$) and obtained accuracy can be seen in the table below:

algorithm	iteration	accuracy	$\ \mathbf{r}_{k+1}\ _{iPCG}$	note
D-N	>10	1.0e-06	–	-
Uzawa	9	3.4e-07	–	-
Uzawa-CG	4	0.0e+00	–	-
Uzawa-CG iPCG (1)	4	1.0e-06	1.6e-04	with implicit PCG
Uzawa-CG iPCG (2)	4	4.6e-10	2.5e-07	with implicit PCG
Uzawa-CG iPCG (3)	4	0.0e+00	6.4e-19	with implicit PCG

The table shows the better convergence behaviour using the CG version of the Uzawa algorithm compared to the standard Uzawa iteration procedure for the computation of the resulting FETI-DP saddle-point equation system. For large discretized problems the Uzawa-CG with an implicit preconditioned conjugate gradient method for iteratively solving the Schur complement problem will lead to additional time savings.

5 Outlook

Our approach results in substantial computational time savings due to avoiding the inversion of the domain stiffness matrices with direct solvers as well as keeping the scalable properties of the resulting preconditioners and FETI-DP jump operators. As a result a sequential and scalable algorithm based on the FETI-DP Saddle Point system can be obtained. First numerical results of the implemented Uzawa algorithms for FETI-DP SPE applied on multi-domain decomposition of heterogeneous elasticity problems in 3D will be presented in the conference.

In future research work these solution methods will be adapted for simulation of physical nonlinear problems, such as (nonlocal) damage effects in microstructure material models, leading towards new possibilities of numerical simulations for multiphase materials in 3D microscale. Furthermore the model will be adapted for the hybrid FE discretization and mechanical damage analysis of μ CT based image data of real multiphase samplings.

Acknowledgement

These research is supported by the German Research Foundation (DFG), which is gratefully acknowledged by the authors.

References

- [1] C. Farhat and F. Roux. *A Method of Finite Element Tearing and Interconnecting and its parallel Solution. Int J Numer Methods Eng* vol. 32, pp. 1205-1227. 1991.
- [2] A. Klawonn and O. Rheinbach. *Robust FETI-DP Methods for heterogeneous three dimensional Elasticity Problems. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* vol 196, pp. 1400-1414. 2007.
- [3] A. Toselli and O. Widlund. *Domain Decomposition Methods - Algorithms and Theory. Springer series in computational mathematics* vol. 34, Springer-Verlag, Berlin, Germany. 2005.
- [4] Z. Wang. *Optimization of the parameterized Uzawa Preconditioners for Saddle Point Matrices. Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 226, pp. 136-154, Issue 1. 2009.

EnOB:Lernnetz

Lernen mit Hilfe von webbasierter Gebäudesimulation

Arne Abromeit, Andreas Wagner

*Universität Karlsruhe, Fachgebiet Bauphysik und Technischer Ausbau, 76131
Karlsruhe, Deutschland, E-mail: arne.abromeit@kit.edu, Telefon:
+49(0)72 1/6082 178*

Kurzfassung

Mit Hilfe von webbasierter Gebäudesimulation soll es Studierenden ermöglicht werden, energetische und bauphysikalische Zusammenhänge an Räumen und Gebäuden zu begreifen. Durch die Verwendung eines zentralen Gebäudedatenmodells ist es möglich, unterschiedliche Simulationsprogramme mit einheitlichen Daten zu bedienen. Technische Hürden werden für Studierende reduziert, das selbständige Lernen gefördert.

Stichworte

Gebäudesimulation, Gebäudedatenmodell, Energieoptimiertes Bauen, Bauphysik, Lernplattform, eLearning

1 Einleitung

Im Themenbereich Energie und Bauphysik gibt es eine Vielzahl von einfachen bis hin zu sehr speziellen und komplexen Berechnungsprogrammen auf dem Markt.

Möchte ein Studierender beispielsweise Tages- oder Kunstlicht in Räumen oder Gebäuden untersuchen, sind heute verschiedenartige Programme verfügbar: Einige sind speziell für Kunstlichtplanung und zur Erstellung der notwendigen Nachweise konzipiert, andere sind so allgemein gehalten, dass theoretisch fast jede Beleuchtungssituation damit berechnet werden könnte, die Programme selbst allerdings nur schwer erlernbar sind. Zusammenhänge zwischen Tages- und Kunstlicht lassen sich mit einfachen Programmen zwar ansatzweise hinsichtlich der Tageslichtautonomie oder des Kunstlicht- und Strombedarfes noch berechnen, die Ergebnisse sind aber nicht sehr zufrieden stellend, da wichtige Aspekte wie beispielsweise der Sonnenschutz am Fenster nicht berücksichtigt

werden. Möchte man einen Schritt weiter gehen und neben dem Strombedarf für das Licht auch den Gesamtenergiebedarf für die betrachtete Zone ermitteln, müsste man die Software wechseln und eine andere spezialisierte Software für den Themenbereich Energie verwenden. Als Folge muss die zuvor modellierte Zone in der Regel neu modelliert oder zahlenmäßig eingegeben werden. Möchte ein Studierender durch die Variation von Parametern wie des Sonnenschutzes oder der Fenstergeometrie Zusammenhänge verstehen, sind hierfür zwei unterschiedliche Programme notwendig. Sollen darüber hinaus weitere Aspekte wie Akustik oder thermischer Komfort mit einbezogen werden, wird die Anzahl zu verwendender Software weiter erhöht und die Bildung von Varianten dadurch erschwert.

Zu den Aspekten mehrfacher Modellierung und der unterschiedlichen Handhabung verschiedenartiger Programme kommt hinzu, dass nicht jede Software für die gängigen Betriebssysteme verfügbar ist oder durch Lizenzen der Zugang für Studierende erschwert wird.

Komplexe Simulationsprogramme sind für Studierende aufgrund des Umfangs eher ungeeignet, wenn nur einfache Kenngrößen abgeschätzt und Zusammenhänge verständlich gemacht werden sollen. Dies gilt besonders für Studierende, die neu in eine Thematik einsteigen möchten. Soll darüber hinaus selbständiges Lernen ermöglicht werden, ist es wichtig, Hürden und technische Schranken soweit wie möglich zu reduzieren.

2 Lernen an virtuellen Gebäuden

Die vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technik geförderte Lernplattform „EnOB:Lernnetz“ bietet Studierenden die Möglichkeit, sich selbständig Grundlagen zu den Themen „energieoptimiertes Bauen“ und „Bauphysik“ zu erarbeiten. Die Plattform ist in einen inhaltlichen und einen experimentellen Teil gegliedert. Durch interaktive Lernmodule können Studierende neue Themen erarbeiten oder vertiefen.

Neben dem inhaltlichen Teil eröffnet der experimentelle Teil die Möglichkeit, das eher theoretische Wissen an virtuellen Gebäuden zu überprüfen. Im experimentellen Teil können energetische und bauphysikalische Berechnungen an beliebigen Gebäuden durchgeführt werden, um daran Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Thematiken zu verstehen. Das Spektrum der Berechnungsmodule soll bis zum Ende des Projekts die Themenbereiche Energie, visueller Komfort, Licht, Wärme, Feuchte, Akustik und Brandschutz umfassen.

2.1 Die Lernplattform

Die Lernplattform ist webbasiert, so dass das Lernnetz mit gängigen Browsern nutzbar ist. Besitzt ein Studierender einen Zugang (*Account*) zur Plattform, benötigt er keine Lizenzen für einzelne Berechnungsprogramme. Auch sind die Betriebssystemeinschränkungen so gering wie möglich, so dass die Lernplattform unter den heutigen Betriebssystemen in vollem Umfang nutzbar ist. Dadurch werden technische Hürden für den Lernenden deutlich reduziert.

Bei der Konzeption der Plattform wurde auf Komponenten und Module Wert gelegt: Grafische Komponenten sind dabei Bedienelemente, die auch unabhängig vom Lernnetz in energetischen und bauphysikalischen Anwendungen eingesetzt werden können. Ein Beispiel für eine grafische Komponente ist der Editor für Schichtaufbauten von Wänden, Decken und Dächern.

Module sind klar abgegrenzte Programmteile, die im Lernnetz aufgerufen werden und innerhalb dieser Umgebung wieder verwendet werden können. Komponenten und Module werden aus technischen und rationellen Gründen verwendet, verbessern aber auch die Nutzerfreundlichkeit: Es entsteht eine einheitliche Oberfläche, die an unterschiedlichen Stellen gleich aussieht und sich auch gleich verhält. Dadurch wird die Einarbeitungszeit für verschiedene Berechnungsmodule reduziert und die intuitive Bedienung gefördert.



Abb. 1: Lernplattform im Browser – Übersicht über Berechnungsmodule im Bereich *Licht*.

2.2 Technischer Aufbau

Das System für das EnOB:Lernnetz ist Java-basiert, modular und abstrakt angelegt. Die Verwendung von Java als Programmiersprache bietet den Vorteil, dass Programmteile auf verschiedenen Betriebssystemen und auch als Plug-In in Browsern verwendet werden können. Außerdem ergibt sich bei einem Client-Server-System weiter der Vorteil, dass identische Programmteile sowohl auf dem Client (z.B. im Browser) als auch auf dem Server ausgeführt werden können.

Durch den modularen Aufbau des Systems sind die einzelnen Systemteile klar abgegrenzt und können weitgehend unabhängig voneinander entwickelt werden. Da es möglich ist, bestehende Module einzubinden, kann der Entwicklungsaufwand für neue Module stark reduziert werden.

Der Teil des Systems, auf den Module zurückgreifen können, ist abstrakt gehalten und für Client-Server-Implementierungen konzipiert: Dadurch kann das Grundsystem in verschiedenen webbasierten, aber auch nativen Umgebungen implementiert werden, ohne die einzelnen Module ändern zu müssen.

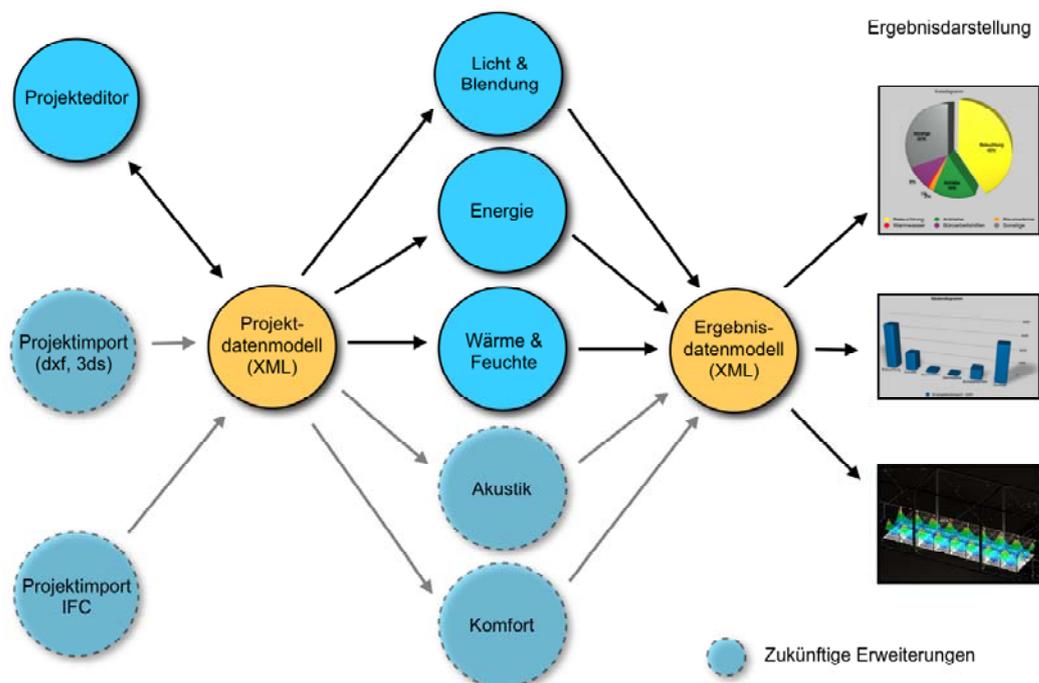


Abb. 2: Vereinfachter modularer Aufbau des Systems – Projekt- und Ergebnisdaten sind zentrale Bestandteile des EnOB:Lernnetz.

Die Basis des abstrakten Systems bilden eigenständige grafische und nichtgrafische Komponenten, einheitliche Datenformate für Projekte und Ergebnisse, sowie der Zugriff auf native Programme über Dienste (*Tasks*). Über diese Dienste können komplexe Berechnungsprogramme wie zum Beispiel *Radiance* [1] für die Lichtberechnung eingebunden werden. Das Basissystem übernimmt die Verwaltung von serverseitigen und clientseitigen Modulen, sowie von Projekten und Ergebnissen. Module greifen ausschließlich auf das Basissystem und auf Komponenten zurück.

Für die Implementierung als webbasierte Lernplattform wird ein Linux-System mit einem Web-, Datenbank- und einem Java-Servlet-Server verwendet. Dazu wurde ein bestehendes eLearning-System verwendet und erweitert.

Als Grundlage für die neue Lernplattform EnOB:Lernnetz dient die *Open Source*-Lernplattform „Ilias“ [2]. Dies ermöglicht, grundlegende eLearning-Komponenten wie Foren, Umfragen, Kommunikation, Tests und Lernmodule zu nutzen. Für die Erweiterung von „Ilias“ um den experimentellen Bereich wurden neue dynamische Webseiten angelegt, die bestehende Ilias-Seiten in die neue Oberfläche integrieren.

Das gesamte neue System mit Komponenten und Basismodulen ist als Open Source-Projekt angelegt. Es ist möglich, in dieses System zukünftig auch kommerzielle Module zu integrieren. Als Lizenz wird für das Projekt *GNU Lesser General Public License* (LGPL) verwendet.

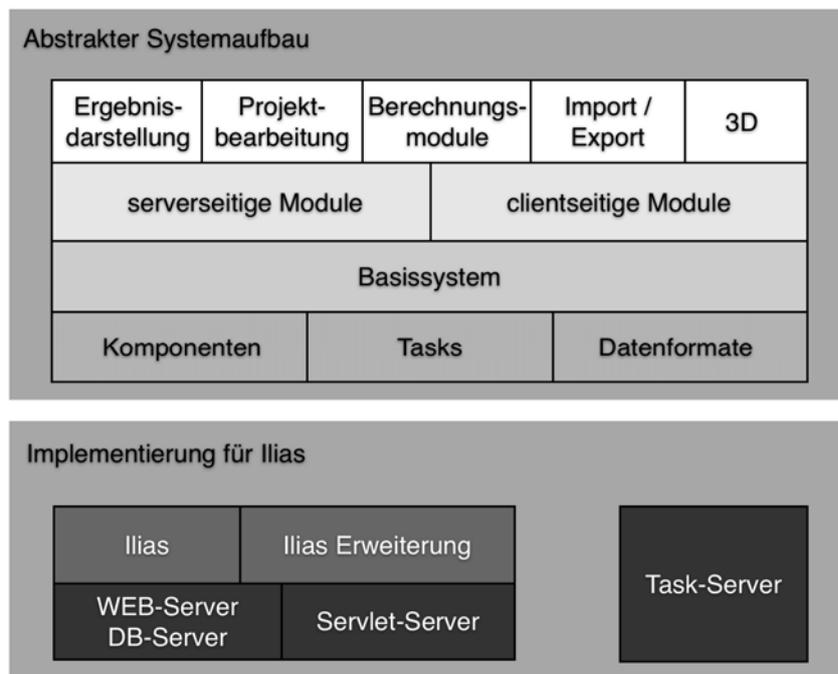


Abb. 3: Abstrakter Systemaufbau mit Implementierung für die Lernplattform Ilias.

3 Gebäudesimulation

Für das eigenständige Experimentieren ist es sinnvoll, dem Lernenden mehrere Wege zum Ziel zu ermöglichen: Berechnungsmodule sollten deshalb immer mehrere Einstiegspunkte – soweit sinnvoll und möglich – anbieten. Bei einer Lichtberechnung ist es zum Beispiel möglich, eine gesamte Siedlung zu modellieren und anschließend einzelne Räume lichttechnisch zu untersuchen. Ein anderer Weg wäre, ohne Modell mit Hilfe weniger Angaben in einem Raum beispielsweise Kunstlicht zu berechnen. Dieser Weg ist beispielsweise in einem frühen Entwurfsstadium wichtig, wenn noch wenig über ein Gebäude oder Projekt bekannt ist. Die Art der alternativen Wege hängt von der jeweiligen Fragestellung ab, daher müssen die Module so programmiert werden, dass sie verschiedene Einstiege ermöglichen. Es kann sinnvoll sein, an einem Bauteil zu beginnen, um daran beispielsweise Wärmedurchgangs- oder Feuchteuntersuchungen zu machen. Andererseits kann der Beginn an einem Gebäude oder einer Siedlung ohne genaue Kenntnis von der Geschosshöhe oder von den Grundrissen Sinn machen.

Egal welcher Weg beschritten wird, am Ende steht immer eine einheitliche Projektbeschreibung. Module zu einem anderen Thema können am selben Projektstand aufgerufen werden – so ist es möglich, den gleichen Raum, der zuvor lichttechnisch untersucht wurde, auch akustisch oder thermisch zu untersuchen. Ein vereinheitlichtes Gebäudedatenmodell, das dem System zu Grunde liegt, bildet dazu die Grundlage. Aus diesem Gebäudedatenmodell können alle Module Projektdefinitionen herauslesen und sie bei Bedarf ergänzen.

3.1 Gebäudedatenmodell

Zur Beschreibung von Projekten mit Gebäuden, Räumen, Bauteilen und dazugehörigen Eigenschaften wird das XML-Format [3] verwendet. Das Schema für die Beschreibung von Gebäudedaten wurde im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts „Multimediales Lernnetz Bauphysik“ [4] begonnen und nun erweitert.

Zu Beginn des Projektes EnOB:Lernnetz wurden nochmals bestehende Datenformate, wie IFC [5], IDF [6] oder gbXML [7] für die Verwendung im Lernnetz untersucht. Dabei erwiesen sich alle untersuchten Datenformate für den Einsatz im Lernnetz als ungeeignet: Entweder sind bei diesen Formaten die Datenmengen zu groß für den Einsatz in einer Webanwendung oder die Detaillierung ist in einzelnen Bereichen zu gering für die geplanten Anwendungen.

Das XML-basierte Datenformat des Lernnetzes ist hierarchisch und relational aufgebaut. Das bedeutet, dass z.B. innerhalb eines Gebäudes die Geschosse sowie die in den Geschossen enthaltenen Bauteile und Räume bekannt sind. Diese hierarchische Struktur reicht von der Lageebene (mehrere Gebäude und Umgebungsparameter) bis hin zur Elementebene (z.B. Fenster oder Möbel). Neben der hierarchischen Struktur sind auch die Beziehungen zwischen den Bauteilen beschrieben. So lässt sich zum Beispiel ermitteln, welche Räume an eine Wand angrenzen oder wie Bauteile aneinander stoßen – eine Voraussetzung, um unterschiedlichste bauphysikalische Berechnungen an einem identischen Datenbestand durchzuführen. Die resultierenden Datenmengen sind trotz der Verwendung eines XML-Formats gering.

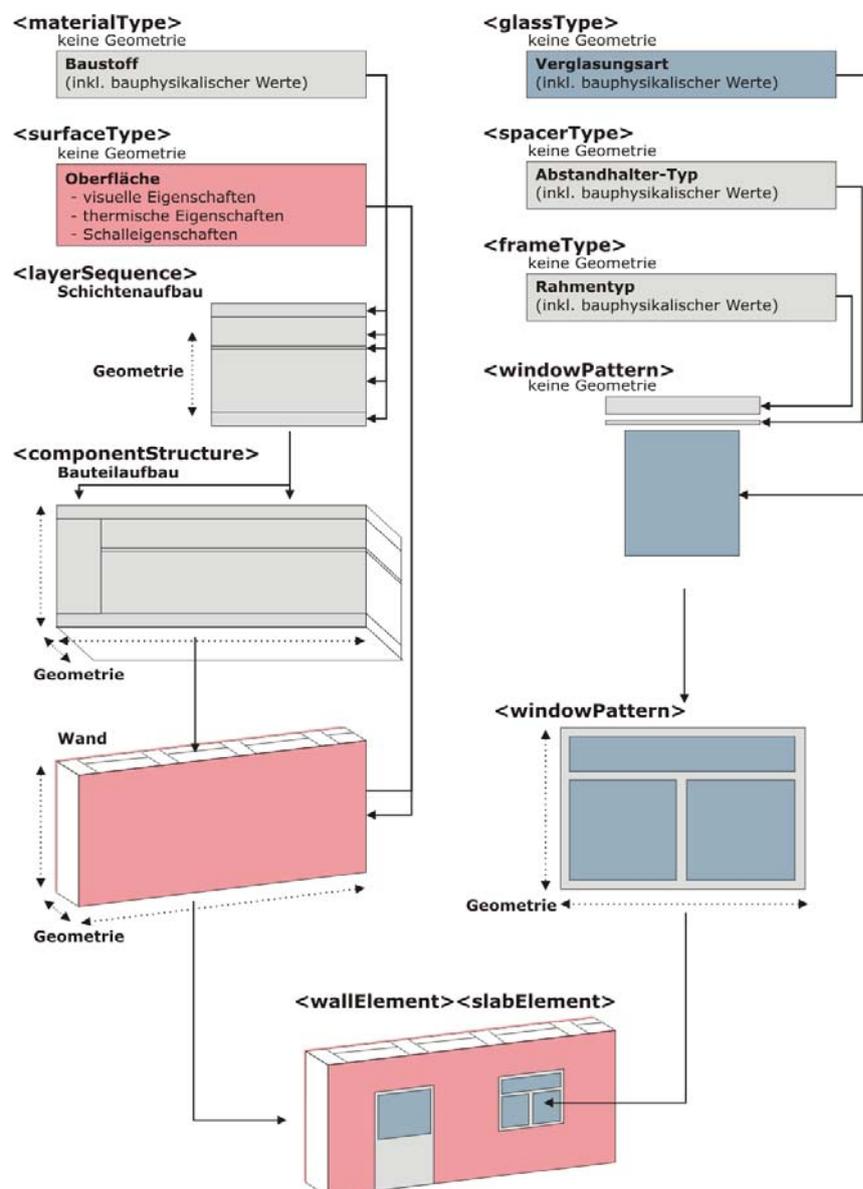


Abb. 4: Gebäudedatenmodell - Hierarchischer Aufbau am Beispiel einer Wand.

3.2 Gebäudemodellierung

Zur Modellierung von Gebäuden und Projekten ist ein Bearbeitungsmodul vorhanden, das die Daten im XML-Format lesen und schreiben kann. Dabei handelt es sich um eine einfache CAAD-Anwendung. Es können mehrgeschossige Gebäude mit freien Grundrissen, Räumen und Wänden erstellt und bearbeitet werden. Außerdem ist es möglich, Objekte (z.B. Fenster, Möbel oder Leuchten) in Räumen oder an Wänden zu platzieren.

Weitere Detaillierungen können mit Hilfe von Eigenschaften an den einzelnen Elementen vorgenommen werden. Dies betrifft zum Beispiel Schichtaufbauten oder Oberflächeneigenschaften von Wänden, Decken oder Dächern. Auch die Teilung, Größe und Form von Fenstern wird beispielsweise mit Hilfe von Eigenschaften bestimmt. Zur Bearbeitung von Objekteigenschaften werden spezielle Bearbeitungskomponenten wie z.B. ein Editor für Schichtaufbauten verwendet.

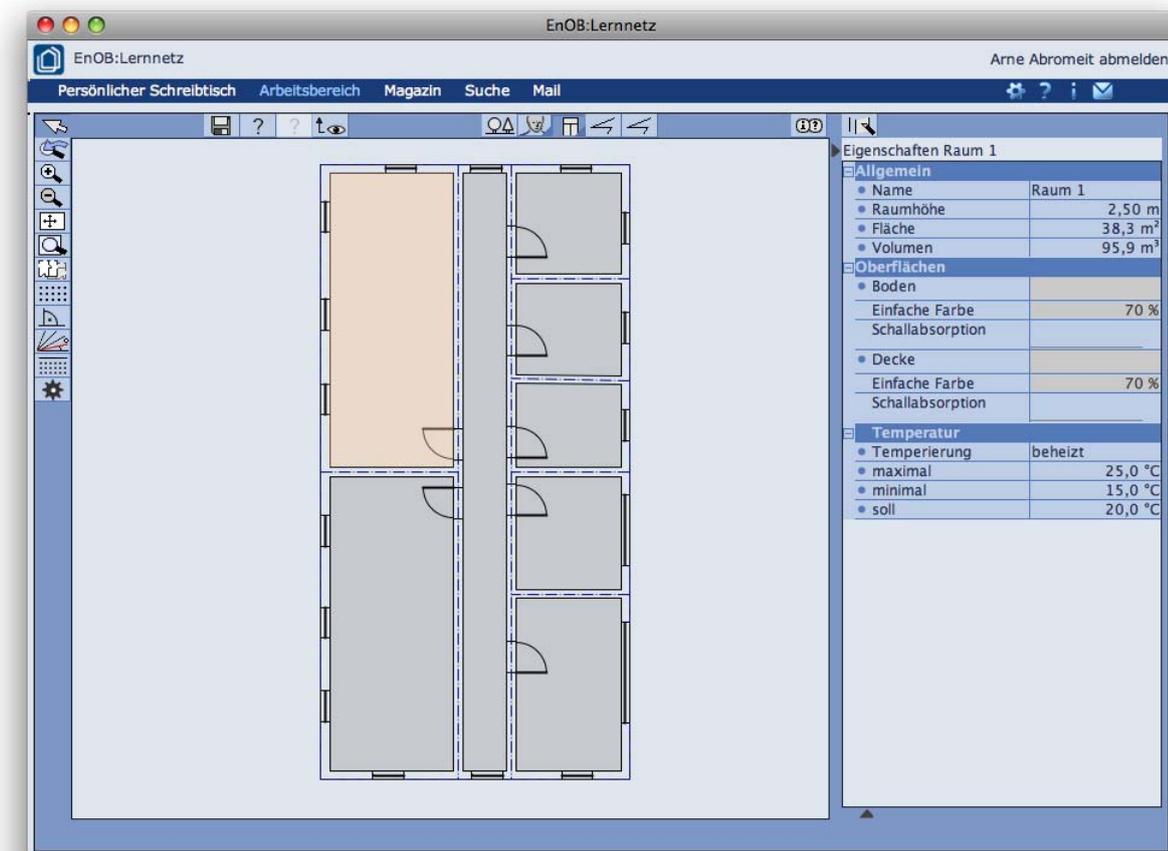


Abb. 5: Einfaches CAAD-Modul zur Gebäudemodellierung (Grundrissbearbeitung) – Wände, Räume, Fenster etc. können frei gezeichnet werden.

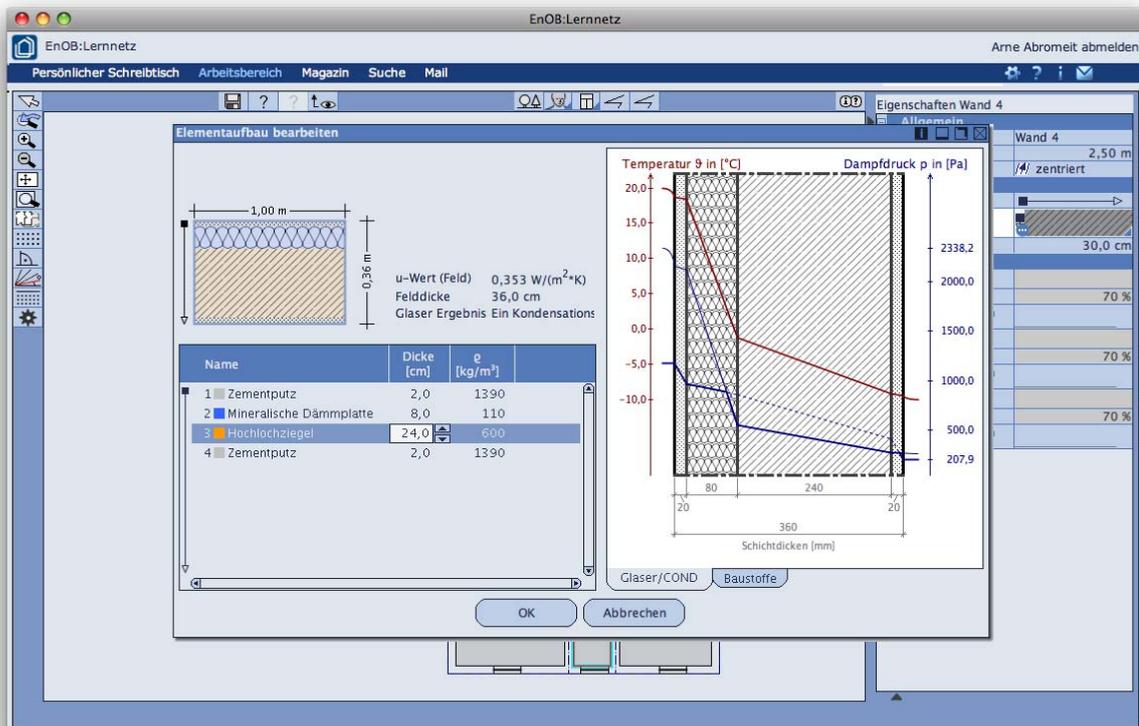


Abb. 6: Grafische Komponente zur Bearbeitung von Schichtaufbauten für Wände, Decken und Dachflächen mit integrierter Glaser-Darstellung.

3.3 Berechnungsmodule

Energetische und bauphysikalische Berechnungen können eine sehr unterschiedliche Komplexität besitzen, Berechnungsmodule können einfache Dialoge mit geringem Rechenaufwand sein. Daneben ist es möglicherweise notwendig, aufwendige Simulationssoftware zu steuern. Um dies zu ermöglichen, werden vom System verschiedene Technologien angeboten, die von Berechnungsmodulen nutzbar sind. Serverseitige Dienste ermöglichen das Verlagern von Programmteilen vom Client auf den Server, was eine sinnvolle Variante darstellt, wenn andernfalls große Datenmengen zum Client übertragen werden müssten. Native Dienste (Tasks) ermöglichen die Einbindung bestehender nativer Berechnungsprogramme in ein Berechnungsmodul. Native Berechnungsprogramme werden in einem gesonderten Rechner-Pool ausgeführt.

3.4 Ergebnisse und Darstellung

Neben der Beschreibung der Gebäudedaten ist das Format und die Organisation von Ergebnisdaten ein wichtiger Aspekt. Ergebnisse werden daher im Lernnetz vom System hierarchisch abgelegt. Das System sichert dabei auch den Projektstand, der für die Berechnung eines Ergebnisses zu Grunde liegt. Dadurch kann jederzeit nachvollzogen werden, mit welchen Gebäude- und Umgebungsparametern ein Ergebnis berechnet wurde – Nachvollziehbarkeit ist hinsichtlich des Lernens und Verstehens wichtig.

Das Format von Ergebnissen ist für alle Module einheitlich, so dass ein Vergleich von Ergebnissen – und damit auch Variantenbildungen und das Beobachten von Zusammenhängen – ermöglicht werden. Im vereinheitlichten Ergebnisdatenformat werden neben den eigentlichen Zahlenwerten (oder einem Verweis darauf) die physikalischen Größen sowie die Berechnungsparameter des Moduls gespeichert.

Ein weiterer Vorteil der Vereinheitlichung der Ergebnisdaten ist, dass Berechnungsmodule keine spezielle Anzeige für Ergebnisse benötigen, sondern auf bestehende Darstellungsmodule zurückgreifen können. Neben Darstellungsmodulen für verschiedene Diagrammarten gibt es auch ein Darstellungsmodul für bildbasierte Ergebnisse. Solche bildbasierten Ergebnisse gibt es z.B. im Bereich der Thermografie oder der Lichtberechnung.

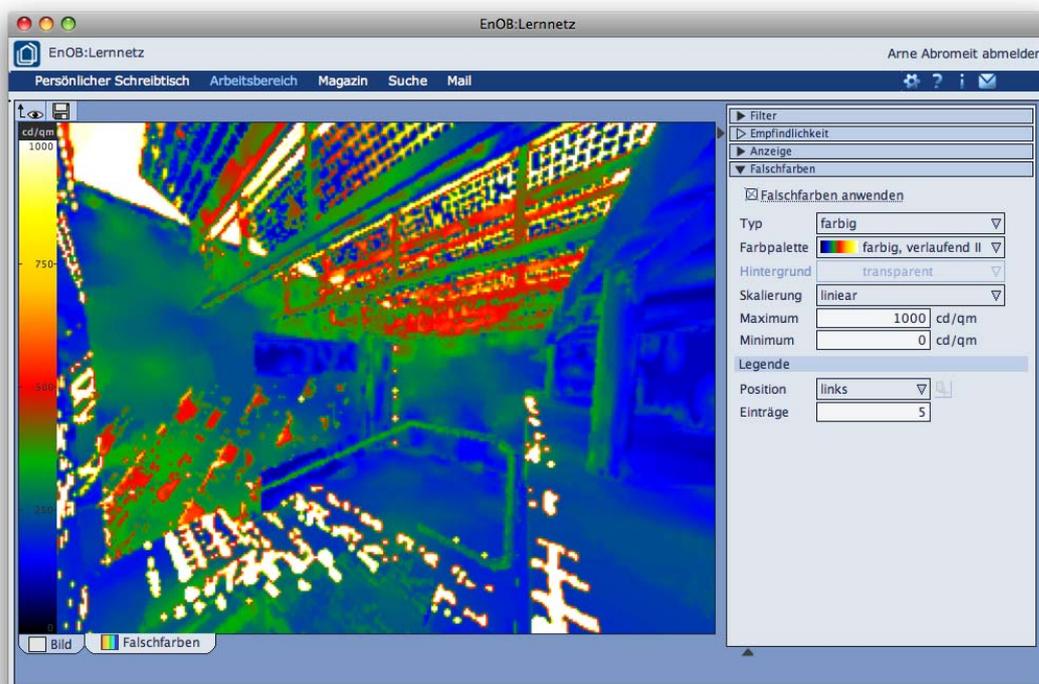


Abb. 7: Beispiel für Ergebnisdarstellung - Modul zur Auswertung eines Leuchtdichtebildes.

4 Stand und Ausblick

Im Moment befindet sich die Plattform mit einzelnen Berechnungs- und Darstellungsmodulen im Alpha-Stadium. Das bedeutet, dass im System noch eine große Entwicklungsdynamik vorherrscht und sich einzelne Bereiche programmtechnisch noch stark ändern können.

Die gesamte Oberfläche soll bis Januar 2010 das Beta-Stadium erreichen, in dem sich der Funktionsumfang nur noch geringfügig ändern wird. Das Hauptaugenmerk liegt hier auf der Beseitigung von Fehlern.

Im Herbst 2010 soll die Plattform einem ersten großen Praxistest im Rahmen einer Sommerakademie unterzogen werden. Positive und negative Anregungen können danach bis zum Projektende berücksichtigt werden und in die Plattform einfließen.

Der Betrieb der Plattform sowie die Koordination der Weiterentwicklung soll langfristig vom gemeinnützigen Verein Lernnetz-Bauphysik [8] übernommen werden.

Quellen

- [1] Radiance – Simulationssoftware. <http://radsite.lbl.gov>
- [2] Ilias - Learning Management. <http://www.ilias.de>
- [3] XML - Extensible Markup Language. <http://www.w3.org/XML>
- [4] BMBF-Förderung Neue Medien in der Bildung. <http://www.medien-bildung.net>
- [5] IFC - Industry Foundation Classes. <http://www.buildingsmart.de>
- [6] IDF - Dateiformat von EnergyPlus. <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus>
- [7] gbXML - Green Building XML. <http://www.gbxml.org>
- [8] Lernnetz-Bauphysik e.V. <http://www.lernnetz-bauphysik.de>

Entwurf eines Frameworks zur Visualisierung unscharfer Daten

Matthias Bode, Wassim Abu Abed

Universität Hannover, Institut für Bauinformatik, 30167 Hannover, Deutschland,

E-mail: bode@bauinf.uni-hannover.de, Telefon: +49(0)511/762 4289721

Kurzfassung

Der Anstieg des Umfangs und der Komplexität der Daten, die zur wissenschaftlichen Analyse herangezogen werden, führt dazu, dass auch die Visualisierung der aus diesen Daten abgeleiteten Ergebnisse aufwendiger wird. Sowohl bei der Datenerhebung, der Transformation, der Nutzung numerische Methoden zur Simulation und der Visualisierung entstehen Unschärfen in den Datensätzen. Es werden verschiedene bestehende Möglichkeiten der Visualisierung unscharfer Daten vorgestellt und deren Implementierung in einem Framework diskutiert.

Stichworte

Visualisierung, Fuzzy-Zahlen, Unschärfe Daten, Volumengrafiken

1 Einleitung

Heutzutage ist es möglich, mit geringem Aufwand sehr große Mengen von Daten zu erfassen, zu speichern und zu verarbeiten. Diese Daten kommen, je nach Aufgabenstellung, aus verschiedenen Quellen. Beispielsweise sind dies Geländevermessungen, die Messung von Konzentrationen eines Stoffes in Gewässern oder auch die gesammelten Daten einer Befragung. Sowohl bei der Datenerhebung, als auch bei daraus abgeleiteter Daten bzw. auf diesen basierenden Simulationen entstehen Unsicherheiten. In der Vergangenheit wurden diese Unsicherheiten in den Daten zwar teilweise durch statistische Methoden in der Nachbearbeitung berücksichtigt, beispielsweise durch die Angabe von Konfidenzintervallen, Minimum-/ Maximum-Bereichen oder von Standardabweichungen, aber bei der Visualisierung der abgeleiteten Daten und Ergebnisse größtenteils vernachlässigt. Für eine Person, die anhand von unscharfen Daten Entscheidungen trifft, muss die Visualisierung als Mittel dienen schnell alle nötigen Informationen erfassen zu können.

2 Quellen von Unsicherheiten

Unschärfen und Unsicherheiten können in jeder Stufe der Datenverarbeitung auftreten. Diese lässt sich in beliebig viele Schritte unterteilen, hier seien nur die drei wichtigsten Stufen Datenerhebung, Transformation und Visualisierung genannt.

Bei der **Datenerhebung** lässt sich bei jeder Datenmenge, sei es aus Messungen oder aus einer Numerischen Simulation, eine statische Variation feststellen. Bei jeder Messung treten experimentelle Abweichungen zwischen einzelnen Messvorgängen derselben Messgröße auf, egal, ob diese von einem Menschen oder einer Maschine vollzogen werden. Eine weitere Einflussgröße ist außerdem oft, dass es nur wenige Daten bei einer Messung gibt, und somit viele Werte interpoliert werden müssen, was sich später auf Unschärfen in der Transformationsstufe auswirkt.

Bei der Verwendung von Numerischen Methoden, beispielsweise der Finiten-Element-Methode wiederum entstehen Unschärfen beispielsweise durch Modellvereinfachungen wie etwa der Linearisierung eines nichtlinearen Systems, durch die numerische Integration oder allein durch die Rechenungenauigkeit des Computers. Abhängig von den gewählten Methoden variiert die Ergebnisdatenmenge.

Als nächste Stufe schließt sich meistens die **Transformation** der Daten an. So kann es sein, dass die Daten in andere Einheiten umgerechnet werden, beispielsweise aus dem angloamerikanischen Maßsystem in das metrische. Auch bei der Skalierung der Daten, der Quantisierung, also dem Übertragen der Daten in ein System, das nur diskrete Werte aufnehmen kann oder beim Interpolieren zwischen den Daten aus der Erhebung oder der Berechnung treten Unschärfen und je nach gewähltem Verfahren Unterschiede auf.

Die **Visualisierung** an sich birgt ebenso Unsicherheiten. Beim Rendern des Bildes, also der Berechnung des eigentlich sichtbaren Bildes aus der 3D-Szene und dem dazugehörigen Shading und Mapping treten je nach verwendeter Rendertechnik ebenso Variationen auf. Verwendet man zu dem noch Animationstechniken so entstehen zusätzliche Unschärfen beim Interpolieren der Bilder zwischen den Key-Frames.

Neben den hier aufgezählten Einflussgrößen gibt es noch viele weitere und bei jeder einzelnen Unsicherheit muss abgewogen werden, in welchem Rahmen sie berücksichtigt wird.

3 Grundlagen der Fuzzy-Zahlen

Die Fuzzy-Zahlen und die zugehörige Fuzzy-Arithmetik bilden die Grundlage unscharfe Vermessungsdaten zu interpolieren und numerische Simulationen mit unscharfen Parameter bzw. Randbedingungen durchzuführen. Die Ergebnisse solcher Berechnungen enthalten sowohl die Unschärfe der Inputdaten als auch die der Verfahren.

In diesem Abschnitt soll nur kurz dargestellt werden, wie Fuzzy-Mengen und die darauf basierenden Fuzzy-Zahlen definiert sind. Ausführlichere Behandlungen der Fuzzy-Theorie sind beispielsweise bei [9] oder [8] zu finden.

3.1 Fuzzy Mengen

In der zweiwertigen Booleschen Logik, gehört ein Element entweder zur Menge A oder nicht. Dies lässt sich mit der Indikatorfunktion festlegen:

$$\chi_A = \begin{cases} 1 & x \in A \\ 0 & x \notin A \end{cases} \quad [1]$$

Die Fuzzy Logik verallgemeinert die Booleschen Logik indem diese Indikatorfunktion durch eine sogenannte Zugehörigkeitsfunktion μ , die Objekte auf Fuzzy-Mengen abbildet, ersetzt wird, sowie passenden logischen Operationen auf diesen Mengen definiert werden. $\mu_F(x) \in [0; 1]$ gibt an zu welchem Grad das Element $x \in \mathbb{G}$ der Grundmenge in der Fuzzy-Menge \mathbb{F} enthalten ist.

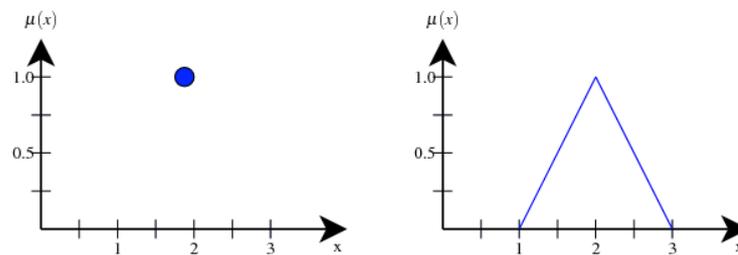


Abb. 1: Zugehörigkeit zur einer Menge: Unterschiedliche Definition der Zugehörigkeit zu einer Menge, links: klassische Menge, rechts: Fuzzy Menge.

Die Zugehörigkeitsfunktion μ kann sowohl parametrisiert als auch diskretisiert dargestellt werden. Eine mögliche Zugehörigkeitsfunktion, die angibt, zu welchem Grad ein Auto als „schnell“ bezeichnet wird, wird in Gleichung 2 angegeben.

$$\chi_A = \begin{cases} 0 & \text{für } x < 80 \\ \frac{x-80}{140-80} & \text{für } 80 < x < 140 \\ 1 & \text{für } x > 140 \end{cases} \quad [2]$$

Der Support oder Träger einer Fuzzy-Menge wird durch

$$supp(\tilde{x}) := \{x \in \mathbb{R} | \mu(x) > 0\} \quad [3]$$

beschrieben.

Als α -Niveau-Menge oder α -Cut $S_\alpha(A)$ bezeichnet man den Bereich des Supports, dessen Zugehörigkeit μ_A größer oder gleich α ist. Die α -Niveau-Menge ist eine scharfe Menge.

$$S_\alpha(A) := \{x \in G | \mu_A \geq \alpha\} \quad [4]$$

3.2 Fuzzy-Zahlen

Auf Basis der Theorie der Fuzzy-Mengen lassen sich Fuzzy-Zahlen definieren. So lassen sich beispielsweise auch umgangssprachliche unscharfe Größen wie „ungefähr 2“ ausdrücken. Bei Fuzzymengen sind

nur logische Operatoren wie „und“ und „oder“ möglich, wobei hingegen bei Fuzzy-Zahlen auch arithmetische Operatoren wie Addition, Subtraktion, Multiplikation und Division möglich sind. Für eine kurze Übersicht der Fuzzy-Arithmetik siehe Abu Abed[2].

Eine Fuzzy-Zahl \tilde{x} ist eine konvexe und normierte Fuzzy-Menge über den reellen Zahlen. Das heißt, dass alle α -Cuts konvex sind, und der maximale Zugehörigkeitswert genau einer reellen Zahl x bei $\mu = 1$ liegt. Dieser Wert wird als Nennwert bezeichnet (z.B. ungefähr 2.5). Jeder reelle Zahl x kann als Spezialfall einer Fuzzy-Zahl gesehen werden mit $\mu(x) = 1$ und $\mu(y \neq x) = 0$.

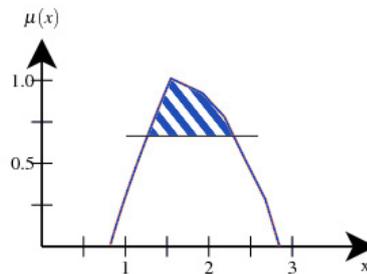


Abb. 2: Darstellung einer Fuzzy-Zahl: für den umgangssprachlichen Ausdruck „ungefähr 1.5“. Die Zugehörigkeitsfunktion hat den höchsten Wert bei $x = 1.5$. Des Weiteren ist noch ein α -Cut bei 0.6 eingezeichnet.

4 Visualisierung von Fuzzy-Funktionen

Die Darstellung der Unsicherheiten soll dem Anwender die Möglichkeit geben, selber seine Schlüsse aus diesen unscharfen Daten zu ziehen und ist abhängig vom Typ der Daten. Die Darstellung soll vor allem auch die Möglichkeit bieten, zwei unscharfe Datensätze untereinander zu vergleichen.

Innerhalb einer Hausarbeit, die zur Aufgabe hatte, biologische Wechselwirkungen zwischen Phyto-, Zooplankton und Nährstoffen in Interaktion mit zugrunde liegender Strömung mittels unscharfen Inputdaten auf Basis der Fuzzy-Arithmetik zu simulieren, wurde eine einfache eindimensionale Visualisierung der unscharfen Ergebnisdaten implementiert. Es wurden unscharfe Daten der Konzentration der einzelnen Biologischen Stoffe auf einer scharfen Zeitreihe aufgetragen und der Support der Fuzzy-Zahl zum Zeitpunkt t seinem Zugehörigkeitswert μ entsprechend intensiv eingefärbt um so einen Unschärfe Effekt zu erzielen, siehe Abb. 3.

5 Weitere Möglichkeiten der Visualisierung von Unschärfen

Neben der Darstellung einer einzelnen Fuzzy-Zahl wie in Abb. 2 und einem zeitlichen Verlauf einer Fuzzy-Zahl wie in Abb. 3 besteht bei anderen Problemstellungen auch die Notwendigkeit zwei- und dreidimensionale Fuzzy-Zahlen visualisieren zu können. Hierzu werden einige Methoden aus der Literatur diskutiert.

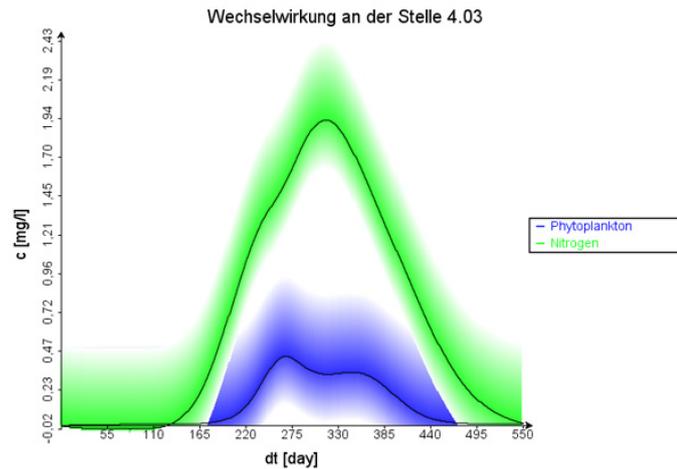


Abb. 3: Fuzzy-Zeitreihe: Biologische Wechselwirkung bei zwischen Pyhtoplankton und Stickstoff unscharf visualisiert.

5.1 Qualitätsfilter / indirekte Methoden

Ein Weg um Unsicherheiten zu visualisieren ist, dies indirekt über Filtermechanismen zu tun. Nach [7] werden den Daten über „data quality filter“ ein Konfidenzwert zugeordnet, der entscheidet, welche Daten glaubwürdig genug sind, um dargestellt zu werden. Hier bietet sich bei Fuzzy-Zahlen die Möglichkeit an, nur einen α -Cut der Zahl darzustellen.

5.2 Glyphs (Symbole)

Glyphs sind Symbole, die zusätzlich der Geometrie hinzugefügt werden und die durch ihre Form, ihre Größe, ihrer Farbe oder ihrer Häufigkeit des Vorkommens Informationen kodieren, beispielsweise Pfeile, Ellipsoide oder Liniensegmente. Auch das Einfügen von Icons wie etwa einer Error Bar [3] oder Icons die durch ihre Deutlichkeit und Klarheit Aussagen über die Unschärfe der Daten erlauben, ist gebräuchlich.

Am Beispiel des Monterey Bay in Californien lässt sich zeigen, wie Pfeile dazu benutzt werden, um Unsicherheiten der Geschwindigkeit und Richtung von Winde zu visualisieren. Neben Daten von einer Ozean Radar-Anlage, sowie einer Doppler-Windradaranlage wurden auch Messdaten verschiedener Wetterstationen gesammelt und interpoliert. Die Unsicherheiten, die durch die Abweichungen der einzelnen Datensätze zueinander entstehen wurden mittels Pfeilen, die durch Ihre Richtung und Größe die Richtungs- und Geschwindigkeitsunschärfe angeben in Abb. 4 visualisiert.

Wie aussagekräftig die Verwendung von Pfeilen bei dieser Problemstellung ist, ist durchaus fragwürdig. Die Richtung der Pfeile, die auch die Unschärfe der Richtungsmessungen darstellen soll, kann beispielsweise für jeden Messpunkt auch genau entgegengesetzt angenommen werden, was zu einer anderen Visualisierung führt. Für den Anwender ist es dadurch teilweise schwieriger zwei unscharfe Datensätze untereinander zu vergleichen, die mittels Pfeilen versuchen Unschärfen darzustellen. Außerdem stellt

sich die Frage, was das Auftreten eines Strudels oder Wirbels bei dieser Visualisierung für Aussagen über den betrachteten Datensatz zulässt.

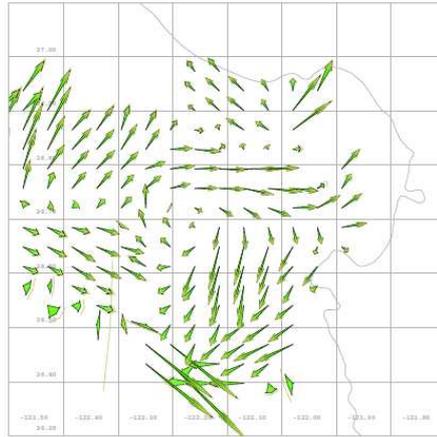


Abb. 4: Unschärfe-Darstellung mittels Arrow Glyphs: Unschärfe-Vektoren der Luftströmungen über Monterey Bay [6].

Als sinnvoller stellt sich da schon die Verwendung von Error-Bars, Liniensegmenten oder Ellipsoiden dar, die durch ihre Größe Unsicherheiten darstellen sollen. Diese können beispielsweise auch gut bei der Visualisierung von Unsicherheiten bei Geländemessdaten verwendet werden.

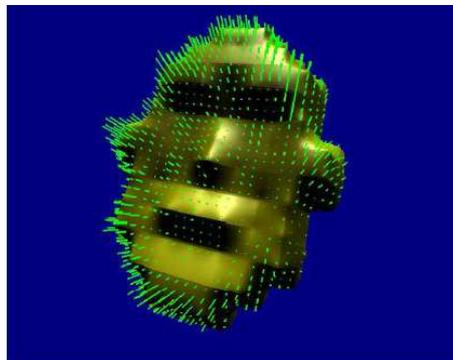


Abb. 5: Unschärfe-Darstellung mittels Line Glyphs: Visualisierung der Unschärfe, die durch verschiedene Flächeninterpolationen, z.B. bilinear und multi-quadratischer Interpolation entstehen [6].

5.3 Envelopes/Ribbons (Hüllen mit Farbverlauf)

Envelopes oder *Ribbons* werden ebenfalls einer Szene hinzugefügt und dazu benutzt um das Intervall möglicher Werte der betrachtenden Größe anzugeben, also die maximalen und minimalen Werte. Diese können dann dem Grad der Unschärfe entsprechend einer Farbskala eingefärbt werden. Diese Verfahren wird oft bei der Visualisierung von Unschärfen im Bereich der Fluidodynamik verwendet, beispielsweise bei der Berechnung einer Bahnkurve eines Wasserpartikels.

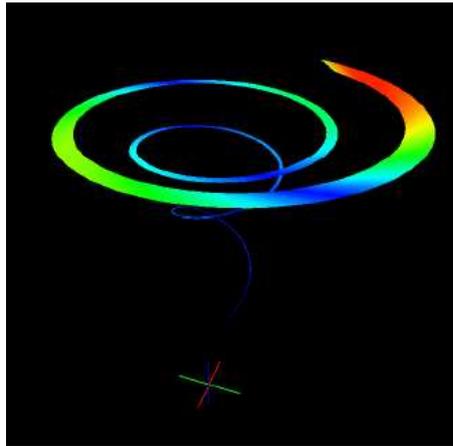


Abb. 6: Unschärfe-Darstellung durch Ribbons: Unsicherheiten, die durch verschiedene Integrationsmethoden bei der Berechnung einer Bahnkurve eines Partikels in einer Strömung entstanden werden hier durch Ribbons visualisieren [6].

5.4 Overlaid Grid (Gitter)

Ein gutes Verfahren zur Visualisierung unscharfe Geländedaten sind die *Overlaid Grids*. Dies sind Gitter die über die Daten gelegt werden und über die Feinheit des Gittersnetzes, Dicke oder Schärfe der Gitternetzlinien, sowie Rauschen innerhalb der Linien, Unschärfen darstellen.

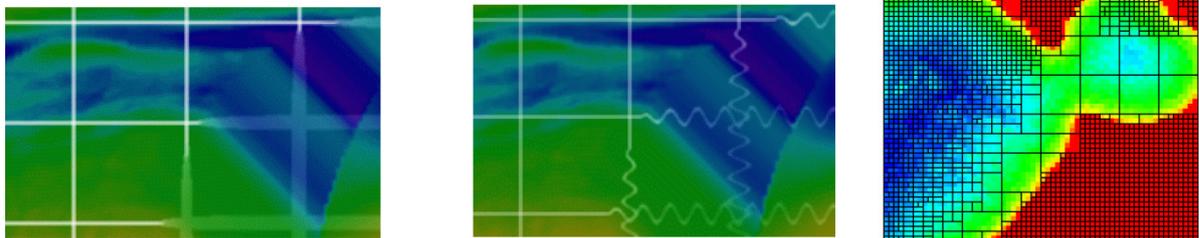


Abb. 7: Unschärfe-Darstellung über Grids: Über die Daten wurde ein Gitter gelegt, um über verschiedene Attribute des Gitternetzes und des Gitters an sich Unschärfen zu visualisieren; (von links) Variation der Dicke der Gitternetzlinien, Ausbeulen der Gitternetzlinien und Änderung der Feinheit des Netzes [1].

5.5 Verwendung freier graphischer Attribute

Für die Darstellung von Unschärfen können nicht verwendete graphische Attribute modifiziert werden. So lässt sich beispielsweise durch ändern von Farbe, Größe, Klarheit/ Verschwommenheit der Darstellung oder Position die Unschärfe an einer Stelle angeben.

Interessant ist auch der Weg über Fraktale. Sehr stark glättende Interpolationmethoden vermitteln manchmal den Eindruck, dass auch die verwendeten Daten an sich einen sehr glatten Verlauf aufweisen. Die interpolierte Fläche kann nun mittels eines Fraktals, das auf Basis eines iterierten Funktionensystems

(IFS) konstruiert wurde, dazu genutzt werden, die Unsicherheit der Interpolationsmethoden zu visualisieren, beispielsweise über die Rauheit der Fläche.

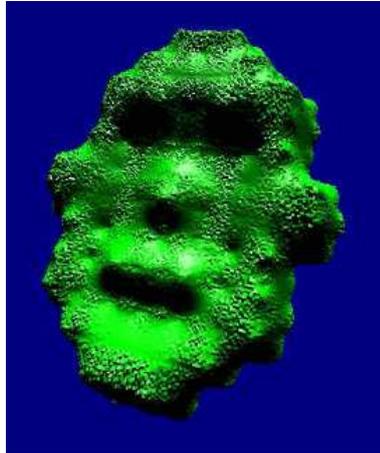


Abb. 8: Unschärfe-Darstellung mittels IFS Fraktale: Visualisierung der Unschärfe, die bei der Interpolation einer Gesichtsoberfläche unter der Verwendung von verschiedenen Interpolationsmethoden entsteht [5].

5.6 Unschärfe durch Transparenz und Ausfranzen

Bei *Volume Rendering* handelt es sich um eine Renderingmethode, bei der Objekte durch ein Voxelgitter modelliert wird. Diese Methode ist vor allem in den *Bildgebenden Verfahren* der Medizin, wie beispielsweise der Computertomographie weit verbreitet. Im Gegensatz zu den flächenbasierten Rendering Algorithmen beruht eine Volumengrafik nicht auf kontinuierlichen Primitiven wie Linien, sondern auf diskreten Räumen, die aus den sogenannten Voxels bestehen. Der Begriff setzt sich aus den beiden Bestandteilen „Volumetric“ und „Pixel“ zusammen, wobei das Wort Pixel ebenfalls ein Kunstwort ist, welches den kleinsten Bestandteil eines digitalen Bildes ein „picture element“ bezeichnet. Ein Voxel wird durch seine Koordinaten im drei-dimensionalen Raum und durch eine objektspezifische Eigenschaft beschrieben. Diese Eigenschaft kann sowohl durch skalare als auch durch vektorielle Größen, die später in einen skalaren Wert umgerechnet werden, beschrieben werden. Dieser Wert gibt dann die Lichtdurchlässigkeit an diesem Punkt an.

Mit Hilfe von Volumengrafiken lassen sich Unsicherheiten recht einfach durch transparente Flächen oder Nebelgebiete angeben, die die Unschärfe darstellen sollen. Die Transferfunktion, die jedem Voxel einen bestimmten Transparent- oder auch Opazitätswert zuordnet, muss dementsprechend die an dem Messpunkt vorliegenden Fuzziness und die Unsicherheit aus der Interpolation zwischen den Voxeln berücksichtigen. Einige Ausführungen hierzu sind unter Johnson [4] zu finden.

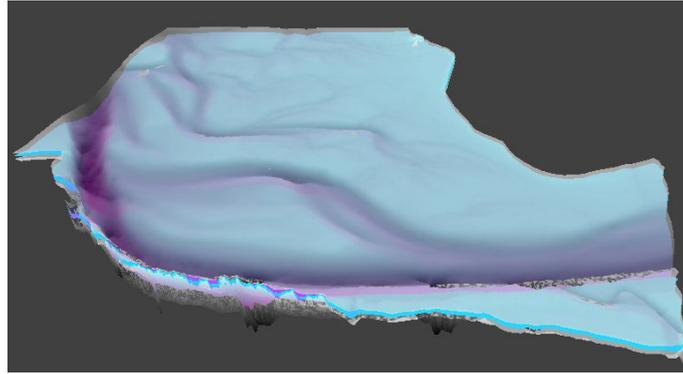


Abb. 9: Unschärfe-Darstellung der Höheninformation: Unschärfe von ± 15 cm mit 100-facher Überhöhung bei einer Gewässerrinnenvermessung. Der Min-/ Max-Bereich sowie der Nennwert wurden hier visualisiert. Später soll der Nennwert mit einer volumengerenderten Region umgeben sein, die die Unsicherheit der Daten darstellt.

6 Ausblick

Auf der Basis von in Java implementierten Klassen für Fuzzy-Zahlen, deren Arithmetik und Funktionen werden die Ansätze aus der Hausarbeit und die hier vorgestellten Möglichkeiten im Rahmen einer Masterarbeit zu einem Framework weiterentwickelt, in dem generalisiert unscharfe Daten adäquat der Problemstellung entsprechend visualisiert werden können. Des Weiteren sollen neue Methoden entwickelt werden, die dem Anwender noch intuitiver unscharfe Größen darstellen und die Vergleichbarkeit zwischen unscharfen Größen vereinfachen.

Literaturverzeichnis

- [1] P. R. A. Cedilnik. *Procedural Annotation of Uncertain Information. Proc. Vis '00, IEEE Visualization, Salt Lake City, UT. 2000. pp. 77–84.*
- [2] W. A. Abed. *Fuzzy-Arithmetik zur Behandlung der Unschärfe in der Umwelthinformatik. Forum Bauinformatik 2008. Junge Wissenschaftler forschen. Tagungsband, Institut für Bauinformatik, Fakultät Bauingenieurwesen, Universität Dresden. 2008.*
- [3] J. M. C. Olsten. *Visualization Data with bounded Uncertainty. Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization. 2002. pp 37–40.*
- [4] A. S. C. R. Johnson. *A next Step. Visualizing Errors and Uncertainty. Visualization Viewpoints by IEEE Computer Society. 2003.*
- [5] S. L. C. Wittenbrink, A. Pang. *Verity Visualization. Visual Mappings. Technical Report: UCSCCRL-95-48. 1995.*
- [6] S. L. C. Wittenbrink, A. Pang. *Approaches to Uncertainty Visualization. In: The Visual Computer 13. 1997.*
- [7] M. B. J. Paradis. *Visualization of Data Quality for the Decision Maker. A Data Quality Filter. In: Journal of the Urban and Regional Information System Association 6(2). 1994. pp. 25–34.*
- [8] E. Turunen. *Mathematics behind Fuzzy Logic (Advances in Soft Computing). 1999.*
- [9] L. Zadeh. *Fuzzy Sets. In: Information and Control 8. 1965. pp. 338–353.*

Visualisierung von IFC-Objekten mittels Java3D

Michael Theiler, Eike Tauscher

Bauhaus-Universität Weimar, Professur Informatik im Bauwesen, 99423 Weimar, Deutschland, E-Mail: michael.theiler@uni-weimar.de, Telefon +49(0)3643/584220

Jan Tulke

HOCHTIEF Construction AG, 45128 Essen, E-Mail: jan.tulke@hochtief.de, Telefon +49(0)3643/584222

Thomas Riedel

Bauhaus-Universität Weimar, Informations- und Wissensverarbeitung, 99423 Weimar, Deutschland, E-Mail: thomas.riedel@uni-weimar.de, Telefon +49(0)3643/584262

Kurzfassung

Die Planung komplexer Bauwerke erfolgt zunehmend mit rechnergestützten Planungswerkzeugen, die den Export von Bauwerksinformationen im *STEP-Format* auf Grundlage der *Industry Foundation Classes (IFC)* ermöglichen. Durch die Verfügbarkeit dieser Schnittstelle ist es möglich, Bauwerksinformationen für eine weiterführende applikationsübergreifende Verarbeitung bereitzustellen. Ein großer Teil der bereitgestellten Informationen bezieht sich auf die geometrische Beschreibung der einzelnen Bauteile. Um den am Bauprozess Beteiligten eine optimale Auswertung und Analyse der Bauwerksinformationen zu ermöglichen, ist deren Visualisierung unumgänglich. Das IFC-Modell stellt diese Daten mit Hilfe verschiedener Geometriemodelle bereit. Der vorliegende Beitrag beschreibt die Visualisierung von IFC-Objekten mittels „Java3D“. Er beschränkt sich dabei auf die Darstellung von Objekten, deren Geometrie mittels *Boundary Representation (Brep)* oder *Surface-Model-Repräsentation* beschrieben wird.

Stichworte

IFC, Java3D, Brep, Surface-Model, STEP, 3-D-Modell, Schnittstelle, Visualisierung

1 Einleitung

Mit den Industry Foundation Classes (IFC) existiert eine international genormte Schnittstelle für den Austausch von Bauwerksinformationen. Nahezu jede etablierte CAD-Planungssoftware ermöglicht den Export von IFC-Daten mittels STEP („Standard for the exchange of product model data“). Durch diese Schnittstelle ist es möglich, Bauwerksinformationen für deren weiterführende Verarbeitung zu verwenden. Eine Visualisierung von geometrischen Gebäude- oder Bauteilinformationen ist beispielsweise für eine nachvollziehbare Verknüpfung mit Bauprozessen im Sinne einer 4-D-Simulation zwingend notwendig. Die IFC bieten diverse Möglichkeiten, um Geometriedaten sowohl für 2-D-, als auch für 3-D-Repräsentationen abzubilden. Das IFC-Modell beinhaltet ein multiples Darstellungskonzept, d.h. ein Objekt, z.B. eine Wand, kann mehrere Darstellungsarten besitzen. Die wichtigsten 3-D-Darstellungen sind die Boundary Representation (Brep) und die Repräsentation als Extrusions- und Rotationskörper (*SweptSolid*). Hinzu kommen, vor allem bei den Extrusionskörpern, weitere Anforderungen hinsichtlich CSG-Modellierung („Constructive Solid Geometry“), um beispielsweise Öffnungen für Türen und Fenster von einer Wand abzuziehen (*herauszuschneiden*) oder um Wände an einer bestimmten Ebene zu kappen (*Clipping*). Am Lehrstuhl Informatik im Bauwesen der Bauhaus-Universität Weimar wird innerhalb verschiedener Projekte an einem *IFC-Viewer* auf Basis der Programmiersprache Java gearbeitet. Dieser Beitrag beschreibt auszugsweise die Visualisierung von IFC-Objekten mittels Java3D am Beispiel von Brep- und Surface-Model-Repräsentationen. Die notwendigen Algorithmen und Methoden werden im Detail vorgestellt.

2 Geometrische Repräsentationen der IFC

In den IFC werden alle Objekte in eine vorgegebene räumliche Struktur eingebettet. Diese Struktur orientiert sich an der räumlichen Abbildung eines Gebäudes (*IfcSpatialStructureElement*). Jeder Ebene können Objekte mit einer geometrischen Repräsentation zugeordnet werden. Diese Objekte werden in den IFC durch Instanzen vom Typ *IfcProduct* repräsentiert. Ein *IfcProduct* ist dabei eine Superklasse für viele andere Klassen (z.B. *IfcWall*) und definiert neben einem eindeutigen Identifikator (*GlobalId*) für das Objekt zwei weitere wichtige Attribute in Bezug auf die geometrische Repräsentation. Dies ist zum einen die Positionierung im Raum (*ObjectPlacement*), zum anderen der geometrische Aufbau des Objekts (*Representation*). Das Attribut *ObjectPlacement* beschreibt die Lage und die Ausrichtung des lokalen

Koordinatensystems für die Geometrie eines Objekts. Die Positionierung kann in den IFC auf zwei verschiedene Arten erfolgen. Die Klasse *IfcGridPlacement* ermöglicht die Ausrichtung des lokalen Koordinatensystems an einem Rastergitter. Alternativ wird für die Positionierung die Klasse *IfcLocalPlacement* benutzt. Dabei wird ein neues lokales Koordinatensystem definiert, indem eine Transformation (Translation und Rotation) in Bezug auf ein anderes Koordinatensystem angegeben wird. Dieses kann wiederum lokal definiert sein oder es bezieht sich auf den globalen Koordinatenursprung (vgl. Abb. 1).

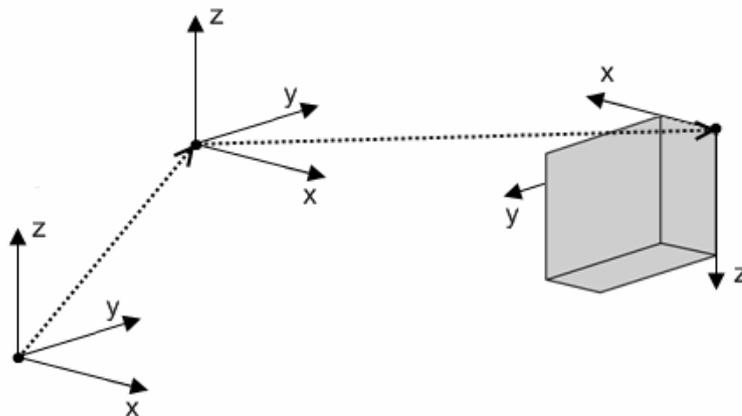


Abb. 1: Beispiel - Relatives Positionieren von lokalen Koordinatensystemen.

Durch das multiple Darstellungskonzept kann ein IFC-Objekt mehrere Repräsentationen besitzen. Folgende Darstellungsarten werden unterschieden:

- 2-D-Darstellungen: *Curve2D*, *Annotation2D*
- 3-D-Oberflächenmodelle: *SurfaceModel*
- 3-D-Volumenmodelle: *SweptSolid*, *Brep*, *CSG*, *Clipping*, *BoundingBox*
- Mischformen: *GeometricSet*, *SectionedSpine*, *MappedRepresentation*
- Topologische Repräsentationen: *TopologyRepresentation*

Jedes IFC-Objekt wird in ein oder mehrere Elemente zerlegt. Eine Treppe kann beispielsweise aus mehreren Teilen zusammengesetzt sein (Stufen, Geländer, etc.). Diese Teilelemente werden nachfolgend als *Items* bezeichnet und in den IFC durch die Klasse *IfcRepresentationItem* abgebildet. Die Klasse *IfcRepresentationItem* ist die Superklasse für alle Darstellungsarten innerhalb des IFC-Modells. Unterklassen davon sind beispielsweise *IfcManifoldSolidBrep* oder *IfcSweptAreaSolid*, die jeweils das notwendige

Modell für ihre entsprechende Repräsentationsart abbilden. Weitere für die Visualisierung notwendige Informationen wie Farbe oder Reflexionsgrad werden mit der Klasse *IfcStyledItem* den *Items* zugewiesen.

3 Brep- und Surface-Repräsentationen der IFC

Das Boundary-Representation-Modell (Brep) beschreibt einen 3-D-Körper durch die Definition seiner begrenzenden Oberflächen. Die Normalen der Oberflächen zeigen vom Körper weg und definieren auf diese Weise die „Außenseiten“ des Körpers. Die Normale ergibt sich aus der Umlaufrichtung des Polygonzugs der Außenkante der jeweiligen Fläche. Außenkanten werden gegen den Uhrzeigersinn angegeben, Innenkanten (Löcher) entgegengesetzt [1].

Eine Brep-Repräsentation beschreibt demnach einen geschlossenen Körper. Für das Surface-Model ist diese Festlegung nicht definiert. Das heißt, ein Surface-Model beschreibt keinen geschlossenen Körper, sondern lediglich dreidimensionale Flächen. Beide Darstellungsarten werden vor allem für komplexe Geometrien verwendet, die sich nicht effektiv als Extrusions-, Rotations- oder CSG-Körper modellieren lassen. Sie finden beispielsweise bei Türen, Fenstern, Treppen, Möbeln oder Landschaftsmodellen Anwendung.

Die *Items* eines IFC-Objekts mit einer Brep-Repräsentation sind vom Typ der Klasse *IfcManifoldSolidBrep*, die eine abstrakte Superklasse für *IfcFacetedBrep* und *IfcFacetedBrepWithVoids* ist. Beide Untertypen besitzen eine geschlossene äußere Hülle. Der zweite Typ hat zusätzlich mindestens einen Hohlraum innerhalb der Außenhülle. Die Hohlräume dürfen sich nicht gegenseitig überschneiden und werden ebenfalls als geschlossene Hülle angegeben. Die Normalen der Oberflächen zeigen in den Hohlraum hinein. Durch die Forderung nach einer geschlossenen Hülle mit gerichteten Oberflächen können Körper mit Brep-Repräsentation für eine eventuelle CSG-Modellierung weiterverwendet werden. Auf Objekte mit Surface-Model-Repräsentation trifft dies nicht zu, da dort auch offene Hüllen zugelassen sind. Die *Items* eines IFC-Objekts mit dieser Art der Darstellung sind entweder vom Typ *IfcFaceBasedSurfaceModel* oder *IfcShellBasedSurfaceModel*. Ersteres enthält lediglich eine Aufzählung aller Oberflächen, während letzteres aus einer Menge von geschlossenen oder offenen Hüllen zusammengesetzt ist. Für eine korrekte Darstellung von IFC-Objekten mit Surface-Model-Repräsentation müssen Vorder- und Rückseite der Oberflächen sichtbar sein.

Offene und geschlossene Hüllen werden in den IFC durch die Klasse *IfcConnectedFaceSet* repräsentiert. Dies ist die Superklasse für *IfcClosedShell* und *IfcOpenShell*, wobei ein Körper mit Brep-Repräsentation, wie bereits beschrieben, lediglich aus geschlossenen Hüllen (*IfcClosedShell*) bestehen darf. Eine Hülle setzt sich aus mehreren Oberflächen zusammen. Diese Oberflächen sind vom Typ *IfcFace* und beinhalten eine Menge (Set) von Konturen vom Typ der Klasse *IfcFaceBound*. Die äußere Kontur ist vom Typ der Unterklasse *IfcFaceOuterBound*. Sind mehr als eine Kontur angegeben, stellen die weiteren Konturen Löcher in der Oberfläche dar (Abb. 2). Ein *IfcFaceBound* hat zwei Attribute. Über das Attribut *Bound* erhält man einen Verweis auf den beschreibenden Polygonzug. Das Attribut *Orientation* gibt an, ob die Umlaufrichtung des Polygons gegen die Konvention verläuft [2],[3].

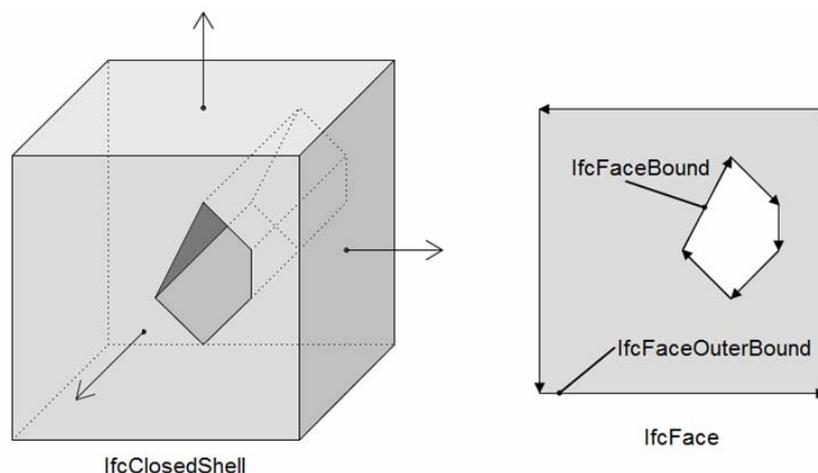


Abb. 2: IfcClosedShell und IfcFace.

4 Visualisierung mittels Java3D

Java3D ist eine leistungsfähige Erweiterung für die Standard Java API („Application Programming Interface“) zur Darstellung von dreidimensionalen Grafiken basierend auf *OpenGL* sowie *DirectX*. Das interne Modell des Java3D API wird durch eine Baumstruktur beschrieben. Diese Struktur wird durch ein *Scene Graph* beschrieben [4]. Er stellt die topologischen Zusammenhänge der darzustellenden 3-D-Geometrie und Transformationen graphisch dar. Für die Erzeugung des Java3D Modells werden für die gewählte Umsetzung folgende Klassen aus dem Java3D API benötigt:

- *BranchGroup*: Gruppe zur Aufnahme von Kindern
- *TransformGroup*: Gruppe zur Transformation aller Kinder
- *Switch*: Gruppe zum unsichtbar / sichtbar Schalten aller Kinder
- *Shape3D*: repräsentiert ein zu visualisierendes Objekt

Zu visualisierende Körper werden jeweils durch ein *Shape3D-Objekt* repräsentiert. Die Klasse *Shape3D* besitzt für die Festlegung von Geometrie und Aussehen die Attribute *Geometry* und *Appearance* (Farbe, Reflexionseigenschaften, etc.). Für die Implementierung des *Scene Graphs* wurde eine neue Klasse *Object3D* entwickelt, die die Klasse *BranchGroup* durch Vererbung erweitert. Sie beinhaltet u.a. Methoden zur Aufnahme von *Shape3D-Objekten* und zum Setzen der Transformation des gesamten 3D-Körpers. Die interne Struktur des *Scene Graphs* der Klasse *Object3D* ist in *Abb. 3* dargestellt. Dieser Aufbau ermöglicht es, allen Shapes eines Objekts eine gemeinsame Translation im Raum aufzutragen. Außerdem lassen sich so ganze Objekte mit ihren Teilelementen auf einfache Weise in der Darstellung ausblenden. Für jedes darzustellende IFC-Objekt wird ein neues Objekt der Klasse *Object3D* erzeugt. Da IFC-Objekte aus mehreren *Items* bestehen, wird für jedes *Item* ein neues *Shape3D-Objekt* erzeugt, welches anschließend an die gemeinsame *TransformGroup* der *Object3D-Klasse* gehangen wird. Das erzeugte *Object3D* wird dann schließlich an die Wurzel des *Scene Graphs* gehangen.

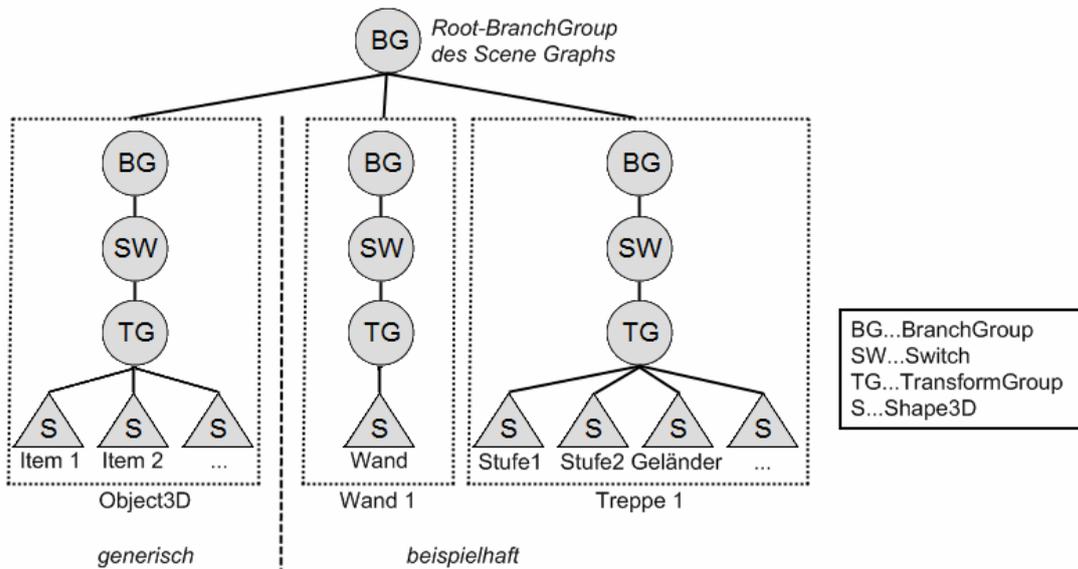


Abb. 3: Beispiel eines Scene Graphs.

Für die Darstellung der *Items* eines IFC-Objekts ist es erforderlich die Geometrie-Informationen der IFC in ein Objekt der Klasse *Geometry* aus dem Java3D API zu überführen. Die Utility-Klasse *GeometryInfo* aus dem Java3D API vereinfacht die Erzeugung der Geometrie und bietet diverse Möglichkeiten der Umwandlung u.a. in ein trianguliertes Oberflächenmodell. Zusammen mit der Klasse *NormalGenerator* lassen sich auf einfache Weise die Normalen der Oberflächen erzeugen, welche für die Berechnung von Lichtreflexen auf der Oberfläche benötigt werden. Diese Normalen haben keinen Einfluss auf die Bestimmung der Vorderseite, die ausschließlich aus der Umlaufrichtung des Polygonzugs der jeweiligen Fläche bestimmt wird.

Für die Erzeugung der Geometrie mittels der Utility-Klasse *GeometryInfo* werden die folgenden drei Felder benötigt:

- *int[] contourCounts*: gibt an, wie viele Konturen zu einer Oberfläche gehören. Die Länge des Feldes entspricht der Anzahl der darzustellenden Flächen. Die Werte des Feldes entsprechen der Anzahl der Konturen für die jeweilige Fläche.
- *int[] stripCounts*: gibt an, aus wie vielen Eckpunkten sich der Polygonzug der jeweiligen Kontur zusammensetzt. Die Länge des Feldes entspricht der Anzahl aller Konturen. Die Werte des Feldes entsprechen der Anzahl der Eckpunkte des jeweiligen Polygons.
- *Point3d[] vertices*: enthält die Eckpunkte der Konturen. Die Länge des Feldes entspricht der Anzahl aller Eckpunkte der Konturen.

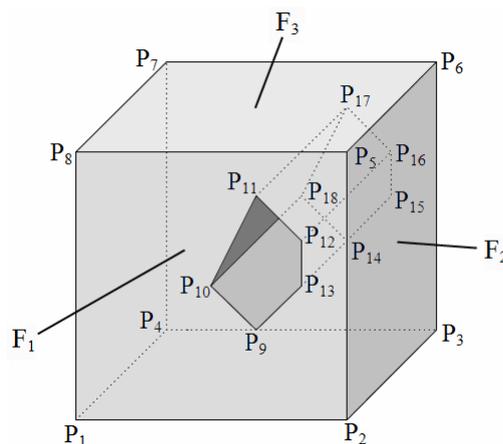


Abb. 4: Beispiel für die Visualisierung mit Java3D.

Zur Verdeutlichung wird die Erzeugung dieser Felder anhand eines Beispiels demonstriert. Für den Körper aus *Abb. 4* soll ein *Geometry* Objekt für die Darstellung mit Java3D erzeugt werden. Der Gesamtkörper V_1 besteht insgesamt aus elf Einzelflächen F_i .

$$V_1 = \{ F_1, F_2, F_3, F_4, \dots, F_{10}, F_{11} \}$$

Die Flächen F_i setzen sich aus beliebig vielen Konturen K_j zusammen, wobei die erste Kontur jeweils die äußere Kante der Fläche F_i ist. Weitere Konturen beschreiben Polygonzüge von Löchern in der Oberfläche mit den Eckpunkten P_k .

$$\begin{array}{ll}
 F_1 = \{ K_1, K_2 \} & K_1 = \{ P_1, P_2, P_5, P_8 \} \\
 F_2 = \{ K_3 \} & K_2 = \{ P_9, P_{10}, P_{11}, P_{12}, P_{13} \} \\
 F_3 = \{ K_4 \} & K_3 = \{ P_2, P_3, P_6, P_5 \} \\
 F_4 = \{ K_5 \} & K_4 = \{ P_5, P_6, P_7, P_8 \} \\
 F_5 = \{ K_6 \} & K_5 = \{ P_8, P_7, P_4, P_1 \} \\
 F_6 = \{ K_7 \} & \dots \\
 \dots & K_{12} = \{ P_3, P_4, P_7, P_6 \} \\
 F_{11} = \{ K_{12}, K_{13} \} & K_{13} = \{ P_{14}, P_{15}, P_{16}, P_{17}, P_{18} \}
 \end{array}$$

Die Länge des *contourCounts*-Feldes ergibt sich für das Beispiel demnach zu elf, da der Körper aus elf Flächen besteht. Die Werte dieses Feldes entsprechen der Anzahl der Konturen pro Fläche. Das *stripCounts*-Feld gibt nun an, wie viele Koordinaten zu den jeweiligen Konturen gehören. Die Länge dieses Feldes ergibt sich aus der Anzahl der Konturen. Das *vertices*-Feld wird fortlaufend mit den entsprechenden Koordinaten aufgefüllt. Die Länge des Feldes entspricht der Summe aller Elemente der *stripCounts*, also der Anzahl der Punkte aller Konturen. Sind diese Felder ermittelt, kann man sie einem *GeometryInfo*-Objekt übergeben. Mit der Methode *getGeometryArray()* der Klasse *GeometryInfo* erhält man ein *Geometry* Objekt, welches bei der Instanziierung dem Konstruktor des *Shape3D* Objekts übergeben wird (vgl. *Abb. 5*).

$$\begin{aligned}
 & \text{contourCounts} = \{ 2, 1, 1, 1, \dots, 2 \} \\
 & \text{stripCounts} = \{ 4, 5, 4, 4, 4, \dots, 4, 5 \} \\
 & \text{vertices} = \{ \underbrace{P_1, P_2, P_5, P_8, P_9, P_{10}, P_{11}, P_{12}, P_{13}}_{K_1}, \underbrace{P_2, P_3, P_6, P_5, \dots, P_{14}, P_{15}, P_{16}, P_{17}, P_{18}}_{K_{13}} \}
 \end{aligned}$$

```

GeometryInfo gInfo = new GeometryInfo(GeometryInfo.POLYGON_ARRAY);
gInfo.setContourCounts(contourCounts);
gInfo.setStripCounts(stripCounts);
gInfo.setCoordinates(vertices);
Shape3D shape = new Shape3D(gInfo.getGeometryArray());

```

Abb. 5: Source Code - Instanziierung eines Shape3D-Objekts.

Um die Geometrie eines *Items* mit einer Brep-Repräsentation der IFC in die Java3D Form zu überführen, werden die vorgestellten drei Felder für jedes *Item* benötigt. Um nicht im Voraus die Größe der drei benötigten Felder bestimmen zu müssen, werden dynamische Speicherstrukturen in Form einer Liste verwendet. Nach dem Auslesen der Brep-Struktur können die benötigten Felder daraus erzeugt werden. Es werden drei Listen angelegt: *contourCounts*, *stripCounts* und *vertices*. Ein *Item* besteht bei einer Brep- oder Surface-Model-Darstellung aus einem oder mehreren *IfcConnectedFaceSet* Objekten, also offenen oder geschlossenen Hüllen. Ist mehr als eine Hülle angegeben, werden die Listen für jede Hülle einfach fortgeschrieben. Der in *Abb. 6* gezeigte Algorithmus beschreibt die Erzeugung dieser Listen. Dabei wird über jede Fläche eines *IfcConnectedFaceSet* Objekts iteriert. Es wird die Anzahl der Konturen (*IfcFace.Bounds*) pro Fläche der *contourCounts*-Liste hinzugefügt. Anschließend wird über jede Kontur der Fläche iteriert. Da die *IfcFace.Bounds* nach IFC-Definition in einem Set, also einer ungeordneten Menge, angegeben werden, müssen diese sortiert werden, da die äußere Kontur der Fläche (*IfcFaceOuterBound*) vor den inneren Konturen in die Listen *stripCounts* und *vertices* eingetragen werden muss. Dafür werden zwei temporäre Listen für *stripCounts* und *vertices* notwendig. Nachdem alle Konturen der Fläche durchlaufen sind, werden die Inhalte der temporären Listen den richtigen Listen hinzugefügt. Für jede Kontur wird die Anzahl der Eckpunkte des Polygons ermittelt. Ist die Kontur vom Typ der Klasse *IfcFaceOuterBound*, wird diese Anzahl direkt an die *stripCounts*-Liste angehängen, andernfalls an die temporäre *stripCounts*-Liste. Anschließend wird mit einer Zählschleife über alle Punkte der Kontur iteriert. Ist das Attribut *Orientation* der Kontur auf „false“ gesetzt, so müssen die Punkte in entgegengesetzter Reihenfolge ausgelesen werden. Aus

den Koordinaten des Polygonzugs wird ein *Point3d*-Objekt erzeugt. Analog zu der *stripCounts*-Liste wird dieser Punkt entweder der *vertices*-Liste oder der temporären *vertices*-Liste angehängt. Zum Abschluss werden äquivalente Felder mit den Inhalten der Listen erzeugt. Somit kann nun die Geometrie weiterverwendet werden, um ein *Shape3D* Objekt zu erzeugen. Das erzeugte *Shape3D* des Items wird dem *Object3D* hinzugefügt. Im nächsten Schritt werden Objekttransformation und Stileigenschaften ausgelesen und gesetzt.

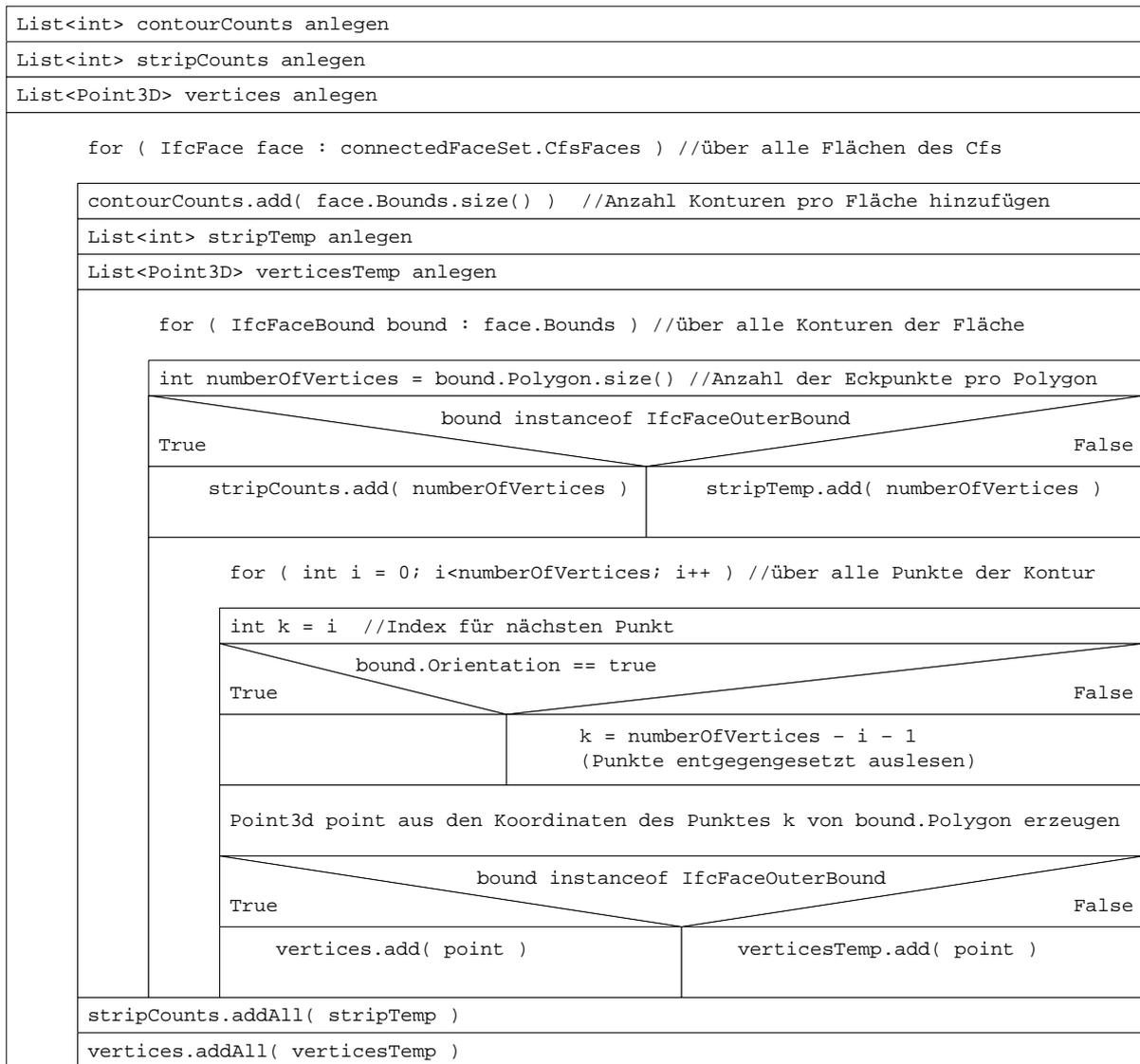


Abb. 6: Struktogramm - Überführen von IFC-Geometrie in Java3D-Geometrie.

5 Ergebnis und Ausblick

Dieser Beitrag beschreibt die Visualisierung von IFC-Objekten mittels Java3D. Er beschränkt sich dabei exemplarisch auf die Darstellung von Objekten, deren Geometrie mittels Boundary Representation (Brep) oder als Surface-Model beschrieben wird. Die notwendigen Methoden zum Überführen von Geometrie-Informationen aus den IFC in eine entsprechende Form für Java3D wurden entwickelt und gezeigt.

Der dargestellte Algorithmus ist Teil eines *IFC-Viewers*, der am Lehrstuhl Informatik im Bauwesen der Bauhaus -Universität Weimar entwickelt wird. Er ist als Open-Source-Projekt angelegt und wird unter www.openifctools.org veröffentlicht.

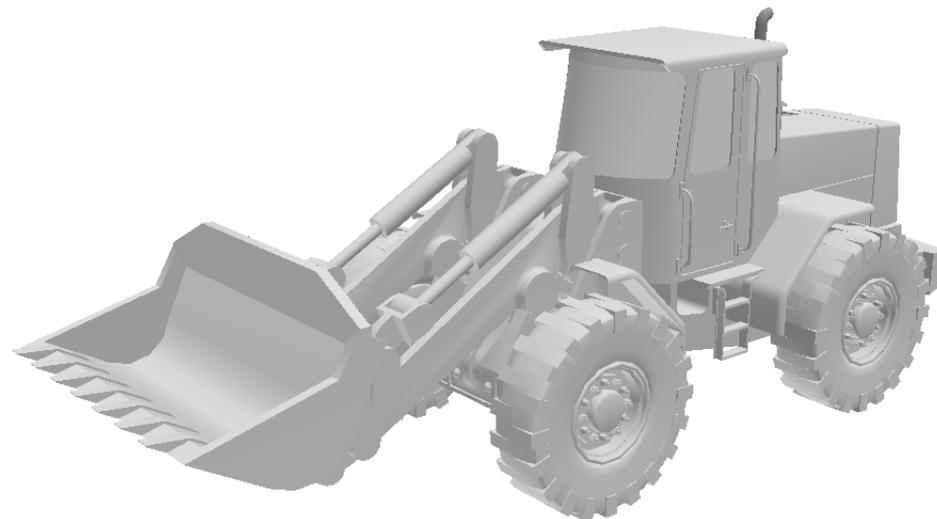


Abb. 7: Visualisierung eines Radladers.

Literaturverzeichnis

- [1] C. M. Hoffmann. *Geometric and Solid Modeling. An Introduction*. 1989.
- [2] T. Liebich. *IFC 2x3 Final Documentation*. 2007.
- [3] T. Liebich. *IFC 2x2 Model Implementation Guide (Version 1.7)*. 2004.
- [4] D. J. Bouvier. *Getting Started with the Java 3D API (Tutorial Version 1.5)*. 1999.

Interaktive numerische Tragwerksmodellierung am Beispiel eines Aussichtsturms

Fabian Gerold

*Universität Weimar, Professur Informatik im Bauwesen, 99423 Weimar,
Deutschland, E-Mail: fabian.gerold@uni-weimar.de, Telefon +49(0)3643/584223*

Kurzfassung

Softwaresysteme für den Tragwerksentwurf sind üblicherweise für einen sequentiellen Arbeitsablauf optimiert: Eingabe, Berechnung, Ausgabe. Für jeden Arbeitsschritt stehen spezialisierte Programme zur Verfügung wie CAD-Programme zur Eingabe oder spezielle Programme zum Post-Processing. Diese Aufteilung ist für das frühe Entwurfsstadium eher ungeeignet, da die Arbeitsweise hier meist sehr stark durch Probieren und Korrigieren, also iterativ, geprägt ist. Dies führt oft dazu, dass in der frühen Entwurfsphase gar keine Softwaresysteme zur numerischen Simulation eingesetzt werden. Die heutigen technischen Möglichkeiten bezüglich schneller numerischer Analyse beziehungsweise Re-Analyse und Visualisierung von Tragwerksmodellen können jedoch sehr hilfreich sein, auch für die konzeptuelle Entwurfsphase.

In diesem Projekt wurden die Möglichkeiten von interaktiver Tragwerksmodellierung mit numerischer Simulation und Visualisierung untersucht und implementiert.

Stichworte

Konzeptueller Tragwerksentwurf, Simulation, Visualisierung, Interaktion, OpenSees, OpenSceneGraph

1 Analytische und numerische Berechnungsmethoden in der konzeptuellen Entwurfsphase

Es gibt bekanntlich viele bewährte analytische Berechnungsmethoden, die sich für einen konzeptuellen Tragwerksentwurf eignen. Diese werden vermutlich immer ihre Existenzberechtigung behalten, wahrscheinlich aber nicht mehr wesentlich weiterentwickelt werden. Dagegen haben sich die numerischen (rechnergestützten) Verfahren in den letzten Jahren und Jahrzehnten bereits stark weiterentwickelt, und bei

diesem Prozess sind noch keine Grenzen der Entwicklung absehbar. Dennoch wird das Potenzial heutiger Hardware- und Software-Frameworks nur teilweise genutzt hinsichtlich des Einsatzes in der konzeptuellen Entwurfsphase von Tragwerken wie Brücken, Hallen oder Hochhäusern. Dies liegt in der geschichtlichen Entwicklung heutiger Softwaresysteme begründet, die auf den einmaligen Aufbau eines numerischen Modells ausgerichtet wurden mit anschließender Berechnung und Ergebnisauswertung, denn die Rechenzeiten betragen vor einigen Jahren oftmals Tage und Wochen. Eine interaktive Arbeitsweise blieb ein Wunsch, der jedoch schon sehr früh in der Geschichte der numerischen Modellierung aufkam: So wurde bereits 1965 am MIT ein Konzept zur interaktiven Modellierung entwickelt unter dem Term *Integrated Computer System for Engineering Problem Solving* [1].

Heute erlauben Hardware und eine moderne Softwarearchitektur eine solche interaktive Arbeitsweise mit numerischen Modellen, der Bedarf an Forschung und Entwicklung ist hier aber noch sehr groß.

2 Optimierungsverfahren im konzeptuellen Tragwerksentwurf

Die Idee der Optimierung besteht darin, ein Tragwerksmodell zu parametrisieren und einem Optimierungsalgorithmus das Finden der optimalen Werte für alle Parameter zu überlassen. Die System-Parameter, auch Optimierungsvariablen genannt, können verschiedene Eigenschaften definieren wie zum Beispiel Material- oder Querschnittswerte, Knotenkoordinaten und Ähnliches. Der Algorithmus braucht dabei explizite Informationen zu den Startwerten und dem Definitionsbereich der Optimierungsvariablen. Weiterhin muss definiert werden, was überhaupt optimiert werden soll. Meistens geht es um eine Kosten- oder Gewichtsminimierung, das heißt eine formale Beschreibung dieses Optimierungsziels (die so genannte Zielfunktion) ist notwendig. Außerdem gibt es üblicherweise eine ganze Reihe von Nebenbedingungen wie Spannungsbegrenzungen, die definiert werden müssen. All das ist sehr aufwendig, was vermutlich der Hauptgrund dafür ist, dass Optimierung bisher im Bauwesen praktisch nicht eingesetzt wird, schon gar nicht in der konzeptuellen Entwurfsphase.

Trotzdem kann die Idee eines parametrisierten Tragwerksmodells hilfreich sein, um auch und gerade im konzeptuellen Tragwerksentwurf eingesetzt zu werden. Die Frage ist nur, ob ein Algorithmus oder ein Mensch an den „Stellschrauben drehen“ soll, um den Entwurf zu optimieren. Da der Mensch über eine grafische Darstellung die Qualität eines Entwurfs sehr schnell und gut beurteilen kann, ohne dass alle Kriterien formal definiert

werden müssen, ist der aufwendige Einsatz eines Algorithmus zumindest im konzeptuellen Entwurf vermeidbar. Allerdings ist dazu ein Softwaresystem notwendig, das eine interaktive, parametrisierte Modellierung mit Visualisierung und möglichst schneller numerischer Analyse und Re-Analyse nach Parameterveränderungen erlaubt.

3 Nutzung vorhandener Programme für interaktive Tragwerksmodellierung

Die numerische Modellierung und Simulation eines Tragwerks besteht aus mehreren Teilschritten (Eingabe, Berechnung, Ausgabe und Ergebnisvisualisierung). Für die Eingabe von Tragwerken bieten sich etablierte, meist kommerzielle CAD-Programme an. Diese eignen sich aber nicht für die Ergebnisvisualisierung, was den Einsatz mehrerer Programme notwendig macht. Dies macht einen Iterationszyklus in der konzeptuellen Entwurfsphase aufwendig, und der Zusammenhang zwischen der Veränderung eines Parameters und den Auswirkungen ist nur schwer nachvollziehbar. Genau dieser Zusammenhang soll in diesem Projekt möglichst intuitiv erfahrbar gemacht werden.

Die Schnittstellen kommerzieller Softwaresysteme sind immer mit sehr starken Einschränkungen verbunden, so dass nur ein kleiner Teil der Möglichkeiten an Interaktion und Visualisierung genutzt werden kann, die heute vorhanden sind.

Aus diesen Gründen wurde in diesem Projekt auf den Einsatz von *Closed Source-Softwaresystemen* verzichtet und stattdessen auf *Open Source-Frameworks* für numerische Simulation und grafische Visualisierung zurückgegriffen. Dies macht natürlich eigene Implementierungen notwendig, die im Folgenden beschrieben sind.

4 ISDS – Integrative Structural Design System

Das im Rahmen dieses Projektes entstandene Programm ISDS soll nicht die komplette Funktionsbreite kommerzieller FEM-Programme abdecken, sondern anhand eines dreidimensionalen Rahmentragwerkes die Möglichkeiten von interaktiver FEM-Modellierung untersuchen und demonstrieren.

Als Anwendungsbeispiel wurde hier ein Aussichtsturm modelliert mit einigen Entwurfsparametern wie Durchmesser, Höhe, Querschnittswerte.



Abb. 1: Aussichtsturm, ISDS mit Tragwerksmodell.

Es wurden nicht nur statisch wirksame Elemente modelliert, sondern auch Elemente wie die Außenhülle, die für die Ästhetik des Entwurfs wichtig sind. Damit soll erreicht werden, dass die Form des Turmes gleichzeitig mit dem Tragwerk entworfen werden kann, anstatt in getrennten Schritten.

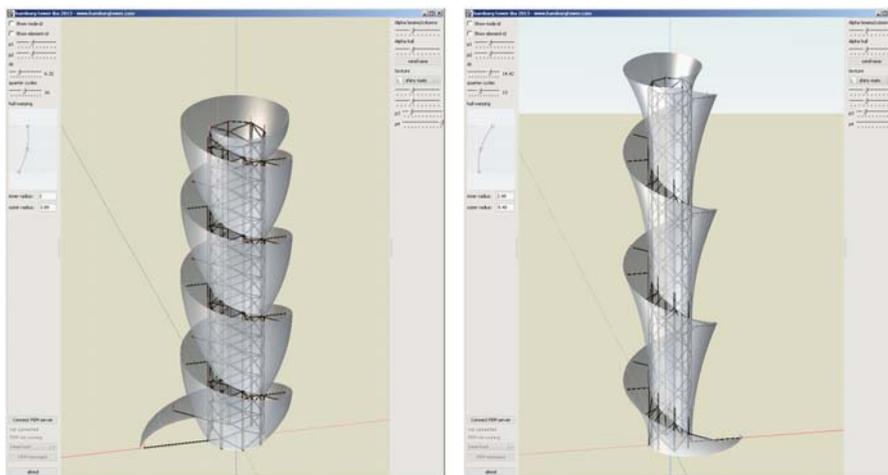


Abb. 2: Interaktive, parametrisierte Modellierung.

ISDS verwendet drei große Open-Source-Bibliotheken: „OpenSceneGraph“ [2, 3] als 3-D Viewer, Qt [4, 5] als GUI-Framework und „OpenSees“ [6, 7] als FEM-Rechenkern.

Ursprünglich waren alle drei Pakete direkt in ISDS integriert, was jedoch problematisch war, vor allem, da OpenSees eigentlich als Konsolenanwendung konzipiert ist (bei einem Fehler wird *exit()* ausgegeben). Außerdem musste mit Threads gearbeitet werden, da die numerische Analyse sonst die Programmoberfläche einfrieren würde. Die Threads führen durch die notwendigen Unterbrechungen zu einer Verlangsamung des Programms.

Aus diesen Gründen wurde das FEM-Paket in einem eigenen Programm („FEM-Server“) gekapselt und mit einer TCP-Verbindung mit dem eigentlichen Modellierungs- und Visualisierungsprogramm verbunden (Abb. 3).

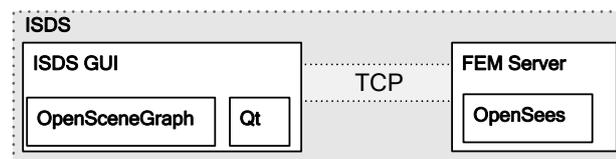


Abb. 3: Aufbau von ISDS

Das Format des TCP-Streams zwischen Server und Client wird in einer einheitlichen Header-Datei definiert. Die Aufteilung des Programms auf Server und Client hat mehrere Vorteile:

- Es müssen keine Threads unterbrochen werden
- Der FEM-Server kann für verschiedene Anwendungen verwendet werden
- Mehrere FEM-Server können parallel verwendet werden
- Server und Client können auf derselben Maschine laufen, oder auf mehreren Maschinen
- Das FEM-Paket kann durch ein anderes ersetzt werden, ohne dass die ganze Anwendung geändert werden muss.

Trotz der zusätzlichen Kosten für die TCP-Datenübertragung laufen numerische Simulationen in ISDS damit schneller als bei der direkten Integration des FEM-Paketes. Das ist sogar dann der Fall, wenn beide Anwendungen auf derselben Maschine (mit Doppelkernprozessor) laufen. Je größer das numerische Modell, desto geringer werden die relativen Kosten der TCP-Kommunikation im Verhältnis zum FEM-Rechenaufwand, da ersterer linear ansteigt, letzterer jedoch exponentiell.

Für das implementierte Beispiel betragen die Zeiten von der Änderung eines Parameters bis zur vollständigen Ergebnisdarstellung von Spannungen und

Verformungen nur ca. 30 Millisekunden auf einem Vierkernprozessor mit 2.3 GHz. Dabei kommen nichtlineare Materialgesetze zur Anwendung mit entsprechenden Gleichungslösern. Das heißt, bei Änderungen im System können die Auswirkungen praktisch Verzögerungsfrei ermittelt und visualisiert werden, was eine intuitive Arbeitsweise ermöglicht.

5 OpenSees

In diesem Projekt wurde OpenSees [6, 7] als FEM Rechenkern verwendet. OpenSees ist ein Open-Source-Projekt der Universität Berkeley, Kalifornien. Mit OpenSees sind nichtlineare Berechnungen mit statischen oder dynamischen Belastungen möglich. Verschiedene Stab-, Flächen- und Volumenelemente können verwendet werden. Anwendungsgebiet von OpenSees ist hauptsächlich die Erdbebenforschung.

OpenSees wird üblicherweise mit einer Eingabedatei in der Konsole gestartet, die Berechnungsergebnisse werden in einer oder mehreren Textdateien gespeichert. Für eine interaktive Simulation wäre dieser Ansatz jedoch zu langsam und unflexibel, da nach jeder Änderung die komplette Eingabedatei neu geschrieben werden müsste. Ebenso müsste das FEM-Berechnungsmodell mit Gleichungslösern etc. bei jeder Analyse oder Re-Analyse komplett neu generiert werden. Daher wurde in diesem Projekt OpenSees über dessen objektorientierte Struktur direkt in die Software eingebunden.

6 OpenSceneGraph

OpenSceneGraph (OSG) [3, 4] ist eine Abstraktionsschicht auf OpenGL, komplett in C++ geschrieben und als *Open Source* verfügbar. OSG wird viel in Forschung und Industrie verwendet, zum Beispiel für Flugsimulatoren. Insbesondere bietet OSG Event-Handling, Culling, Level-of-Detail, Stateset-Management und Kamera-Management. In OSG können grafische Primitive wie Zylinder, Kugeln oder Kuben verwendet werden. Für komplexere Grafik-Objekte kann auch in einer von „osg::Drawable“ abgeleiteten Klasse die Methode „drawImplementation“ überschreiben und darin mit direkten OpenGL-Aufrufen die grafische Darstellung definiert werden. In diesem Projekt wurden zum Beispiel die verformten Stabelemente mit direkten OpenGL-Aufrufen gerendert (Abb. 4).

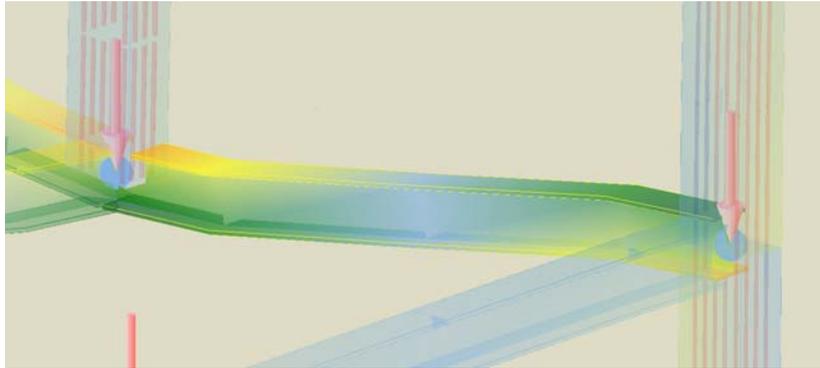


Abb. 4: Visualisierung von Stabelementen

7 Ergebnis und Ausblick

Die in diesem Projekt entwickelte Software ermöglicht einen interaktiven Entwurf eines konkreten Anwendungsbeispiels. Die mit der Software ISDS entwickelten Konzepte funktionieren bereits stabil und schnell, so dass eine interaktive und intuitive Arbeitsweise möglich ist. Dadurch wird nicht nur der Entwurfsprozess beschleunigt, sondern es wird auch ein Variieren des Entwurfs angeregt, da der Aufwand zur Veränderung von Systemparametern und der Ergebnisauswertung drastisch sinkt im Vergleich zu Programmen mit einem sequentiellen und nicht-interaktiven Arbeitsablauf. Durch Ausprobieren verschiedener Varianten kann zum einen ein verbesserter Entwurf gefunden werden. Zum anderen lernt der Anwender viel über das System und über generelles Tragverhalten, da Auswirkungen bestimmter Systemveränderungen direkt sichtbar werden und damit gut verglichen werden können.

Natürlich kann nicht für jedes neu zu planende Bauwerk eine eigene Software zur interaktiven Modellierung geschrieben werden. Dazu ist eine über dieses Projekt hinausgehende Verallgemeinerung der Software erforderlich.

Das in diesem Projekt entwickelte Programm steht unter www.structuralsimulation.net zum Download bereit. Später soll auch der Quellcode als Open-Source veröffentlicht werden, was oben genannte Verallgemeinerung der Modellierungsmöglichkeiten vorantreiben soll.

Literaturverzeichnis

- [1] D. Roos. *An Integrated Computer System for Engineering Problem Solving, Proceedings of the 1965 Spring Joint Computer Conference SJCC.*
- [2] P. Martz, B. Kuehne. *OpenSceneGraph Reference Manual v2.2, Skew Matrix Software and Blue Newt Software. 2007.*
- [3] OpenSceneGraph, <http://www.openscenegraph.org>
- [4] J. Blanchette, M. Summerfield. *C++ GUI Programming with Qt 4, Prentice Hall PTR. 2008.*
- [5] Qt GUI Toolkit. <http://www.qtsoftware.com>
- [6] S. Mazzoni, F. McKenna, M. H. Scott, G. L. Fenves, et al. *OpenSees Command Language Manual. 2006.*
- [7] OpenSees. Open System for Earthquake Engineering Simulation. <http://opensees.berkeley.edu>

Parametric Modelling Supporting Collaborative Design

Ena Tobin, ZiXiang Cong

University College Cork, Civil and Environmental Engineering Department, Cork, Ireland, E-mail: enatobin@gmail.com, Telephone +3532 1/4205273

Abstract

In our paper, we will discuss the primary motivations for the usage of parametric data in Collaborative Design (see first paragraph) and describe a project currently implemented using *Parametric Modelling* in Revit and Bentley (second paragraph). The final section of this paper will investigate how the above mentioned libraries behave when they are transferred from one modelling program to another (third paragraph). The use of this type of design ideally should shorten the time span spent on detailed modelling of built artifacts. This section will describe the effort which is needed to ensure that the parameters are carried forward into each program used by each entity. It will also briefly describe the fundamental difficulties of using various standard commercial packages in a collaborative design environment at the present time.

Keywords

Parametric Modelling, Collaborative Design, Industry foundation classes

1 Introduction

In the construction and building management industry at the present time, a large amount of time is spent creating and editing 2-D and 3-D models. This paper focuses on the use of parametric modelling to support collaborative design and so save time and money for all parties in the construction industry.

Representation of all the information needed to describe buildings throughout the whole design, construction and management process has long been an objective for those applying information technologies in building [1].

As a result, *Building Information Modeling* (BIM) and *Parametric Modelling* are two hot topics in the AEC (*Architecture, Engineering and Construction*) industry. BIM (*Building Information Modeling*) deals with representations of the buildings in design phase, and includes information for collaboration with external team members, production of high-quality construction documents, building performance, cost analysis and construction planning, etc. *Parametric Modelling* defines rules and constraints, which define the relationships between building components. Creating and modifying these relationships will have an impact on the models, for example if a change is made, it will be automatically coordinated throughout the project, so the designs and documentation stay consistent and complete. There are several tools available which are designed to create parametric architectural models, including *Revit Parametric Components* (also known as families, running with „Revit“ by Autodesk Systems), and *Generative Components* (Running within „MicroStation“ by Bentley Systems). We do currently use these two tools for our research projects at University College Cork.

2 Building Information Modeling (BIM)

Building Information Modeling (BIM) technology transforms the paradigm of the construction industry from 2-D-based drawing information systems into 3-D object-based information systems [2]. Typically, a BIM contains all the data relating to the building's performance – such as geometry, materials, energy systems and components, occupancy schedules, environmental conditions as well as operational data.

Building Information Modeling operates on digital databases. By storing and managing building information as databases, BIM systems can capture, manage and present data in ways that are appropriate and customary for a particular designer, contractor, vendor or client. Such applications start with capturing and managing information about the building, and then present that information back as conventional drawing views or in any other appropriate way such as tables or perspective views, and make it available for use and reuse at every phase in the project („AutoDesk 2002“).

It has been proposed previously that BIM would be based on the *IAI* (*Industry Alliance for Interoperability*) *Industry Foundation Class* (IFC) data schema [3]. This will allow for the integration of all the building views (geometry, material, HVAC system etc), enabling interoperability among the various tools needed for performance-based assessment across the building lifecycle, such as whole building energy simulation. However, this proposal is encountering difficulties in its realisation.

One major problem facing BIMs is the absence of the responsibility for modelling the construction product and material in a multidisciplinary cross industrial level of abstraction [4]. Architects do not have the ability to model each of the thousands of elements that would be required to be modelled for each project. They would probably be paid for drawings and documents rather than models. Models may be project specific and cannot be used in product libraries. That approach would go beyond the investment employed. A solution to this is *OIP (Object Information Packs)*: An information model would be completed as part of construction project where each discipline carries out there own modelling.

Object-oriented tools to build such a model have now been available for some time, but the need to integrate the many people involved in the process, and the ways in which their information is organized, have been a limitation on the widespread use of building information models [5].

Constraints and parametric variation, which BIM CAD is built around, have been active areas of investigation in computer-aided architectural design for over fifteen years [6], and so we will now introduce comprehensively *Parametric Modelling*.

3 Parametric Modelling

Parametric design is, in a sense, a rather restricted term: It implies the use of parameters to define a form when what is actually in play is the use of relations [7].

Parametric Modelling is basically 3-D modeling with intelligence. It derives its name from the extensive use of parameters in creating parts and assemblies [8]. Currently parametric design has been adopted by most CAD software, which embeds parametric data into 3-D objects. This includes parameters such as height, width, depth, thickness, materials, and other attributes related to the model, as in fig. 1. Designers use a user interface to insert pre-drawn components from libraries (such as windows, doors, and stairs), which will be described in the following paragraphs.

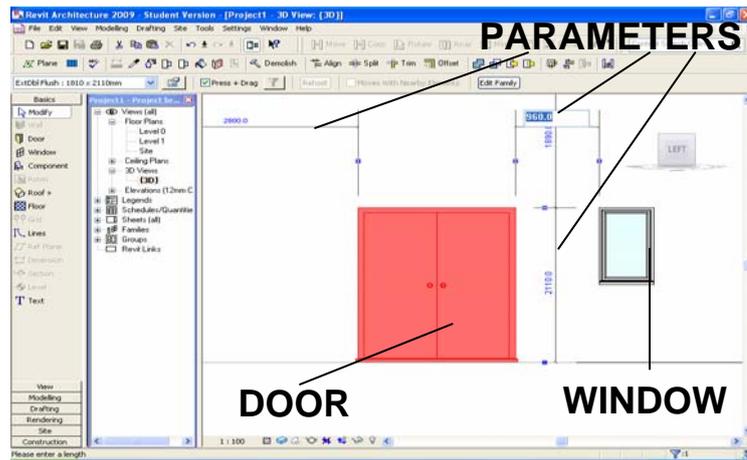


Fig. 1: Pre-drawn Door and Window with Parameters („Revit Architecture“).

One of the simplest ways of using a very rudimentary form of parametric design is to record a script of the commands and data values used to create an element. If this script is edited and data values are changed, we will get a family of variants of the same type with different dimensions. We can refine this method by using a programme such as „Auto Lisp“ to write a macro, a routine or a little program that performs the suitable actions to model the element. The difference between these three terms can be assimilated to a difference in quantity, i.e., a few lines for a macro or a few pages for what might be called a simple program [7]. Macros are programs that are designed to help us save time by automating repetitive tasks. Each macro performs a series of pre-defined steps to accomplish a particular task. The steps should be repeatable and the actions predictable. For example, one might define a macro to add a grid to your project, to rotate a selected object, or to collect information about the square footage of all the rooms in your structure. Other general examples include: Locating and extracting „Revit“ content to external files, tweaking geometry or parameters, creating many types of elements, Importing and exporting external file formats.

There are nine steps to creating a macro at the present version on „Revit“ software. *Add „Revit VSTA“, open/create a project, launch macro manager, view initial macro manager dialog, select template type, click new, name your macro, examine provided template and add implementation code, build your macro in „Revit VSTA IDE“.* So with a basic knowledge of a programming language, one can create a project template using as many macros as one likes or requires.

4 Design Project Experience

In „Bentley Architecture“ one can first construct a 3-D model instead of a traditional 2-D floor plan, the 2-D elevations, sections and schedules and rendering are automatically generated in real-time. The opposite is done by „Autodesk Revit Architecture“. The objective of such technology is to allow designers to share their libraries for team project, as well as reduce design cost and correction times.

In our research team, we have successfully designed and implemented the Environmental Research Institute (ERI) building using the following software: „Bentley Architecture“, „Revit Architecture“. We used IFC to define building components such as walls, windows, and stairs, etc. Fig. 1 shows the parametric elements which defined in IFC, the headline element defined as *IFCWall*, the height is $11:5 \frac{3}{4}$, the weight is $0:11 \frac{3}{4}$ and the material is brick red, the IFC schema are stored in *EXPRESS* language in accordance with *ISO STEP* (Standard for exchange of Product Data) which can be used as a mechanism for sharing semantically rich building information between CAD („computer-aided design“) systems. Furthermore, the IFC model schema can be loaded into a step model server, providing the opportunity to hold the building model as an object database on a central shared computer and accessible across the Internet as a resource to support collaborative design.

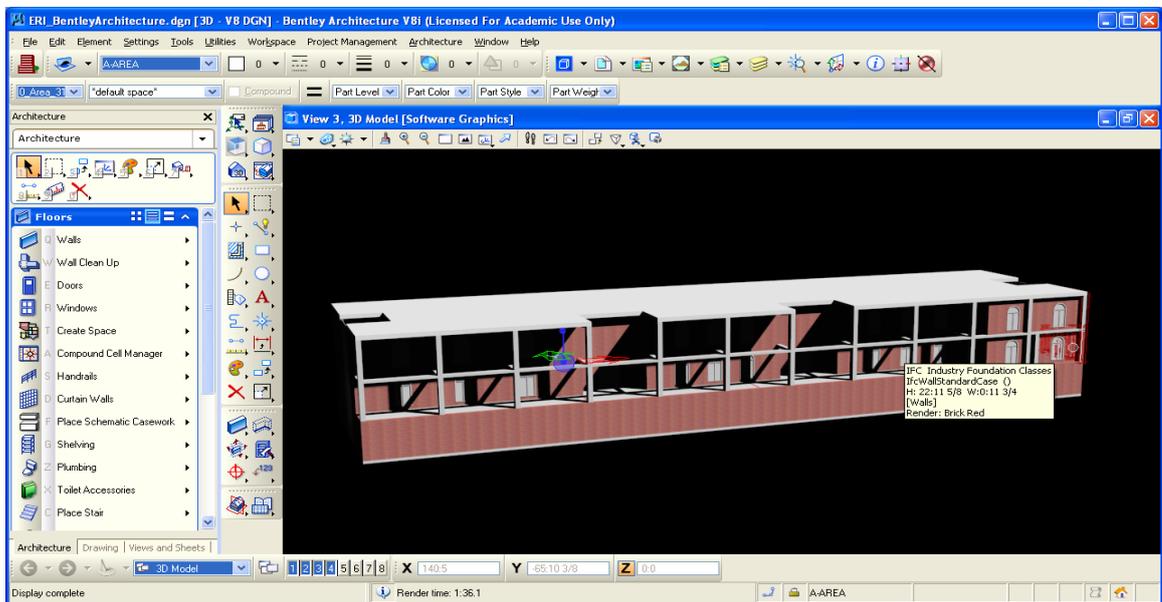


Fig. 2: Define building parameters using IFC („Bentley Architecture“).

„Revit“ was one of the first parametric building modellers designed for the AEC (*Architecture Engineering Construction*) industry. „Revit Architecture“ building design software is purpose-built for *Building Information Modeling (BIM)*. Make a change and it is automatically coordinated throughout your project, so your designs and documentation stay consistent and complete. We create a set of instructions, including the rules and constraints of the design (as well as parameters defining certain aspects of the design), which can be used to build the model. We can use these instructions to always build a model from scratch, each time using the same parameters, or experimenting with different ones. The parameters can be numeric values, relationships, and can even include graphic parameters already existing in the model [9].

Fig. 2 shows the 3-D representation of the ERI building in „Revit Architecture“, all the parametric data are stored in so called *Revit families*, which show the basic parameter value, including height, width and its context materials etc. We use *Column* as an example, which clearly describes how building rules can be defined in the ERI buildings.

- *Column* numeric values: Depth: 600, Width: 400, Material: Concrete - Cast In Situ.
- Relationship: *Column* has to attach on floor/roof to form a joint, when the height of floor changed, the height of columns must be changed as well.
- Graphic parameter: If any parameter of an object is changed, respective parameter of all associated objects will also change as well.

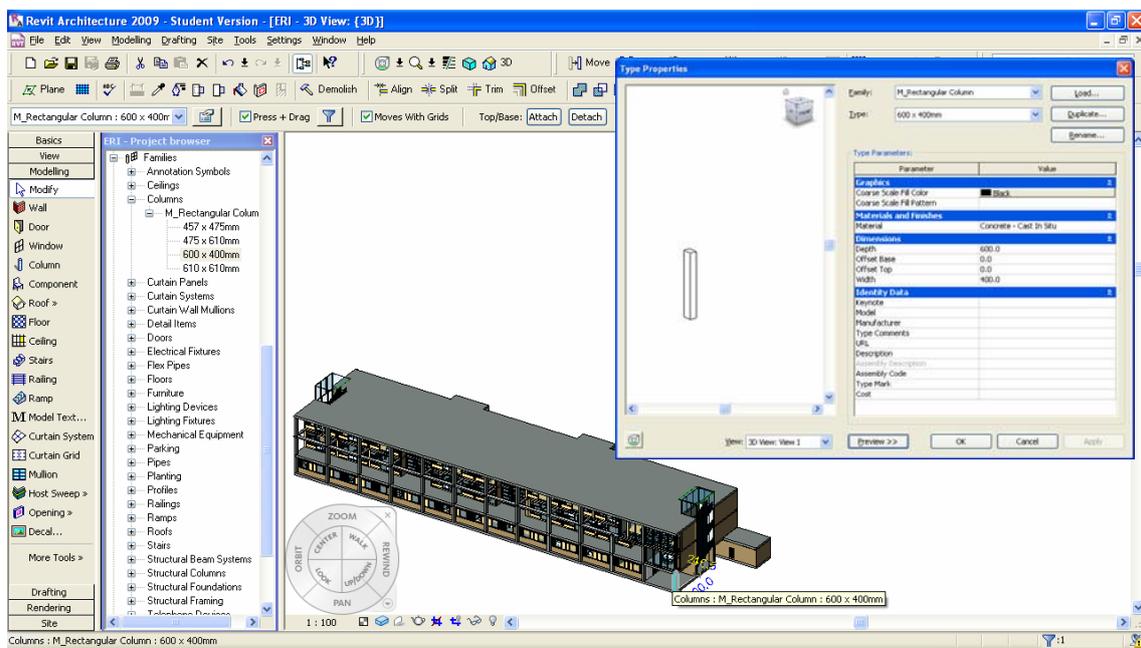


Fig.3: Define building parameters using *Revit Parametric Components* („Revit Architecture“).

5 Collaborative Design

The purpose of *Collaborative Design* is to allow conflicts and constraints to become visible immediately during design and so to allow correction of said discrepancies at the time when they become evident. Fortunately, there are tools available at present which integrate *Parametric Modelling* with collaborative design. These tools enable trained individuals to create models which abide by all the necessary constraints and which are practical in real world construction.

„From the late 1990s, globalization and keener competition have propelled more business changes. Wider collaboration across enterprise boundaries and industry spectrum are viewed as the catalyst for future business growth and profitability. To meet the requirement, R&D of collaborative engineering is towards supporting enterprise collaboration, with which collaborative activities are enabled not only among multidisciplinary product development teams within the same company, but also across the boundaries of companies with more active involvement of customers and different tiers of suppliers“ [10].

For the purpose of this paper, the finer details of *Collaborative Design* will be discussed first: These are the practical points which were experienced as part of a global collaborative design project. In collaborative design, the key action is to test all purposed design tools interoperability. Many tools boast export and import facilities from a variety of other tools, but the format of the export/import may not be to the necessary standard and this can result in extra work and loss of cohesion. For example, some common problems when importing parametrically designed models are: Loss of properties („Revit“ to IES), Excess detail/Loss of Detail (2-D „AutoCAD“ to „Revit“), Zero Coordinate Point.

By testing the specified software to be used for the collaborative design purpose, one can highlight possible problems which will be encountered, and therefore evaluate whether it is advisable to use the software tool in question.

The next step is to set out the method of construction for the project, i.e. it is important to decide on the breakdown of the project before any design work is carried out. For example, when using the „Revit“ design tools, one will create a number of levels. The structural tool will have levels created in order to design the structural members and the MEP tool will have levels for ducts, pipes, cables etc. In collaborative design, it is essential to align these levels and ensure that the shell of the project integrates with these interior system levels. For example, interior walls which are not supporting loading may

not be extending all the way to the above floor; they more than likely will only extend as far as the plenum level. Points like this must be shared with the whole team before collaborative design begins.

The most important reason to use *Parametric Modelling* with *Collaborative Design* is due to the changing nature of all design products. It is very unlikely that a design project will maintain the same brief throughout its life span. In the process of product development, designers often have limited knowledge and information to accomplish product design tasks, while product requirements are sometimes nondeterministic. These changes often take place, and affect many parts and components of products due to the constraints among them. Furthermore, designers are usually geometrically distributed, letting the right designer get the necessary design change information at the right time may not be easy. Also software tools providing an effective and purposeful coordination support through analyzing dependencies among design tasks will definitely increase the coordination efficiency [11]. This referenced paper also outlines the four major types of collaborative design. They are as follows in fig. 4. For the context of this paper and due to the experience incurred, *Collaborative Design* at different places through the network will be focused on.

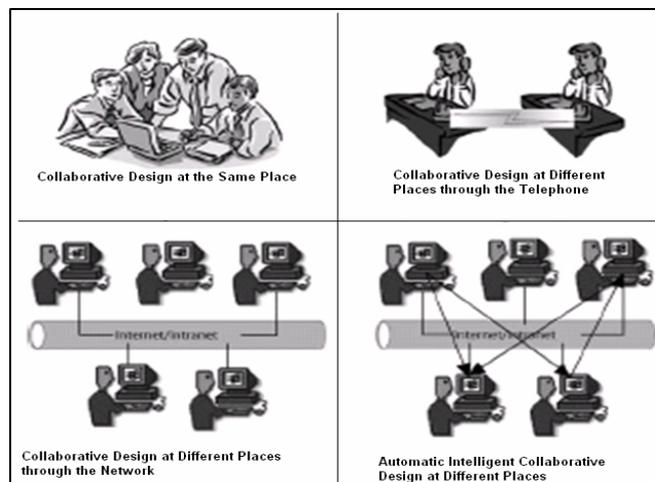


Fig. 4: Four Types of *Collaborative Design*.

Most collaborative design projects at present will use a specialized program to combine the different design tools work on a regular basis, weekly or twice weekly. There are a few tools available at present, such as „Navisworks“. This type of software allows the collaborative design team to carry out a number of processes. „Autodesk Navisworks

Manage“ software is a review solution used by design and construction management. „Navisworks Manage“ combines fault-finding analysis and interference management together with 4-D project schedule simulation. „Autodesk Navisworks Simulate“ software offers replication of design intent and modelling of 4-D construction schedules, which enables pre-visualization of construction projects. „Autodesk Navisworks Review“ software enables whole-project real-time visualization and review of various file formats regardless of file size. Together these software packages enable one to virtually experience in a visual context a project before physical work begins and so in fact enables a more complete evaluation and verification of the materials and textures appropriate to ones intended design.

6 Library Behaviour

In *Collaborative Design*, it is very important for different parties to have the ability to adjust design details while at the same time maintaining the integrity of the design. By using parametric libraries it is possible to assign design rules to components and at the same time allow the components properties to vary as required without contradicting these rules.

Libraries are used in parametric modelling software whose main purpose is to design built artefacts. These libraries consist of groups of families which can be defined as a collection of objects, called types. A family groups elements with a common set of parameters, identical use, and similar graphical representation. Different types within a family may have different values of some or all parameters, but the set of parameters - their names and their meaning - are the same. Types are then defined as members of families. Each type has specific parameters that are constant for all instances of the type that exist in a model; these are *Type Parameters*. Types also have *Instance Parameters*, which may vary for each instance of a type in the model. There are many different pre defined families created in Revit. It is also possible to create your own family and types and therefore create individualized parametric details to the components [12].

These families can carry relationships not only with regard to their own properties but to their surroundings also. For example, if you create a desk in a room and it must have specific geometry that is related to the overall dimensions of the room, when the room is exported to another program and the room size is changed will the geometry of the desk also change? The use of this type of design ideally should shorten the time span spent on detailed modelling of built artefact.

7 Conclusions

Parametric Modelling has the ability to support collaborative design in a way which will facilitate *Building Information Modeling* and so enable advancement in the area of ICT. *Parametric Modelling* is and will continue to reduce the time and cost involved with constantly changing project descriptions.

Bibliography

- [1] C. Eastman. *Building Product Models. Computer Environments Supporting Design and Construction*. 1999.
- [2] Y.-S. Jeong, C.M. Eastman, R.Sacks, and I.Kaner. *Benchmark Tests for BIM Data Exchanges of Precast Concrete*. In: *Automation in Construction*. 2009.
- [3] IAI – International Alliance for Interoperability. *IAI International Homepage*. <http://www.iai-tech.org>.
- [4] M. Nour, K. Beucke. *IFC supported Distributed, Dynamic and Extendible Construction Products Information Models ECPPM*. 2004.
- [5] R. Howard, B.C. Bjork. *Building Information Modelling – Experts’ View on Standardisation and Industry Deployment*. In: *Advanced Engineering Informatics* 22. 2008. p. 271-280.
- [6] D. Eggink, M. D. Gross, and E. Do. *Smart object. Constraints and Behaviors in a 3D Design Environment*. *Architectural Information Management: 19th eCAADe Conference Proceedings, Helsinki, Finland, Helsinki University of Technology (HUT)*. 2001.
- [7] J. Moneder. *Parametric Design. A Review and some Experiences*. In: *Automation in Construction* 9/2000. p. 369–377.
- [8] J. P. LoFaso, W. Creek . *Parametric Modelling Using Inventor*. 2007.
- [9] N. C. Katz, S. Owings. *Parametric Modelling in AutoCAD*. 2008.
- [10] W. Li, W. Shen: *Collaborative Engineering: From Concurrent Engineering to Enterprise Collaboration*. In: *Computers in Industry*. 2009.
- [11] Y. Li, et al. *Design and Implementation of a Process-Oriented Intelligent Collaborative Product Design System*. In: *Computers in Industry*. 2003.
- [12] Autodesk *Revit Architecture Help Menu*. *Revit Architecture Package*. 2009.

Ein deklarativer Ansatz zur domänenübergreifenden Modellanalyse

Schnittstellen für den Einsatz domänenspezifischer Sprachen

Ulrich Hartmann

Universität Karlsruhe, Institut für Industrielle Bauproduktion, 76128 Karlsruhe, Deutschland, E-mail: ulrich.hartmann@ifib.uni-Karlsruhe.de, Telefon: +49(0)721/6082166

Kurzfassung

Die Analyse digitaler Modelle erfordert eingehende Kenntnis der Modelsyntax und Semantik sowie der technischen Spezifikation des Modellschemas und seiner internen Repräsentation im Rechner. Die vorbereitenden Arbeiten zur Durchführung von Analysen mit Hilfe digitaler Modelle können daher leicht umfangreicher werden als die Analyse selbst. Das gleichzeitige Erwerben von Fachwissen zur Bereitstellung der technischen Infrastruktur und Expertenwissen zur Durchführung von Analysen ist daher häufig von Einzelpersonen nicht zu leisten. Dagegen ist ein Produktivitätszuwachs zu erwarten, falls es gelingt, den konzeptionellen Teil der Analyse von der technischen Implementierung der digitalen Modellanalyse zu trennen. In dem hier vorgestellten Konzept soll gezeigt werden, wie Experten Zusammenhänge und Elemente einer Analyse in ihrer eigenen domänenspezifischen Sprache ausdrücken können, während das Mapping zwischen konzeptioneller und technischer Sicht auf das System in einer generalisierenden und erweiterbarem Art und Weise gekapselt werden kann. Hierzu werden „State-of-the-Art“-Software-Konzepte eingesetzt.

Stichworte

Domänenübergreifende Analyse, domain-specific Language, abstrakter Syntaxbaum, Besuchermuster, Fabrikmuster, Interpreter

1 Einleitung

1.1 Motivation

Wie bereits erwähnt, kann der Zugriff auf Daten eines digitalen Modells schnell sehr komplex werden. Obwohl Komplexität – sofern gut dokumentiert – nicht das Hauptproblem darstellt, erfordert der Zugriff auf Strukturen und Werte von Modellinstanzen oft internes Wissen über allgemein verwendete „good practices“ über den Einsatz von Datenstrukturen und die Existenz von alternativen Konstrukten. Trotz der öffentlichen Verfügbarkeit des Modellschemas reicht dieses oft zur effizienten und eindeutigen Arbeit mit Modelldaten nicht aus.

Einige allgemein verwendete Modelltypen (zum Beispiel IFC) haben ihren Fokus in erster Linie auf der Produktbeschreibung und sind damit für den Datenaustausch gut geeignet. Die Datenanalyse dagegen wird oft durch die Ausprägung der Datenstrukturen erschwert. Beispielsweise weist IFC Entitäten Eigenschaften über eine Kaskade von mindestens vier Indirektionen zu, bevor der gesuchte Wert schließlich erreicht wird. Während diese lose Kopplung einen sehr eleganten und flexiblen Mechanismus der Zuweisung von Eigenschaften zu Elementen darstellt, ist er für die Datenrecherche unpraktisch. Dieses ist strukturimmanent und von der eingesetzten Persistenztechnologie unabhängig. Sowohl eine relationale als auch eine objektorientierte Datenmodellierung muss die tiefen Interaktionsbäume auflösen. Dadurch werden *table joins* oder äquivalente OO-Mengenoperationen nötig. Abhängig vom zu Grunde liegenden Problem mag dieses entweder durch Konvertierung der logischen Modellstruktur in eine technische Datenbankstruktur gelöst werden, um den Datenzugriff zu optimieren (Performance, Komplexität) oder es führt zu komplexen Anfrageausdrücken. Applikationen, die auf diesen Datenbankstrukturen statt auf nativen Modellstrukturen aufbauen müssen, haben es daher schwerer, domänenspezifische Logik zu implementieren, die per Definition die nativen domänenspezifischen Konzepte verwendet. Die zweite Lösung, komplexe Anfragen, ist dagegen schwer zu warten und fehleranfällig mit negativen Folgen auf die Robustheit der Applikation.

1.2 Vision

Die interne digitale Repräsentation eines domänenspezifischen Modells ist das Resultat der Anwendung von Methoden der Informatik auf die Konzepte der entsprechenden Fachdomäne. Doch obwohl das Ergebnis das Verständnis der Fachdomänen-Konzepte

widerspiegelt, tragen Syntax und Semantik des digitalen Modells häufig das Erscheinungsbild der Informationswissenschaften, nicht der ursprünglichen Fachdomäne. Ein Ansatz, der diese sehr wertvollen Computermodelle als Basis verwendet und zugleich das Ausdrücken analytischer Zusammenhänge in einer domänenspezifischen Fachsprache erlaubt, würde die Fähigkeit von Fachdomänen-Experten stärken, Fachdomänenmodelle zu verwenden, ohne dabei gleichzeitig ein Softwarespezialist sein zu müssen. Beispielsweise muss der folgende Indirektionspfad zum Auffinden der Grundfläche aller Büroräume in einem IFC-Modell verfolgt werden:

```
IfcSpace→  
  IfcRelDefinesByProperty→  
    IfcSpaceProgram→  
      IfcPropertySingleValue→  
        IfcLabel:OccupancyType == "Büro"  
    ...
```

Ein Fachdomänenexperte würde dagegen vorzugsweise den Ausdruck "gesamte Grundfläche aller Büroräume" verwenden, und damit die Summe aller Grundflächen aller Räume vom Typ 'Büro' im entsprechenden Geschoss des entsprechenden Gebäudes meinen. Statt auszudrücken wie die Werte in der entsprechenden Syntax des digitalen Modells zu beschaffen sind, würde sich ein deklarative Ausdruck nicht um das *wie* kümmern, stattdessen würde es sich auf das *was* konzentrieren. Wie kann das erreicht werden? Dieser Artikel versucht, einen konzeptionellen und technischen Weg darzustellen, mit dessen Hilfe die Belange von Domänenexperten und technischen Experten gekapselt werden können, mit dem Ziel einer besseren Nutzbarkeit sowie der Wiederverwendbarkeit von Analysekonzepten und technischen Komponenten. An einem Beispiel soll das Prinzip erläutert werden.

1.3 Nutzen

Die Trennung von Fachkonzepten und technischen Konzepten fördert nicht nur die Nutzbarkeit digitaler Modelle durch Domänenexperten, die Möglichkeit der Definition problemzentrierter Namensräume kann darüber hinaus eine domänenübergreifende Zusammenarbeit von Analyseexperten aus verschiedensten Fachbereichen fördern. Eine Modellsicht, die vertraute Strukturen und Konzepte wiedergibt, kann auch dann zur Verfügung gestellt werden, wenn die Analyse mehr als nur eine Fachdomäne betrifft. Die Verknüpfungsebene zwischen Expertensicht und technischer Sicht muss dabei an die wechselnden Anforderungen aus der Expertenebene anpassbar sein. Geeignete

Schnittstellen reduzieren dabei die Komplexität digitaler Modelle und fördern die Erstellung robuster und wieder verwendbarer Applikationskomponenten.

2 Beispielszenario

Die Stadtverwaltung von Stadt x plant eine neue Buslinie, um den öffentlichen Nahverkehr zu verbessern: Die Route soll Geschäftsbezirke und Wohngebiete verbinden und so eine Alternative zur Benutzung des Autos bieten. Der Berufsverkehr soll dadurch deutlich verringert werden.

Datenmaterial

Das kommunale Katastersystem, häufig im Kern ein GIS-System, beinhaltet den Stadtplan mit Liegenschafts- und Straßeninformationen. Jeder Liegenschaftseintrag hat einen Verweis auf ein elektronisches Gebäudedokument, das ein IFC-basiertes Modell des Gebäudes enthält - zugegeben eine bis heute optimistische Annahme, die es gegebenenfalls notwendig macht, ein alternatives Instrument zu nutzen. Zur Darstellung des Konzepts ist die technische Spezifikation jedoch nicht relevant.

Analysealgorithmus

Zur Routenoptimierung müssen unterschiedliche Routenführungen verglichen werden. Das Einzugsgebiet der optimalen Route erfasst die meisten Pendler am Morgen und bringt sie so nah wie möglich an ihren Arbeitsplatz und sinngemäß umgekehrt am Abend. Zwar wäre es theoretisch möglich, den Arbeits- bzw. Wohnort jeder Einzelperson zu berücksichtigen, es erscheint zur Optimierung der Linienführung jedoch statistisch tragfähig genug, die jeweiligen Einzugsgebiete der verbundenen Zusteigebeziehungsweise Aussteigezonen zu berücksichtigen. Die Grundflächen aller Gebäude im Einzugsgebiet, aufgeteilt nach Nutzungsart wie „Büro“ oder „Privat“, werden aufsummiert. In diesem einfachen Beispiel lassen wir weitere Überlegungen wie Routenlänge, Fahrzeit, Umsteigevorgänge usw. außer Betracht: Hier soll kein komplexes Analysemodell für die Optimierung urbanen Verkehrsflusses vorgestellt werden, der Fokus liegt auf der domänenübergreifenden Analyse: Es sollen die Vorzüge, die eine Abstraktionsebene zwischen einer Software-zentrischen und einer fachdomänenspezifischen Sicht bieten kann, aufgezeigt werden. Nahezu dieselben Algorithmen können auch zur optimalen Positionierung von Blockheizkraftwerken,

Bibliotheken oder Verkaufsfilialen im Stadtgebiet eingesetzt werden. Gleichmaßen wichtig ist die Aufteilung der Belange in zwei unabhängige physikalische Ebenen: Diese unterstützt nicht nur die Wiederverwendung von Konzepten, sondern auch von Applikationskomponenten.

Grundannahmen

- Die Berechnung des Einzugsgebiets erfolgt unter der Annahme einer maximal zumutbaren Gehstrecke. Jenseits dieser Gehstrecke ist die Benutzung der Buslinie nicht mehr attraktiv.
- Die Schätzung des Fahrgastaufkommens wird auf Grundlage der ermittelten Grundflächen von Wohn- bzw. Büroräumen vorgenommen.

Austausch von Algorithmen

Als erste grobe Annahme könnte die Berechnung des Einzugsgebietes mittels der kürzesten Verbindung zwischen Gebäude und Buslinie (Luftlinie) ermittelt werden. Gebäude innerhalb dieses Maximalabstandes um die Route gehören zum Einzugsgebiet.

In einer zutreffenderen (aber auch zeitintensiveren) Berechnung könnte die exakte Gehstrecke zwischen Gebäuden und Bus-Route durch Nutzung externer Navigationsdienste (beispielsweise *Google Maps*) ermittelt werden. Durch Laden entsprechender Komponenten zur Laufzeit der Analyse-Applikation kann Fachlogik dynamisch eingebunden werden. Dadurch können unterschiedliche Algorithmen deklarativ hinzugezogen bzw. gewechselt werden.

3 Deklarative Analyse-Umgebung

3.1 Entwurfsprinzipien und –Anforderungen

Eine Systemlösung muss folgende Anforderungen erfüllen:

- Trennung von konzeptioneller und technischer Ebene
- Erweiterbarkeit beider Ebenen
- Konfigurierbare Unterstützung domänenspezifischer Sprachen (DSL¹)

¹ DSL – Domain-specific Language

- Unabhängigkeit vom zu Grunde liegenden Fachdomänen-Modell
- Unabhängigkeit vom zu Grunde liegenden Daten-Modell
- Unterstützung des objektorientierten und relationalen Paradigmas
- Nutzung von Mainstream-Software-Technologie
- Gleichzeitige Unterstützung unterschiedlicher Modelltypen

3.2 Systemarchitektur

Zur Trennung der domänenspezifischen Sprachebene (*DSL-Layer*) von der Daten-Management-Ebene ist eine Abstraktionsschicht zwischen beiden Ebenen erforderlich. Die in der DSL-Ebene verwendete Sprache kann als eine Zwischenstufe angesehen werden, die weiterer Interpretation bedarf. Der erste Schritt zum Bau eines Interpreters ist die Definition der zu interpretierenden Sprache. Diese Definition wird häufig in der EBNF-Notation² – einer Sprache zur Beschreibung von Sprachen – vorgenommen. Diese Arbeit sollte von Fachdomänenexperten und Informatikern gemeinsam durchgeführt werden. Dabei werden Schlüsselworte, Operatoren und Funktionen definiert, die in der domänenspezifischen Sprache verwendet werden, zum Beispiel:

Räume → Nutzungsart (*Büro*) → Grundfläche

oder alternativ

Grundfläche *VON_ALLEN* Räume *MIT* Nutzungsart *Büro*

Scheinbar (virtuell) wird dem Anwender hier ein Raumelement mit den Attributen Nutzungsart und Grundfläche angeboten, das es so im zu Grunde liegenden digitalen Modell gar nicht gibt. Die Wahl der Schlüsselworte obliegt allein den Domänenexperten. In ersten Beispiel oben wird der Pfeil „→“ als De-Referenzierungsoperator verwendet. Intern würde er in eine Recherche nach Raumelementen mit dem Attributwert Nutzungsart gleich *Büro* umgesetzt. Das zweite Beispiel nutzt eine andere Syntax mit identischer Bedeutung. Unabhängig vom Entwurf der domänenspezifischen Sprache liefern beide Ausdrücke nach ihrer Interpretierung die gleiche Liste von Werten der Grundflächen aller zutreffenden Räume. In diesem einfachen Beispiel enthält die domänenspezifische Sprache die Operatoren *VON_ALLEN* und *MIT* die Schlüsselworte

² Erweiterte Backus-Naur Form, ISO Standard 14977

Grundfläche, Räume, Nutzungsart und den Parameter *Büro* als passenden Attributwert für *Nutzungsart*. Die Freiheit bei der Namenswahl von Operatoren und Schlüsselworten beim Entwurf der domänenspezifischen Sprache wird hier deutlich.

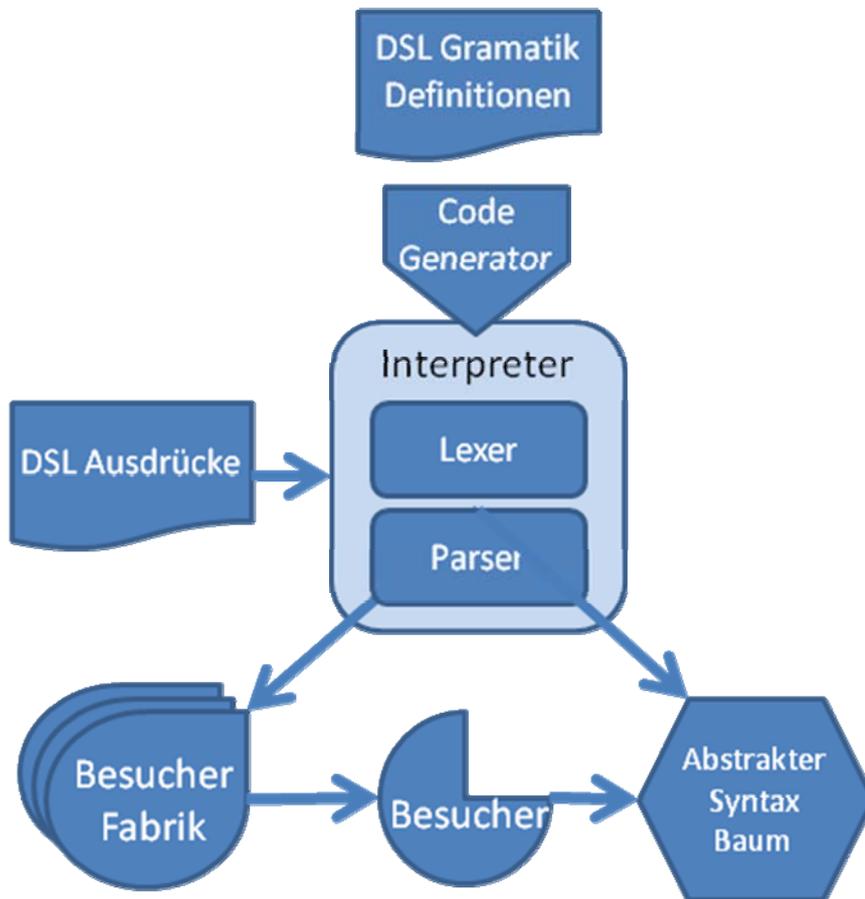


Abb. 1: DSL-Interpreter.

DSLs müssen durch einen Interpreter ausgewertet werden (oder durch einen Compiler in Maschinencode übersetzt werden). Ein Interpreter ist ein Programm, das in der Lage ist dynamisch Kommandos in einer vordefinierten Sprache auszuführen, in diesem Fall einer DSL. Ein mathematischer Formelauswerter ermöglicht beispielsweise die dynamische Eingabe und Auswertung von Formeln, während ein Model-Analyse-Interpreter in der Lage sein sollte, Ausdrücke auszuwerten, die die Konzepte und Eigenschaften der jeweiligen Fachdomäne wiedergeben. Er muss in der Lage sein, spezifizierte

Objektmengen temporär zur weiteren Bearbeitung abzulegen. Die Eindeutigkeit einer DSL muss gewährleistet sein. DSLs sind jedoch bewusst nicht als Turing-vollständige Sprachen ausgelegt, wie dieses bei universellen Sprachen (GPL³) der Fall ist.

Die Erstellung eines Interpreters kann weitgehend durch Tools unterstützt werden. Bekanntlich wird unter lexikalischer Analyse der Prozess der Konvertierung einer Folge von Zeichen in eine Folge von Merkmalen (*tokens*) verstanden. Programme, die eine lexikalische Analyse durchführen, werden *lexikalischer Scanner* oder kurz *Lexer* genannt. Tokens besitzen eine durch Grammatik gegebene Bedeutung (Datentyp, Schlüsselwort, Funktion, etc.). Ein Parser kann anschließend einen abstrakten Syntaxbaum (AST⁴) aufstellen, der die Hierarchie zwischen den Tokens wiedergibt. Der abstrakte Syntaxbaum spiegelt die Syntax wieder, mit der die DSL definiert wurde.

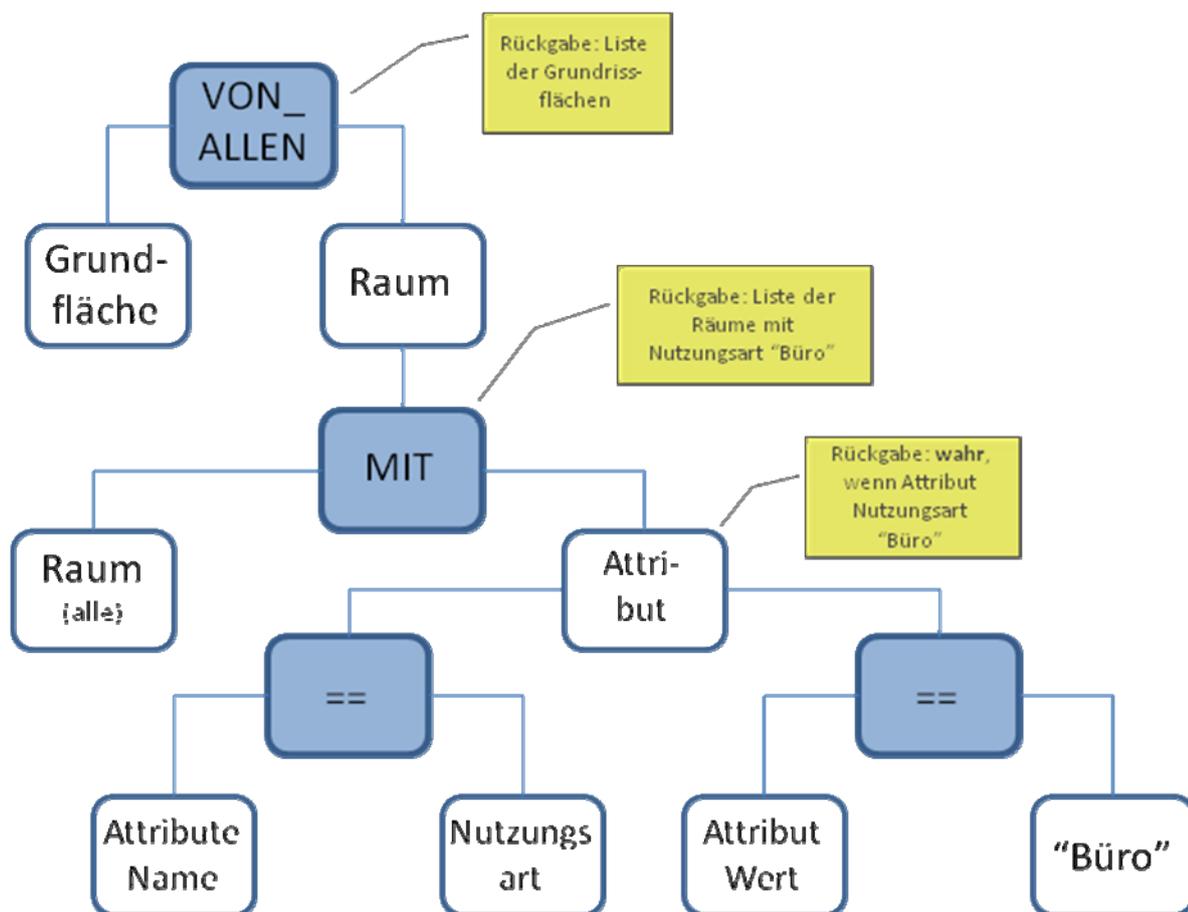


Abb. 2: AST-Instanz des Beispielausdrucks.

³ GPL – general purpose language

⁴ AST – abstract syntax tree

Um die Auswertung des Syntaxbaums von der Model-Logik zu trennen, nutzen wir das Entwurfsmuster des Visitor-Patterns (Besuchermuster) nach [4].

Besucherobjekte können separat in modularer Weise entwickelt werden. Sie stellen die Inhalte zum Hinzufügen domänenspezifischer Fachlogik durch Konfiguration bereit – dadurch kann Fachlogik zur Analyse nach Bedarf hinzugefügt werden. Es existiert eine Vielzahl von Tools zur halbautomatischen Erzeugung von Lexern und Parsern. Sie setzen EBNF-Notationen in Programm-Code um. Auf das genaue Verfahren zur Erzeugung eines Interpreters kann im Rahmen dieses Aufsatzes jedoch nicht näher eingegangen werden [2, 11].

Verbinden von Syntax und Semantik

Eine Hauptmotivation zur Nutzung von DSLs liegt darin, die technische Komplexität zu kapseln und dem Domänenexperten die Nutzung seiner eigenen Sprache zu ermöglichen. Der Interpreter kann die analytischen Ausdrücke einer DSL traversieren und „verstehen“. Die Semantik ist dabei innerhalb des Interpreters implementiert. Trifft der Interpreter einen Knoten im abstrakten Syntaxbaum an, ruft er die assoziierte Funktion auf und versorgt sie ggfs. mit den relevanten Daten als Parameter. Wichtig ist die Existenz einer wohldefinierten Relation zwischen den Namenskonventionen im abstrakten Syntaxbaum und im Besucherobjekt. Dieses wird durch die Verwendung derselben EBNF-Notation für den Lexer und die Implementierung des Besucherobjekts sichergestellt.

Im Ausdruck $a + b$ hat jedermann eine unmittelbare Vorstellung des plus-Zeichens. Bei näherem Hinsehen stellt sich diese Sicherheit jedoch als unbegründet heraus. Offensichtlich hängt es vom Datentyp von ‚a‘ und ‚b‘ ab, welche Operation ausgeführt werden muss. Beispielsweise unterscheidet sich eine Matrixoperation ‚a + b‘ deutlich von einer einfach Ganzzahladdition. Einige Programmiersprachen bieten einen Mechanismus zur Überdefinition existierender Operatoren an (z. B. *Operator Overloading* in C++ und C#), um Operatoren in unterschiedlichen Kontexten wieder zu verwenden. In unserem Beispiel wird ein Besucherobjekt für einen spezifischen Kontext entwickelt. Dieser Kontext ist durch die Fachdomäne gegeben und wird repräsentiert durch das zu Grunde liegende Modellschema, beispielsweise IFC⁵. Deshalb wird der DSL-Ausdruck *Räume MIT Nutzungsart ‚Büro‘* zwar immer in denselben Syntaxbaum transferiert, aber die Implementierung des auswertenden Besucherobjekts hängt vom Schema des verwendeten

⁵ IFC – Industry Foundation Classes, ISO Standard 16739 für Produktmodelle im Bauwesen

Modeltyps ab. So wird beispielsweise in einem cityGML-Modell⁶ der Standort eines Gebäudes formal anders ausgedrückt als in einem IFC-Modell. Deshalb sucht der Algorithmus zur Berechnung der Distanz zwischen Gebäude und einer gegebenen Route (Polylinie) nach unterschiedlichen Entitäten im Modell und löst Verweise unterschiedlich auf, je nach den Charakteristika des jeweiligen Modelltypen.

In unserem Fall repräsentiert der DSL-Interpreter die Sprache einer bestimmten Analyse, während die Besucherobjekt-Implementierung die Zugriffsmethoden auf das Domänen-Modell kapselt. Ein DSL-Interpreter kann daher mit unterschiedlichen Besucherobjekttypen zusammenarbeiten. Dabei repräsentiert jeder dieser Typen die Semantik einer konkreten DSL.

Dynamische Einbindung von Methoden

Bevor das Beispiel weiter verfolgt werden kann, sind noch zwei Probleme zu lösen:

- Wie soll eine domänenspezifische Syntax (AST) dynamisch mit einer domänenmodellspezifischen Semantik assoziiert werden?
- Wie können Besucherobjekte dynamisch zur Laufzeit hinzugefügt werden?

Ein anderes Entwurfsmuster kann hier vorteilhaft eingesetzt werden: das Muster der „abstrakten Fabrik“ [4]. In unserem Fall handelt es sich um eine Fabrik für Besucherobjekte.

Alles, was wir über ein konkretes Besucherobjekt (Instanz) wissen müssen, ist die Basisklasse, von der es abgeleitet wurde. Der konkrete Typ ist (und bleibt) für die aufrufende Applikation dabei unbekannt.

Nach Gamma [4] verbirgt eine Fabrik den konkreten Typ eines erzeugten Objekts gegenüber der Anwendung. Die Anwendung erzeugt das Objekt indirekt über die Fabrik, ohne seinen Typ zu kennen. Unser Ziel hier ist, Funktionalität per Konfiguration hinzufügen zu können. Daher muss das Fabrikobjekt selbst einen dynamischen Mechanismus besitzen, um neue Typen von Besucherobjekten instanziierten zu können. Dazu muss die Fabrik wissen, wo der ausführbare Code zu finden ist (z.B. in welcher .Net-Assembly), wie die Klasse des neuen Besucherobjekts benannt wurde und wie der interne Name der Besucherklasse lautet. Der interne Name wird zur Führung einer internen Liste verfügbarer Typen benötigt.

⁶ cityGML – ISO Standard zur Repräsentation urbaner 3D-Objekte

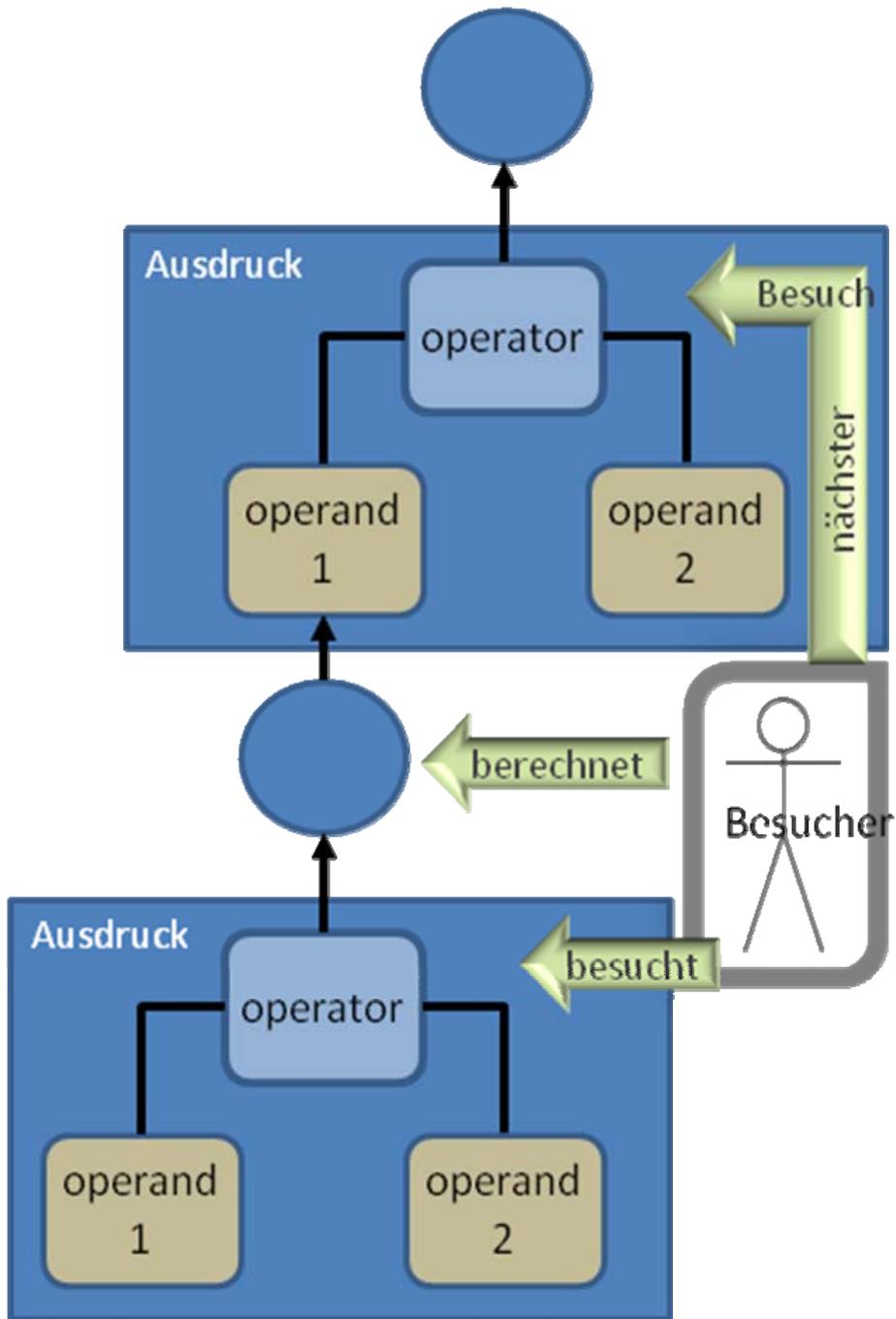


Abb. 3: Besucherobjekt traversiert einen AST.

All diese Informationen können in einer externen Konfigurationsdatei vorgehalten werden, die zur Laufzeit vom Fabrikobjekt gelesen wird. Das Fabrikobjekt kann daraufhin alle referenzierten Code-Assemblies laden und nach Bedarf die gewünschten Besucherobjekte instanziiieren (siehe folgenden C# Code-Ausschnitt).

```

public static object CreateFactory(string virtualName)
{
    string path = "../VisitorFactory.config";
    XmlDocument doc = new XmlDocument();
    doc.Load(path);
    XmlNode factoriesNode = doc.SelectSingleNode("//Factories");
    foreach (XmlNode factoryNode in factoriesNode.ChildNodes)
    {
        if (virtualName.Equals(
            factoryNode.Attributes["virtualName"].Value))
        {
            String assemblyAndTypeName = factoryNode.Attributes["type"].Value;
            return CreateInstance(assemblyAndTypeName);
        }
    }
    ...
}

```

Die interne Liste besitzt einen Eintrag zur Domänenzugehörigkeit eines bestimmten Besucherobjekts. Dieses versetzt den Interpreter in die Lage, die für die jeweilige Domäne zuständige Fabrik aufzurufen, um das geforderte Besucherobjekt zu instanziiieren.

Zur bequemen Verarbeitung wird als Format für die Konfigurationsdatei XML gewählt (siehe folgendes XML-Beispiel):

```

<configuration>
  <Factories>
    <Factory virtualName="OccupancyAnalysis"
      type="Factories.OccupancyFactory,AssemblyName1"      domaineName="IFC"
      subDomaine="3.0"/>
    <Factory virtualName="BusLineAnalysis" type="Factories.
      BusLineFactory2, AssemblyName2" domaineName="CityGML"
      subDomaine="1.0"/>
  </Factories>
</configuration>

```

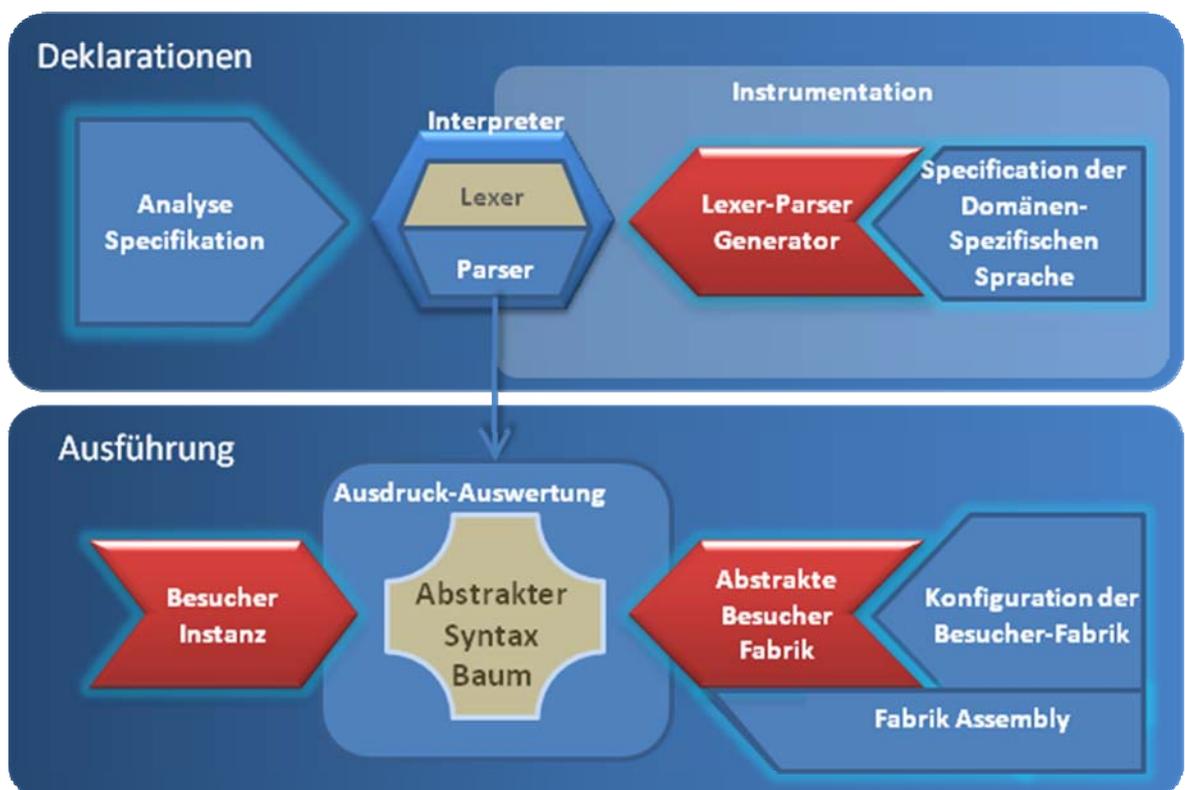


Abb. 4: Analyse-Deklarationen, Instrumentierung und Ausführung.

Zur Laufzeit kann der Interpreter nun die korrekte Visitor-Objektfabrik aufrufen, wenn er den vollständig qualifizierten Funktionsnamen (z.B. Domänenname + ‚.‘ +

FunktionsName) im AST antrifft. Die Fabrik erzeugt nun das Besucherobjekt, das zur Auswertung des betreffenden Knotens im AST herangezogen wird.

3.3 Technologien und Hilfsmittel

ANTLR, *ANother Tool for Language Recognition*, ist ein Sprachen-Werkzeug zur Erzeugung von Interpretern, Compilern und Übersetzern aus grammatikalischen Beschreibungen in einer Vielzahl von Programmiersprachen. Der generierte Code für Lexer, Parser und ähnliches kann von Anwendungen verwendet werden. ANTLR erwartet EBNF-Notationen als Input zur Code-Generierung. Es stellt ausgezeichnete Unterstützung zur Erzeugung von Bäumen, Traversierung, Übersetzung und Fehlerbehandlung bereit [2].

Oslo ist der Code-Name für Microsofts nächste Generation von Entwicklungsplattformen. *Oslo* nutzt domänenspezifische Modelle, Sprachen und Werkzeuge. Es fördert den Gedanken der modell-getriebenen Methodik und stellt eine Werkzeugpalette zur Erzeugung von DSLs bereit. Es wurden zwei Modellierungssprachen, *MGrammar* und *MSchema*, sowie das Datenformat *MGraph* entwickelt. Der erweiterbare Editor *Intellipad* unterstützt die Entwicklung von Schemas und Grammatiken [11].

Die Programmiersprache C#⁷ besitzt eine in die Sprache integrierte Unterstützung für die Durchführung von Abfragen mit derselben formalen Abfragesprache, unabhängig vom Typ der Datenquelle⁸. Nach [5] ist die seit C# Version 3.0 zur Verfügung stehende Funktionalität (LINQ) annähernd identisch mit der von OCL⁹. Über seine Plattformunabhängigkeit hinaus bestehen die Hauptvorteile von OCL gegenüber traditionellen Programmiersprachen in der deklarativen Natur der Sprache, seiner mächtigen Navigationsfunktionalität durch die Verwendung von Iteratoren und die Verfügbarkeit von Tupeln. LINQ / OCL ist ein mächtiges Instrument zur Spezifikation einer Objektmenge in deklarativer Art und Weise. Die Transformation zwischen deklarativen Ausdrücken einer DSL und der entsprechenden Auswertung auf der semantischen Ebene kann daher Hand in Hand ohne Paradigmenwechsel durchgeführt werden.

⁷ Standard ECMA-334 and ISO/IEC 23270

⁸ LINQ – Language INtegrated Query

⁹ OMG Standard

Reflektionsorientierte Programmierung¹⁰ erweitert das objektorientierte Paradigma um die Fähigkeit zur Selbstuntersuchung, Selbst-Modifikation und Selbst-Replikation. Das Hauptgewicht der reflektionsorientierten Programmierung liegt jedoch auf der dynamischen Programmmodifikation, die zur Laufzeit ermittelt und durchgeführt werden kann. Reflektion wird in der Besucherfabrik zur Typvalidierung geladener Besucherobjekte und zur Ableitung des Datentyps durch den Interpreter verwendet.

4 Anwendung

Die Analyseplattform ist nun mit allen wesentlichen Elementen bestückt, wir können nun mit unserem Beispiel *Streckenführung einer neuen Buslinie* fortfahren. Der Interpreter ist nun in der Lage das folgende Skript auszuführen:

```
modelKA = CityGML.LOAD_MODEL „Karlsruhe“
```

Im Interpreter wird nun das Besucherobjekt für die Domäne CityGML instanziiert, die mit dem Schlüsselwort „LOAD_MODEL“ assoziierte Methode wird mit dem Parameter „Karlsruhe“ aufgerufen, das entsprechende Modell wird instanziiert. Schließlich wird die Modellinstanz der Variablen *modelKA* zugewiesen, aus dem Rückgabewert des Funktionsaufrufs wird der Datentyp *CityGML* abgeleitet. Diese Implementierungsdetails bleiben bewusst vor dem Domänenexperten verborgen, damit er sich auf seine domänenzentrische Sicht voll konzentrieren kann. Anschließend wird der nächste Ausdruck

```
route = LOAD_ROUTE „BUS_LINE_ALT_1“
```

verarbeitet. Hierdurch wird die geometrische Beschreibung der Streckenführung geladen und in der Variablen ‚route‘ gespeichert.

Im nächsten Schritt werden die Objekte für den anschließenden Analyseschritt erzeugt. Dieses könnte auch vollständig innerhalb eines Besucherobjekts ablaufen, z.B. durch eine verknüpfte LINQ-Abfrage („join“) innerhalb des Besucherobjekts, zur Verdeutlichung wird es jedoch hier im Detail gezeigt, um die Abfrage über die zwei Datenquellen der beteiligten Domänen hinweg darzustellen. In einer Schleife über alle Gebäude hinweg

¹⁰ reflektionsgetriebenes Paradigma, auch als *reflective programming* bezeichnet

werden die Gebäudestandorte aus der CityGML-Domäne und die Grundflächen (*Büro* und *Privat*) aus der IFC-Domäne abgefragt. Innerhalb der Schleife werden IFC-Modelle instanziiert und die Werte der entsprechenden Grundflächen abgefragt.

ForEach (cityBuilding in modelKA)

Bemerkung: ‚cityBuilding‘ stammt aus der Domäne cityGML (abgeleitet durch den Interpreter)

ifcBuilding = IFC.LOAD_MODEL cityBuilding

instanziiert das IFC-Gebäudemodell, das im cityGML-Modell referenziert wurde

officeFloor += ifcBuilding.OfficeFloor

verwendet ein Besucherobjekt der IFC-Domäne, um *officeFloor* zu de-referenzieren. Aufeinander folgende Werte werden in der Variablen *officeFloor* aufsummiert

privateFloor += ifcBuilding.PrivateFloor

verwendet ein Besucherobjekt der IFC-Domäne, um *privateFloor* zu de-referenzieren. Aufeinander folgende Werte werden in der Variablen *privateFloor* aufsummiert

location = cityBuilding.Location

nutzt das Besucherobjekt der cityGML-Domäne, um den Gebäudestandort im cityGML-Modell zu de-referenzieren.

buildingList.Add(cityBuilding.ID, location, officeFloor, privateFloor)

Speichert die für die Analyse relevanten Attribute in einer Liste, ein Eintrag pro Gebäude

EndForEach

profile = EMBARKATION_PROFILE(buildingList)

berechnet die zu Zusteige-Profile

STORE_PROFILE(profile)

speichert das berechnete Profil

SHOW_PROFILE(profile)

visualisiert das berechnete Profil

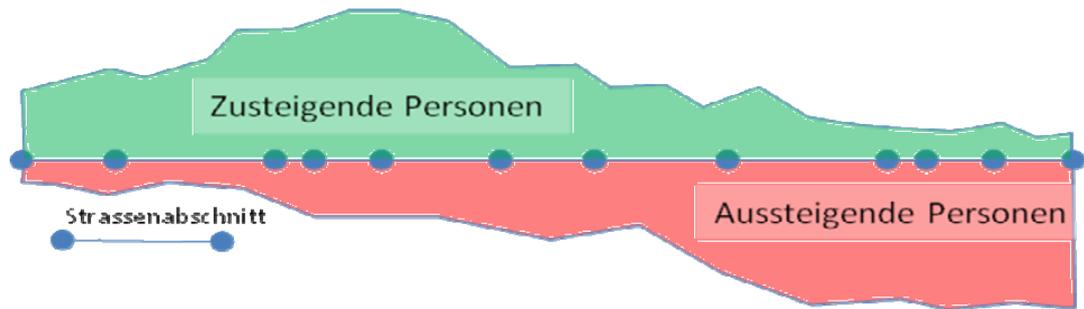


Abb. 1: Profil-Visualisierung (fiktives Beispiel).

Es wird deutlich, dass alternative Streckenführungen auf einfache Weise verglichen werden können, indem das gleiche Skript mit unterschiedlichen Routendaten ausgeführt wird.

Eine Verfeinerung der Ergebnisse durch Austausch der Algorithmen zur Grobabschätzung des Einzugsgebietes könnte jetzt „behind the scenes“ durch Austausch der Verweise auf die Besucherobjekte in der XML-Konfigurationsdatei stattfinden. Anschließend könnte das Skript mit den in die engere Auswahl kommenden Streckenführungen erneut ausgeführt werden.

5 Ergebnis und Ausblick

Leider bleibt bis heute die interne Logik vieler digitaler Modelle in Anwenderhandbüchern oder auch nur in den Köpfen einiger Spezialisten verborgen. Der Nutzen digitaler Modelle steigt mit deren Fähigkeit zur Interaktion mit Domänenexperten in einer effizienten und weniger zeitaufwändigen Art und Weise. Die Kapselung technischer Komplexität durch die Verwendung domänen-spezifischer Sprachen als Abstraktionsebene bietet sich zur effizienten Handhabung von Modellen an.

Der Grad der Komplexität, den eine domänenspezifische Sprache aufweist, kann leicht je nach der spezifischen Granularität, die für die jeweilige Analyse erforderlich ist, skaliert werden. Wiederverwendbare Komponenten können dabei die Modellsemantik und die Modellzugriffe implementieren. Sie dienen dabei der semantischen Ebene als Grundlage, um unterschiedliche DSL-Ebenen aufzusetzen.

Heute beschränken sich die meisten Anwendungen auf die Speicherung und den Austausch digitaler Modelle. Durch die beschriebene Schnittstelle können Applikationen Nutzen ziehen, indem sie vorverarbeitete Daten je nach Anforderung der Domäne vom Modellerhalten können. In diesem Aufsatz sollte gezeigt werden, dass komplexe domänenübergreifende Analysen deklarativ auf Domänen-Expertenebene gehandhabt werden können, wenn geeignete Attraktionen und Hilfsmittel zur Verfügung stehen. Standardtechnologien haben sich in den letzten Jahren außerordentlich weit entwickelt um domänenspezifische Anforderungen abzudecken.

Literaturverzeichnis

- [1] G. Starke. *Effektive Software Architekturen - Ein praktischer Leitfaden*. 2008.
- [2] [ANTLR] ANother Tool for Language Recognition, Framework for Constructing Interpreters, Compilers, etc. from grammatical Descriptions. <http://www.antlr.org>
- [3] T. Denton, E. Jones, S. Srinivasan, K. Owens, and R. Buskens. *NAOMI - An Experimental Platform for Multi-modeling*. In: *Proceedings of MODELS*. 2008. pp. 143–157.
- [4] E. Gamma, Helm, and R. E. Johnson. *Design Patterns. Elements of reusable Object-oriented Software*. 1995.
- [5] D. H. Akehurst, W. G. Howells, M. Scheidgen, and K. McDonald-Maier. *Proceedings of the Workshop Ocl4All. Modeling Systems with OCL at MoDELS 2007. C# 3.0 makes OCL redundant! 2007*.
- [6] A. Hessellund, H. Lochmann. *An integrated View on Modeling with multiple Domain-specific Languages*. *IASTED submission*.
- [7] A. Hessellund. *Domain-specific Multimodeling, Ph.D. Dissertation (Preprint)*. 200.9
- [8] M. Mernik, J. Heering, J., and A. Sloane. *When and how to develop Domain-specific Languages*. *Submitted to ACM Computing Surveys*. 2009.
- [9] S. Mellor, S. Kendall, A. Uhl, and D. Weise. *MDA distilled – Principles of the Model-Driven Architecture*. 2004.
- [10] [OMG_MDA] Object Management Group: Model Driven Architecture. <http://www.omg.org/mda>.
- [11] [Oslo] Microsoft Model-driven Development Platform Pre-Release. <http://msdn.microsoft.com/oslo>

- [12] T. Stahl, M. Völter. *Modellgetriebene Softwareentwicklung. Techniken, Engineering, Management.* 2007.
- [13] J. White, J. H. Hill, S. Tambe, A. Gokhale, D. C. Schmidt, and J. Gray. *Improving Domain-specific Language Reuse through Software Product-Line Configuration Techniques.* Submitted to *IEEE Software Special Issue Domain-Specific Languages and Modeling.* 2009. <http://www.dre.vanderbilt.edu/~jules/white-dslreuse.pdf>

Ein Editor zur Spezifikation, Klassifikation und Kennzeichnung der Bauteile einer baulichen Anlage

Lukas Olbrich

Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Bauinformatik, 13355 Berlin, Deutschland, E-mail: olbrich@mail.bv.tu-berlin.de, Telefon: +49(0)30/31472326

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit werden die theoretischen Grundlagen zur Einführung von Hierarchien bei der Zerlegung einer baulichen Anlage in Bauteile beschrieben. Im Weiteren wird eine formale Methode zur konsistenten, strukturierenden Kennzeichnung der Elemente der Hierarchie nach verschiedenen Gesichtspunkten auf Grundlage der von Huhnt und Enge [5] veröffentlichten Methode zur Strukturierung der Elemente einer Menge beschrieben. Es wird ein Programm vorgestellt, in dem die theoretischen Grundlagen implementiert sind. Das Programm ermöglicht dem Anwender, Elemente der eingeführten Hierarchie mittels grafischer Oberfläche zu spezifizieren und in allen Ebenen einer Hierarchie konsistent zu kennzeichnen.

Stichworte

Modellierung, Hierarchie, Strukturierung, Kennzeichnung

1 Einleitung

Eine bauliche Anlage kann durch Benennung aller Bauteile, aus denen sie besteht, beschrieben werden. Zur Planung der Erstellung einer baulichen Anlage kann ihre Zerlegung in Bauteile genutzt werden. Am Fachgebiet Internetbasierte Prozessmodellierung für ad-hoc-Organisationen im Bauwesen, 2008 aufgegangen im Fachgebiet Bauinformatik der Technischen Universität Berlin, wurde eine Modellierungstechnik zur Spezifikation von Ausführungsprozessen im Bauwesen entwickelt [3]. Die Spezifikation eines Prozesses erfolgt hierbei aufgabenorientiert. Die Aufgaben zur Herstellung eines Bauteils werden bestimmt. Aufgaben sind zeitfordernde Geschehen, die den Zustand eines Bauteils verändern. Die Arbeiten an Bauteilen können somit als Prozesse, bestehend aus Aufgaben und Zuständen, modelliert werden. Enge [2] beschreibt die Möglichkeit, für Bauteile mit gleichem Herstellungsprozess generalisierte, projektunabhängige Bauteiltypen zu definieren. Nach Huhnt und Enge [4] sind Bauteile mit gleichem Herstellungsprozess durch dieselbe Menge an Zuständen und derselben Ordnungsrelation innerhalb der Zustände definiert. Aufgaben werden für die Bildung von Bauteiltypen nicht betrachtet. Bauteiltypen stellen somit Prozessgraphen dar, die durch Zustände und Relationen in der Menge der Zustände gebildet werden. Den Bauteilen der baulichen Anlage werden projektunabhängige Bauteiltypen zugeordnet.

Die Detaillierung des Prozessmodells der baulichen Anlage wird somit durch die Detaillierung ihrer Zerlegung festgelegt. Der Detaillierungsgrad der Zerlegung wird durch den Bearbeiter bestimmt. Der Fahrstuhlschacht einer Anlage kann beispielsweise als Bauteil angesehen werden; dieser kann jedoch auch in seine Bestandteile, die einzelnen Bauteile des Fahrstuhlschachts, aufgespalten werden. Für die praktische Anwendung des Modellierungskonzepts erweist es sich als zweckmäßig, nicht bereits zu Beginn der Modellierung den Detaillierungsgrad des Modells vorschreiben zu müssen. Ein einmal spezifizierter Detaillierungsgrad kann im Nachhinein automatisiert gröber dargestellt werden. Eine spätere Verfeinerung erfordert händische Nacharbeit. Um einen hohen Detaillierungsgrad bei gleichzeitiger Gewährleistung der Überschaubarkeit des Modells zu ermöglichen, wird eine Hierarchie eingeführt. Elemente der Hierarchie können nach ihrer Spezifikation weiter zerlegt werden. Dies ist Voraussetzung für eine Verfeinerung des projektspezifischen Modells während der Eingabe.

2 Hierarchische Zerlegung einer baulichen Anlage

2.1 Einführung

Hierarchie: Als Hierarchie sei eine Menge von Elementen bezeichnet, innerhalb der die Elemente einander unter- bzw. übergeordnet sind. Mathematisch können Hierarchien als Wurzelbäume beschrieben werden.

Wurzelbaum [6, S. 608 - 609]: „Ein Wurzelbaum ist ein schlichter, gerichteter azyklischer Graph mit einfachem Zusammenhang. Folgende Eigenschaften gelten für Wurzelbäume:

- Es existiert genau ein Knoten w , der keinen Vorgänger besitzt. Von ihm aus sind alle Knoten des Baums erreichbar. Dieser Knoten heißt Wurzel.
- Jeder Knoten $x \neq w$ besitzt genau einen Vorgänger.
- Jeder Knoten $x \neq w$ ist durch genau einen Weg von w nach x erreichbar.
- Ein Wurzelbaum mit n Knoten besitzt genau $n-1$ Kanten.“

Die zu zerlegende bauliche Anlage stellt nach Einführung einer Hierarchie die Wurzel des Hierarchiebaums dar.

Wege im Baum [6, S.591 - 594]: Als Weg W wird im Allgemeinen ein offener Kantenzug mit unterschiedlichem Anfangs- und Endpunkt bezeichnet. Ein Weg besteht aus Knoten und die sie verbindenden Kanten. Wege in Wurzelbäumen enthalten jeden Knoten sowie jede Kante nur einmal. Als leerer Weg wird ein Weg bezeichnet, dessen Anfangs- und Endknoten gleich sind. Ein leerer Weg enthält keine Kanten. Ein Weg wird im Wurzelbaum eindeutig über seine Knotenfolge beschrieben.

2.2 Elemente zur Bildung von Hierarchien

Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende Elemente zur Bildung von Hierarchien bei der Zerlegung einer baulichen Anlage eingeführt: Bauteil, Bauteilgruppe und Bauteilsystem. Diese Begriffe werden nachfolgend beschrieben.

- **Bauteil:** Die kleinste projektabhängige Einheit der Hierarchie wird als Bauteil bezeichnet. Einem Bauteil wird ein projektunabhängiger Bauteiltyp als Eigenschaft zugeordnet. Im Hierarchiebaum stellen Bauteile die Blätter des Baums dar. Bauteile haben keine Nachfolger.
- **Bauteilgruppe:** Bauteile gleichen Bauteiltyps können zu Bauteilgruppen zusammengefasst werden. Bauteilgruppen wird ein projektunabhängiger Bauteiltyp zugeordnet. Dieser gilt für alle Bauteile der Gruppe. Bauteile verschiedenen Bauteiltyps können nicht Element derselben Bauteilgruppe sein. Gruppen können vor der Spezifikation ihrer Elemente gebildet werden. Eine nachträgliche Zusammenfassung von Bauteilen gleichen Bauteiltyps zu einer Gruppe ist möglich und zweckmäßig. Bauteilgruppen können Bauteilgruppen gleichen Bauteiltyps enthalten.
- **Bauteilsystem:** Bauteilsysteme bestehen aus Elementen verschiedenartiger Typen. Dies können Bauteile, Bauteilgruppen und Bauteilsysteme gleichermaßen sein. Bauteilsystemen kann kein projektunabhängiger Bauteiltyp zugeordnet werden.

Bauteilsysteme und -gruppen stellen Verzweigungsknoten der Hierarchie dar.

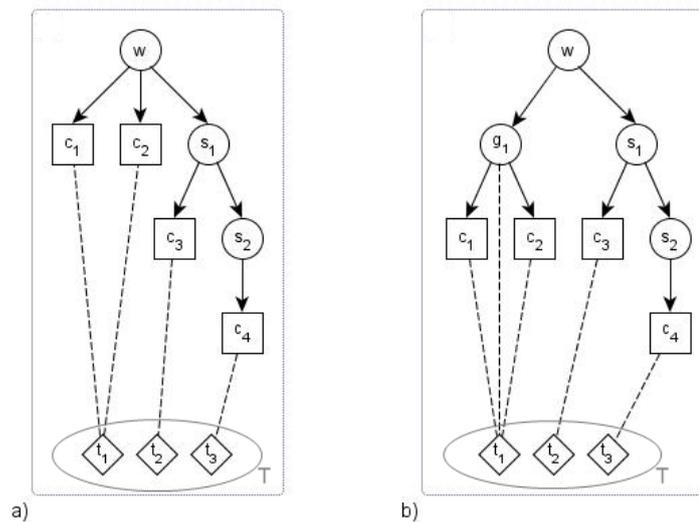


Abb. 1: Schematische Darstellung der hierarchischen Zerlegung einer baulichen Anlage mit Zuordnung von Bauteiltypen; *c*: Bauteil, *g*: Bauteilgruppe, *s*: Bauteilsystem, *t*: Bauteiltyp, *w*: Wurzel.

Abbildung 1 zeigt die schematische Darstellung eines Baums der hierarchischen Zerlegung einer baulichen Anlage *w*. Den Bauteilen *c*₁ und *c*₂ wird derselbe Bauteiltyp *t*₁ aus der Menge der Bauteiltypen *T*

zugeordnet. Sie können gruppiert werden. Ein Knoten g_1 vom Typ Bauteilgruppe wird eingefügt, der c_1 und c_2 enthält. g_1 wird der Bauteiltyp t_1 zugeordnet (vgl. Abb. 1b).

3 Strukturierende Kennzeichnung der Elemente einer Hierarchie

3.1 Einführung

Um die Menge der Bauteile überschaubar zu halten, wird diese mittels Kennzeichnungen strukturiert. Huhnt und Enge [5] beschreiben eine formale Methode auf der Grundlage der Mengenlehre und Relationenalgebra zur Strukturierung der Elemente einer Menge. Aufbauend auf dieser Methode werden die Elemente der Hierarchie konsistent strukturiert.

3.2 Strukturierung von Mengen

Die Menge A wird mit Hilfe einer Menge K , die aus strukturierenden Kennzeichnungen k_i besteht, in disjunkte Teilmengen unterteilt. Dazu wird eine Relation

$$R_{AK} \subseteq A \times K$$

eingeführt, die die Elemente der Menge A mit den Elementen der Menge K verknüpft. R_{AK} ist linkstotal und rechtseindeutig. Über der Menge K wird eine Relation

$$R_{KK} \subseteq K \times K$$

eingeführt. R_{KK} ist linkseindeutig und azyklisch und alle Elemente der Menge K hängen quasistreng miteinander zusammen. Der Graph $G(K, R_{KK})$ ist somit ein Wurzelbaum. Nach Huhnt und Enge [5] wird dieser Baum als Strukturierungsbaum bezeichnet. Die Elemente der zu strukturierenden Menge, die in Relation zu einem Strukturierungsknoten k stehen, bilden eine Teilmenge von A . Diese wird dem Knoten k zugeordnet. Zusätzlich zu den direkt in Relation stehenden Elementen werden einem Knoten k sämtliche Elemente seiner Nachfolger zugeordnet. Dem Wurzelknoten eines Strukturierungsbaums ist somit als Vereinigung aller disjunkten Teilmengen von A die Menge A selbst zugeordnet.

3.3 Strukturierung der Elemente einer Hierarchie

Nach der Einführung von Hierarchien in der Menge der Elemente einer baulichen Anlage soll die Möglichkeit der Strukturierung der Hierarchieelemente gegeben sein. Hierbei ist Vollständigkeit und Konsistenz gefordert. Zunächst wird die Menge der Blätter des Baums unabhängig von den Vorgängern der Blätter betrachtet und nach obig beschriebenem Vorgehen strukturiert (vgl. Abb. 2a). Um konsistente Strukturierungen zwischen den Ebenen der Hierarchie zu gewährleisten, wird folgender Ansatz für die Strukturierung von Verzweigungsknoten eingeführt.

Strukturierungsknoten, die einem Verzweigungsknoten zugeordnet werden können, ergeben sich aus der Strukturierung seiner Nachfolger.

Betrachtet wird ein Verzweigungsknoten s , der die Blätter c_1 , c_2 und c_3 enthält. Die Blätter c_i wurden mittels Zuordnung von Strukturierungsknoten des Baums $G(K, R_{KK})$ strukturiert (vgl. Abb. 2a). Zur Bestimmung von Strukturierungsknoten, die dem Knoten s zugeordnet werden können, werden die Wege W_i von der Wurzel des Strukturierungsbaums zu den, den Blättern c_i zugeordneten, Knoten k_j betrachtet. Die Menge der potentiellen Strukturierungsknoten ergibt sich aus der Schnittmenge der Mengen der Knoten der Wege W_i .

In Abbildung 2b sind mögliche Strukturierungsknoten zur Kennzeichnung des Verzweigungsknotens s infolge der Strukturierung nach Abbildung 2a markiert. Ist einer der betrachteten Wege W_i ein leerer Weg, so ist der in ihm enthaltene Knoten Wurzelknoten des Strukturierungsbaums. Die Schnittmenge der Menge der Knoten der Wege enthält dann nur diesen Knoten (vgl. Abb. 2c). Zur Gewährleistung des höchstmöglichen Detaillierungsgrads bei der Strukturierung eines Verzweigungsknotens s ist es zweckmäßig, aus der Menge der potentiellen Strukturierungsknoten den Knoten mit größter Tiefe zu s zuzuordnen. Dies ist eindeutig möglich, da in dieser Menge nach Anwendung der eingeführten Methode genau ein Strukturierungsknoten mit größter Tiefe vorhanden ist. Änderungen der Strukturierung eines Nachfolgers von s haben die Prüfung auf Änderung der möglichen zu s zuzuordnenden Strukturierungsknoten zur Folge.

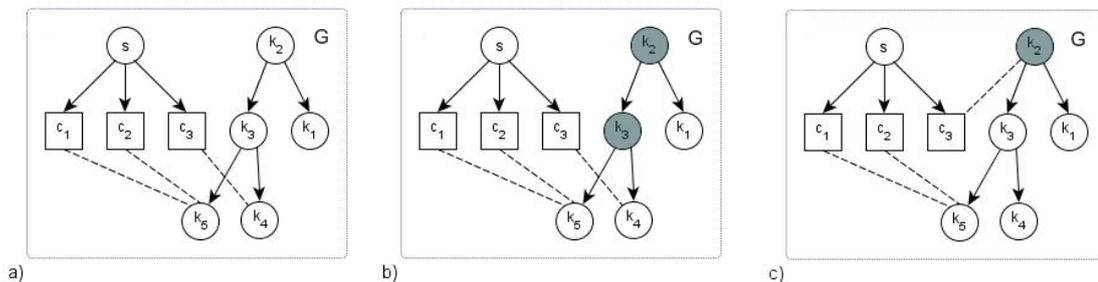


Abb. 2: Konsistente Strukturierung der Elemente der Hierarchie

- a) Strukturierung der Blätter
- b) aus a) resultierende, potentielle Strukturierungsknoten zur Strukturierung von s
- c) modifizierte Strukturierung der Blätter: nur die Wurzel von G kann zu s in Relation gesetzt werden.

Das beschriebene Vorgehen wird auf die eingeführten Elemente der Hierarchie angewandt.

- **Bauteil:** Bauteile stellen die Blätter des Baums dar. Sie können zunächst unabhängig von der Hierarchie durch Verknüpfung mit den Knoten eines Strukturierungsbaumes strukturiert werden.
- **Bauteilgruppe:** Durch die Einführung der kennzeichnenden Strukturierung wird die Definition der Bauteilgruppe erweitert. Bauteilgruppen enthalten danach Elemente gleichen Typs und gleicher Strukturierung. Dies können Bauteile und Bauteilgruppen gleichermaßen sein. Das beschriebene

Vorgehen zur Ermittlung eines potentiellen Strukturierungsknotens größter Tiefe ergibt gerade den Strukturierungsknoten, zu dem die Bauteile der Gruppe in Relation stehen. Bei der Gruppenbildung sowie dem Hinzufügen von Bauteilen zu einer bestehenden Gruppe ist die Strukturgleichheit der Elemente zu prüfen. Änderungen der Strukturierung einer Gruppe werden für alle Elemente der Gruppe übernommen.

- **Bauteilsysteme:** Bauteilsysteme können Bauteile, Bauteilgruppen und -systeme unterschiedlicher Strukturierung enthalten. Die Menge potentieller Strukturierungsknoten zur Strukturierung eines Systems wird nach obigem Vorgehen ermittelt. Während der Erstellung des Modells wird einem Bauteilsystem der Strukturierungsknoten mit der größten Tiefe aus der Menge der potentiellen Knoten zur Kennzeichnung zugeordnet.

3.4 Übertragung von Strukturierungen

Durch die Zuordnung von Bauteiltypen zu Bauteilen und Bauteilgruppen stehen diese in Relation. Sei B die Menge der Elemente, denen ein projektunabhängiger Bauteiltyp zugeordnet werden kann, und T die Menge der Bauteiltypen. Dann ist

$$R_{BT} \subseteq B \times T$$

eine Relation, die die Elemente aus B mit den Elementen aus T verknüpft. Die Relation R_{BT} ist linkstotal und rechtseindeutig, da jedem Element von B genau ein Element von T zugeordnet wird.

Bauteiltypen werden ebenfalls strukturiert. Sei T die Menge der Bauteiltypen und $G(K, R_{KK})$ ein Strukturierungsbaum. Dann ist

$$R_{TK} \subseteq T \times K$$

eine Relation, die die Elemente der Menge T mit den Knoten des Strukturierungsbaums verknüpft. Die Relation R_{TK} ist linkstotal und rechtseindeutig. Aus der Komposition der Relationen R_{BT} und R_{TK} ergibt

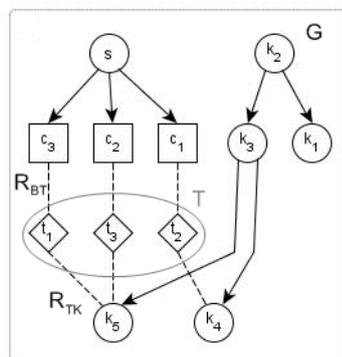


Abb. 3: Übertragung der Strukturierung der Bauteiltypen auf Elemente der Hierarchie.

sich die Relation R_{BK} als die Strukturierung eines Elements von B über das ihm zugeordnete Element aus T .

$$R_{BK} = R_{BT} \circ R_{TK}$$

Die Strukturierung der Bauteiltypen kann somit eindeutig auf die ihnen zugeordneten Elemente der Hierarchie übertragen werden (vgl. Abb. 3). Die Strukturierung von Verzweigungsknoten ergibt sich nach der in 3.3 beschriebenen Methode.

3.5 Verknüpfung von Strukturierungsbäumen

In der Praxis ist eine strukturierende Kennzeichnung der Elemente der Hierarchie mittels mehrerer, voneinander unabhängiger Strukturierungsbäume zweckmäßig. Verschiedene Strukturierungsbäume können unter Angabe einer Reihenfolge miteinander verknüpft werden. Die Verknüpfung von Strukturierungsbäumen kann als Filter der strukturierten Menge nach bestimmten Struktureigenschaften eingesetzt werden. Bei der Verknüpfung wird den Blättern des i -ten Baumes der Wurzelknoten des $(i+1)$ -ten Baumes angefügt. Die Menge der Elemente, die einem Strukturierungsknoten der Verknüpfung zugeordnet sind, ergibt sich aus der Schnittmenge der Menge der zugeordneten Elemente dieses Knotens mit der Menge der zugeordneten Elemente seines Vorgängers.

4 Anwendung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Programm in der objektorientierten Sprache Java zur Eingabe der Zerlegung einer baulichen Anlage implementiert. Dieses stellt unter Anderem folgende Funktionalitäten bereit:

- Spezifikation von Bauteilen, Bauteilgruppen und -systemen zur Bildung von Hierarchien
- Zuordnung projektunabhängiger Bauteiltypen zu den Elementen Bauteil und Bauteilgruppe
- Erstellung projektspezifischer Strukturierungsbäume zur Strukturierung der Elemente der Hierarchie mittels Zuordnung von Strukturierungsknoten
- Verknüpfung von Strukturierungsbäumen unter Angabe einer Reihenfolge sowie einer gewünschten Tiefe je Strukturierungsbaum

4.1 Spezifikation der Elemente der Hierarchie

Die Elemente Bauteil, Bauteilgruppe und Bauteilsystem können mittels grafischer Oberfläche und Kontextmenüs erstellt werden. Elemente können nach Prüfung auf gleiche Strukturierung sowie gleichen Bauteiltyp gruppiert werden. Systeme können aus beliebigen Elementen der Hierarchie gebildet werden. Die fachliche Prüfung liegt beim Bearbeiter.

Der Hierarchiebaum wird in einer tabellarischen Übersicht im Hauptfenster dargestellt. Das Kopieren, Verschieben sowie das Löschen von Elementen der Hierarchie ist möglich.

4.2 Zuordnung von projektunabhängigen Bauteiltypen

Den Elementen Bauteil und Bauteilgruppe werden projektunabhängige Bauteiltypen zugeordnet. Die Zuordnung geschieht per Drag n Drop. Ein Bauteiltyp wird aus der Menge der Bauteiltypen ausgewählt und bei gedrückter Maustaste auf das gewünschte Element der Hierarchie gezogen. Bei Zuordnung eines Bauteiltyps zu einer Bauteilgruppe wird dieser für alle Elemente der Gruppe übernommen.

Bei Zuordnung von Bauteiltypen zu Bauteilen oder Bauteilgruppen, die Element einer Bauteilgruppe sind, kann dieser Bauteiltyp nur zugeordnet werden, sofern er für die übergeordnete Gruppe und alle in ihr enthaltenen Elemente übernommen wird.

4.3 Strukturierung der Elemente

Die Bauteile einer Anlage werden nach verschiedenen Kriterien strukturierend gekennzeichnet. Die Kennzeichnung der Elemente erfolgt nach 3.2 mittels Strukturierungsbäumen. Diese können projektunabhängig sowie projektspezifisch sein.

Projektunabhängige Strukturierungsbäume: Die Menge der projektunabhängigen Bauteiltypen wird nach DIN 276 - Kosten im Hochbau [1] strukturiert. Dieser Strukturierungsbaum stellt einen projektunabhängigen Strukturierungsbaum dar.

Bei Zuordnung eines Bauteiltyps zu einem Bauteil oder einer Bauteilgruppe der Hierarchie wird die Strukturierung des Bauteiltyps nach 3.4 auf das jeweilige Element übertragen.

Projektspezifische Strukturierungsbäume: Das Programm bietet die Möglichkeit, beliebige projektspezifische Strukturierungsbäume anzulegen. Diese werden im unteren Bereich des Hauptfensters dargestellt. Die Strukturierung der Elemente erfolgt mittels Drag n Drop. Bei der Strukturierung von Bauteilgruppen wird der gewählte Strukturierungsknoten für alle Elemente der Bauteilgruppe übernommen. Bauteile und Bauteilgruppen, die Element einer Gruppe sind, können nur strukturiert werden, sofern der Strukturierungsknoten für die Gruppe und somit für alle in ihr enthaltenen Elemente übernommen wird. Die Menge der potentiellen Strukturierungsknoten zur Strukturierung eines Bauteilsystems ergibt sich nach 3.3. Einem System wird automatisch der Knoten mit größter Tiefe aus dieser Menge zugeordnet.

4.4 Anwendungsbeispiel

Betrachtet wird ein dreigeschössiges, unterirdisches Parkhaus, auf dessen hierarchische Zerlegung beispielhaft eingegangen wird. Gesondert betrachtet wird ein Bauteilsystem *Treppenhaus* sowie das Bauteil *Bohrpfahl mit Stützen*. Die Elemente werden nach verschiedenen Kriterien strukturiert. Diese sind *Lage horizontal*, *Lage vertikal* und *Produktion*.

Das Bauteil *Bohrpfahl mit Stützen* wird zur Errichtung des Bauwerks 44 mal benötigt. Zunächst wird eine Bauteilgruppe *Bohrpfähle mit Stützen* spezifiziert (vgl. Abb. 4). Relationen zu den Wurzelknoten

der Strukturierungsbäume werden für die Gruppe automatisch erstellt. Eine nachträgliche Bildung von Gruppen ist möglich. Es werden 44 Bauteile *Bohrpfahl mit Stützen* zur Gruppe hinzugefügt. Der Grup-

Projekt Element Strukturierungsbaum

Zerlegung der baulichen Anlage

Element	Bauteiltyp	Lage horizontal	Lage vertikal	Produktion
G Bohrpfähle mit Stützen		Lage horizontal	Lage vertikal	Produktion

Abb. 4: Spezifizierte Bauteilgruppe *Bohrpfähle mit Stützen*.

pe, und somit allen in ihr enthaltenen Elemente, wird nach Bestätigung durch den Nutzer der Bauteiltyp *Bohrpfahl mit Stütze als Vorleistung* zugeordnet (vgl. Abb. 5). Auf gleiche Weise wird die Gruppe mittels Zuordnung des Strukturierungsknotens *Produktion - Neubau* strukturiert. Ein Bauteil *Treppenhaus* wird

Zerlegung der baulichen Anlage

Element	Bauteiltyp	Lage horizontal	Lage vertikal	Produktion
G Bohrpfähle mit Stützen	Bohrpfahl mit Stütze als Vorleistung	Lage horizontal	Lage vertikal	Produktion
C Bohrpfahl mit Stützen 1	Bohrpfahl mit Stütze als			
C Bohrpfahl mit Stützen 2	Bohrpfahl mit Stütze als			
C Bohrpfahl mit Stützen 3	Bohrpfahl mit Stütze als			
C Bohrpfahl mit Stützen 4	Bohrpfahl mit Stütze als			
C Bohrpfahl mit Stützen 5	Bohrpfahl mit Stütze als			
C Bohrpfahl mit Stützen 6	Bohrpfahl mit Stütze als			

Bestätigung

Der Typ *Bohrpfahl mit Stütze als Vorleistung* wird für alle Elemente der Gruppe übernommen!

Abbrechen Bestätigen

Bauteiltypen

- 100 Grundstück
- 200 Erschließen
- 300 Bauwerk - Baukonstruktionen
 - 310 Baugrube
 - 320 Gründung
 - 321 Baugrundverbesserung
 - 322 Flachgründungen
 - 323 Tiefgründungen
 - Bohrpfahl mit Stütze als Vorleistung
 - 324 Unterböden und Bodenplatten

Abb. 5: Zuordnung des Bauteiltyps *Bohrpfahl mit Stütze als Vorleistung* zur Bauteilgruppe nach Bestätigung.

spezifiziert (vgl. Abb. 6a). Das Treppenhaus verbindet drei Ebenen. Ein nächster Detaillierungsschritt ist die Zerlegung des Treppenhauses in drei Bauteile *Treppenhaus*, die den Ebenen des Bauwerks zugeordnet werden. Hierzu wird ein Bauteilsystem *Treppenhaus* gebildet. Das zuvor spezifizierte Bauteil *Treppenhaus* ist Element des Systems (vgl. Abb. 6b). Dem entstandenen System können weitere Bauteile hinzugefügt werden (vgl. Abb. 6c). Jedes Bauteil *Treppenhaus* einer Ebene kann weiter zerlegt werden.

Zerlegung der baulichen Anlage

Element	Bauteiltyp
G Bohrpfähle mit Stützen	Bohrpfa
C Treppenhaus	

a)

Zerlegung der baulichen Anlage

Element	Bauteiltyp
G Bohrpfähle mit Stützen	Boh
S Treppenhaus	
C Treppenhaus	

b)

Zerlegung der baulichen Anlage

Element	Bauteiltyp
G Bohrpfähle mit Stützen	
S Treppenhaus	
C Treppenhaus 1. UG	
C Treppenhaus 2. UG	
C Treppenhaus 3. UG	

c)

Abb. 6: Erweiterte Zerlegung durch Systembildung.

Es besteht aus den Bauteilen *Decke, Wände / Stützen* sowie *Durchbruch*. Zusätzlich zu den Systemen *Treppenhaus* der jeweiligen Ebene werden weitere Bauteile spezifiziert. Abbildung 7 zeigt die detaillierte Zerlegung des ursprünglichen Bauteils *Treppenhaus* in seine Bauteile und Systeme. Die entstandenen

Element	Bauteiltyp	Lage horizontal	Lage vertikal	Produktion
Bohrpfähle mit Stützen	Bohrpfahl mit Stütze als Vor...	Lage horizontal	Lage vertikal	Neubau
Treppenhaus		Lage horizontal	Lage vertikal	Produktion
Bodenplatte Treppenhaus	Bodenplatte	Lage horizontal	Lage vertikal	Neubau
Erdaushub Treppenhaus	Erdaushub mit Planum	Lage horizontal	Lage vertikal	Rückbau
Treppenhaus 1. UG		Lage horizontal	1. UG	Produktion
Decke Treppenhaus 1.UG	Decken - Ortbetonherstellu...	Lage horizontal	1. UG	Neubau
Durchbruch Treppenhaus 1. UG	Durchbruch Stahlbeton	Lage horizontal	1. UG	Rückbau
Wände / Stützen Treppenhaus 1. UG	Wände Stahlbeton - Ortbet...	Lage horizontal	1. UG	Neubau
Treppenhaus 2. UG		Lage horizontal	2. UG	Produktion
Decke Treppenhaus 2.UG	Decken - Ortbetonherstellu...	Lage horizontal	2. UG	Neubau
Durchbruch Treppenhaus 2. UG	Durchbruch Stahlbeton	Lage horizontal	2. UG	Rückbau
Wände / Stützen Treppenhaus 2. UG	Wände Stahlbeton - Ortbet...	Lage horizontal	2. UG	Neubau
Treppenhaus 3. UG		Lage horizontal	3. UG	Produktion
Decke Treppenhaus 3.UG	Decken - Ortbetonherstellu...	Lage horizontal	3. UG	Neubau
Durchbruch Treppenhaus 3. UG	Durchbruch Stahlbeton	Lage horizontal	3. UG	Rückbau
Wände / Stützen Treppenhaus 3. UG	Wände Stahlbeton - Ortbet...	Lage horizontal	3. UG	Neubau

Abb. 7: Zerlegung des Systems *Treppenhaus* in Bauteile und Bauteilsysteme.

Elemente wurden mittels der vorhandenen Strukturierungsbäume strukturiert. Den Bauteilen der Zerlegung ist ein projektunabhängiger Bauteiltyp zugeordnet. Die Zerlegung kann weiter fortgesetzt werden. Die Bauteile *Wände / Stützen* der jeweiligen Ebene können in Gruppen transformiert werden, die die jeweiligen Bauteile *Wand / Stütze* beinhalten. Das gebildete System *Treppenhaus* dient als Vorlage für weitere Systeme *Treppenhaus*. Es kann kopiert werden.

Ebenfalls möglich ist das Zusammenfassen mehrerer Bauteile, Bauteilgruppen und -systemen zu Bauteilsystemen. Hierbei wird ein neues Bauteilsystem in die Zerlegung eingefügt, dem die zusammenzufassenden Elemente untergeordnet werden.

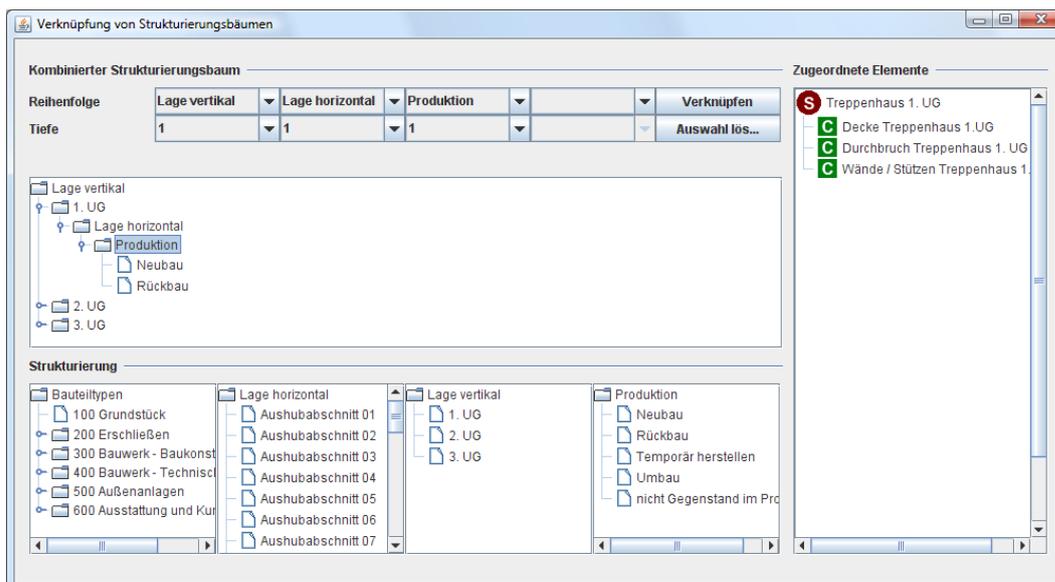


Abb. 8: Verknüpfung der Strukturierungsbäume *Lage vertikal*, *Lage horizontal* und *Produktion*.

Die Anwendung ermöglicht das Verknüpfen vorhandener Strukturierungsbäume. Mittels grafischer Oberfläche wird die Reihenfolge zur Verknüpfung der Strukturierungsbäume festgelegt. Für jeden zu verknüpfenden Strukturierungsbaum kann eine gewünschte Tiefe angegeben werden. Abb. 8 zeigt den Baum der Verknüpfung der Strukturierungsbäume *Lage vertikal*, *Lage horizontal* und *Produktion*. Der Strukturierungsbaum der Verknüpfung wird nach 3.5 gebildet. Strukturierungsknoten, die zu keinem Element der Hierarchie in Beziehung stehen, werden nicht angezeigt. Bei Auswahl eines Strukturierungsknotens werden die ihm zugeordneten Elemente angezeigt. Der ausgewählte Strukturierungsknoten ist *Lage vertikal - 1. UG - Lage horizontal - Produktion*.

5 Ergebnis und Ausblick

Hierarchien erweisen sich bei der Zerlegung einer baulichen Anlage als sehr nützlich.

Die Einführung des Elements *Bauteilgruppe* erfolgte zur zusätzlichen Strukturierung der Elemente der Hierarchie. Gruppen können effizient zur Strukturierung von Bauteilen mittels Zuordnung von Strukturierungsknoten eingesetzt werden. In gleicher Weise können sie für die Zuordnung projektunabhängiger Bauteiltypen genutzt werden. Durch das Bilden von Gruppen trägt das Modell zur Laufzeit teilweise redundante Informationen. Diese werden nicht gespeichert. Sie können aus den Bedingungen für Bauteilgruppen abgeleitet werden.

Das Element *Bauteilsystem* bietet die Möglichkeit, beliebige Elemente zusammenzufassen. Bauteilsysteme sollen in Zukunft zur Gestaltung des Prozesses genutzt werden. Die Nutzung von Systemen als projektspezifischer Bauteiltyp ist möglich und zweckmäßig.

Literaturverzeichnis

- [1] Deutsches Institut für Normung e. V. *DIN 276. Kosten im Hochbau. 2008.*
- [2] F. Enge. *Zustandsmodellierung als Grundlage für Ausführungsterminpläne. Forum Bauinformatik 2005. pp. 123–130.*
- [3] W. Huhnt. Generating Sequences of Construction Tasks. Proceedings of 22nd CIB-W78 International Conference on Information Technology in Construction. 2005. pp.17-22.
- [4] W. Huhnt and F. Enge. Can Algorithms support the Specification of Construction Schedules? In: ITcon Vol. 11. Special Issue Process Modelling, Process Management and Collaboration. 2006. pp. 547–564.
- [5] W. Huhnt and F. Enge. *Consistent Information Management for structuring Construction Activities. Bringing ITC Knowledge to Work. Proceedings of 24th CIB-W78 Conference, 14th EG-ICE Workshop, 5th ITC@EDU Workshop. 2007. pp. 607-614.*
- [6] P. Pahl and R. Damrath. *Mathematische Grundlagen der Ingenieurinformatik. 2000.*

Integriertes Kommunikations- und Informationsmanagement

Modell einer kollaborativen Wissensplattform für Hochschulen und Forschungseinrichtungen

Thilo Brüggemann

Universität Karlsruhe, Institut für Industrielle Bauproduktion, 76131 Karlsruhe, Deutschland, E-mail: thilo.brueggemann@ifib.uni-karlsruhe.de, Telefon: +49(0)72 1/6082 167

Kurzfassung

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit im Zuge einer Diplomarbeit erarbeiteten allgemeinen Lösungsansätzen und dem daraus abgeleiteten Modell eines integrierten Wissensmanagements für Hochschulen und Forschungseinrichtungen, welches in Form einer verteilten Webapplikation prototypisch implementiert wurde. Vorrangig geht es dabei um die Bereitstellung eines Frameworks für den gemeinschaftlichen Aufbau eines semantischen Informationsnetzwerks. Den Kern dieses verteilten Netzes bilden auf polyhierarchisch strukturierten Metaverzeichnissen basierende, horizontal und vertikal skalierbare Themenkataloge, sowie auf Ebene der Businesslogik eine permanente qualitative und quantitative Auswertung des Benutzerverhaltens. Weiterhin werden durch eine strukturelle Abbildung institutioneller Hierarchien, personeller Kompetenzen und zeitlicher Projektabläufe dynamische Workspaces geschaffen, um Defizite bei der intra- und interdisziplinären Kommunikation, sowie der Gruppen- und Prozessorganisation zu identifizieren und zu minimieren. Über Themen- und Prozessdomänen werden zugehörige Akteure, Korrespondenzen und inhaltliche Beiträge kategorisiert und kontextsensitiv miteinander verknüpft. Jegliche transferierten Inhalte aus Forschung, Lehre, Studium und Verwaltung sollen dabei öffentlich oder individuell eingeschränkt bereitgestellt werden können. Durch die kooperative Sammlung und Veröffentlichung von Informationen, zukünftig möglicherweise ergänzt durch eine schrittweise Retro-Archivierung vorhandener Bibliotheksbestände, ist zudem der Aufbau differenzierter digitaler Fachdatenbanken möglich.

Stichworte

Wissensmanagement, Semantisches Netz, Kommunikation, Projektmanagement, Groupware, CSCW, WEB 3.0, Grid-Computing

1 Einleitung

1.1 Situation

1.1.1 Wissensrepräsentation

An Hochschulen, Lehr- und Forschungseinrichtungen, sowie bei assoziierten externen Partnern wird seitens verschiedener Instanzen permanent Wissen akquiriert, zusammengetragen, evaluiert und validiert. Dabei werden – oftmals komplexe – Informationen dokumentiert, gegenseitig referenziert, intradisziplinär kommuniziert und diskutiert. Nicht selten behandeln veröffentlichte Inhalte dabei nur Fragmente eines Ganzen, die aus ihrem Kontext herausgelöst und isoliert betrachtet nachträglich nur schwer zu identifizieren und chronologisch zuzuordnen sind. Eine systematische und lückenlose projekt- bzw. veranstaltungsbegleitende Veröffentlichung relevanter Inhalte findet selten statt, da sie aufgrund der erforderlichen redaktionellen Betreuung, wie thematischer Klassifizierung und indexbasierter Katalogisierung, sowie Aufbewahrung bzw. Speicherung einen nicht unerheblichen personellen, materiellen und letztlich auch finanziellen Aufwand verursachen würde. Obgleich digitale Datenverarbeitung und verteilte Netze heute die optimalen Voraussetzungen dazu bereitstellen, bleibt eine heterogene und thematisch vernetzte Repräsentation akademischen Wissens noch ein utopisches Ideal.

So wird ein großer Teil der dokumentierten Inhalte, vor allem in den Bereichen Lehre und Studium, bislang nicht oder nur unzureichend archiviert, im Außenraum sichtbar gemacht und so für die Allgemeinheit zur Verfügung gestellt. Explorative Recherchen innerhalb semantischer Themenkomplexe gestalten sich ineffizient und aufwändig, da veröffentlichte Inhalte und referenzierte Sekundärquellen inhomogen, zusammenhanglos und oft unvollständig erfasst werden. Eine zentrale und global verfügbare Repräsentation veröffentlichter Inhalte existiert zudem nicht, sodass der Zugang zu gesuchten Informationen oftmals ausschließlich über den direkten Kommunikationsweg führt, wobei zunächst die zuständigen Adressaten identifiziert werden müssen.

1.1.2 Projektmanagement

Ebenso uneinheitlich, umständlich und lückenhaft gestaltet sich häufig die projekt- bzw. veranstaltungsinterne Kommunikation und Koordination. Dies betrifft sowohl die Organisation von Lehrveranstaltungen mit den interagierenden Akteuren „Lehrende und Stu-

dierende“, als auch das Projektmanagement in Forschungskonsortien mit einer in der Regel sehr viel stärker differenzierten Aufgabenverteilung und einem komplexeren inhaltlichen Gegenstand. Es existiert heute zwar eine nahezu unüberschaubare Vielzahl von informationstechnischen Lösungen zur Wissensgliederung, zur Kommunikation und zum Projektmanagement, ein ganzheitlicher Ansatz mit einer inhaltlichen, synergistisch interoperierenden Verknüpfung von Wissen, Prozessen, Akteuren und Korrespondenzen ist hingegen nicht ersichtlich.

1.2 Stand der Technik

1.2.1 Wissensnetze

Das WWW hat seit seiner öffentlichen Freigabe im Jahre 1991 durch den lokal verteilten und in der Regel freien Zugang zu Informationen Wirtschaft, Wissenschaft, Kultur und Gesellschaft revolutioniert. Es ist aus dem heutigen Alltag längst nicht mehr wegzudenken. Die Menge der im Web präsenten und frei zugänglichen Inhalte wächst nach wie vor rasant. Daraus ergibt sich jedoch das Problem, dass eine gesuchte Information, ihr Vorhandensein vorausgesetzt, in der Fülle der im Netz verfügbaren Inhalte nur schwer aufzufinden ist. Indexbasierende Suchmaschinen wie Google oder Yahoo leisten hierbei bereits gute Hilfe, ihre Suchindizes basieren jedoch hauptsächlich auf der Wortsyntax, also auf der normativen, alphanumerischen Deskription der Stichworte und nicht auf ihrer inhaltlichen Bedeutung. Die Betreiber versuchen deshalb, durch Auswertungen beispielsweise der Seitenverlinkungen und des Benutzerverhaltens die Suchergebnisse durch eine Sortierung entsprechend ihrer Relevanz zu optimieren. Sprachliche Barrieren und deklarative Inkonsistenzen, wie Synonyme, Polyseme, Homonyme oder Fehler in Rechtschreibung und Begriffsverwendung, verschlechtern jedoch generell die Ergebnisse gezielter Suchen im Netz. Anstatt syntaxbasierenden Recherchen wäre also eine auf der inhaltlichen Bedeutung basierende Suchfunktion, die *semantische Suche*, wünschenswert.

Der Begriff *Semantik* steht allgemein für die inhaltliche Bedeutung von Wörtern, Wortphrasen und Abbildungen. Als *Wissensnetze*, *Semantische Netze* oder *Ontologien* werden in der Informatik formale Modelle von Begriffen und ihren Relationen bezeichnet. Dabei sollen Informationen derart zur Verfügung gestellt werden, dass eine maschinelle Verarbeitung gemäß ihrer inhaltlichen Bedeutung ermöglicht wird. Um Inhalte im Web entsprechend ihrer semantischen Zusammenhänge strukturiert beschreiben zu können, wurden auf XML-Basis formale Auszeichnungssprachen entwickelt. Dazu zählt das

W3C-standardisierte *Resource Description Framework (RDF)*, welches es ermöglichen soll, Informationen über das Web auszutauschen, ohne dass dabei ihre ursprüngliche Bedeutung verloren geht. Im Gegensatz zu den reinen Auszeichnungssprachen wie XML oder HTML dient RDF also nicht nur der korrekten grafischen Darstellung von Dokumenten im Web, sondern auch der Heterogenität, Kombination und Verarbeitung enthaltener Informationen. Da mittels RDF jedoch keine komplexeren Ontologien modelliert werden können, wurde mit der *Web Ontology Language (OWL)* eine auf RDF basierende, ausdrucksstärkere Repräsentationssprache vom W3C spezifiziert und etabliert. Mittels OWL sollen Webinhalte und deren Beziehungen so beschreibbar sein, dass ihre inhaltliche Bedeutung vollständig maschinell interpretiert werden kann [1, 2, 3].

Anstatt der gesamten Datenfülle des WWW behandeln *Online-Datenbanken* und *Webforen* nur einen eingeschränkten und nach außen abgegrenzten Teilausschnitt meist fachspezifischer Informationen im Netz. Durch eine zentrale bibliografische Redaktion bzw. Moderation und Speicherung in relationalen Datenbanksystemen lassen sich inhaltliche Beziehungen zwischen einzelnen Beiträgen effizient und widerspruchsfrei anlegen und semantische Netze aufbauen. Pflege und Betrieb sind jedoch aufwändig, weswegen ihr Wachstum eine geringe Dynamik aufweist und der Zugriff oft kostenpflichtig ist. Im Gegensatz dazu sind *Wikis*, Online-Datenbanken mit einer verteilten kollaborativen Redaktion, in der Regel frei zugänglich, weisen ein höheres dynamisches Wachstum auf und bilden ein breiteres Wissensspektrum ab. Da prinzipiell jeder Benutzer Informationen beisteuern, editieren oder löschen kann, ist eine Verifikation der Inhalte und ihrer semantischen Beziehungen generell jedoch nicht zu gewährleisten [4].

Eine Möglichkeit zur lokalen inhaltlichen Strukturierung und bibliografischen Erfassung von Wissen bieten *Gliederungseditoren* oder *elektronische Zettelkästen*. Diese meist plattformgebundenen Programme dienen nicht der Verbreitung und dem Austausch von Informationen, sondern vielmehr als persönliche Gedächtnisstütze und Hilfsmittel bei der Organisation wissenschaftlicher und literarischer Arbeiten. Mit ihrer Hilfe können Textdaten wie Notizen, Zitate, Exzerpten und Textpassagen auf einfache Weise hierarchisch strukturiert archiviert werden. Durch die Verknüpfung der Einträge über indizierte Schlagworte, gegenseitige Verweise und Referenzierungen zu Quellenangaben können einfache und leicht recherchierbare semantische Netze aufgebaut werden. Wissensnetze mit komplexeren Ontologien können mit Gliederungseditoren generell jedoch nicht abgebildet werden [5].

1.2.2 Kommunikations- und Projektmanagement

Neben der Speicherung und freien Zugänglichmachung von Informationen über das WWW hat das Internet auch neue Kommunikationstechniken etabliert. Die E-Mail ist heute sein meistgenutzter Dienst [6]. Mittels Lösungen zum *Personal Information Management (PIM)* lassen sich unter anderem elektronische Post und Dokumente erstellen, austauschen und dokumentieren, Kontaktdaten verwalten, sowie Aufgaben und Termine koordinieren. In Arbeitsumgebungen mit differenzierter Verteilung komplexer Aufgaben, wie etwa bei Forschungs- oder Bauvorhaben, können mit Hilfe kollaborativer *Projektmanagementsoftware (PMS)* einzelne oder mehrere Projekte bzw. Workflows simultan abgebildet und administriert werden. Dazu zählen auch internetbasierende Systeme (*IBPM – internetbasiertes Projektmanagement System*) und auf die projektinterne Kommunikation spezialisierte Lösungen (*PKM – Projektkommunikationssystem*). Mit PMS lassen sich, ergänzt durch die Funktionen des Informationsmanagements, durch die Möglichkeiten zur Definition organisatorischer Hierarchien, Teambildungen, Zuweisung von Rollen, Festlegung von Meilensteinen und Darstellung von Arbeitsfortschritten auch Projektabläufe und Teilprozesse planen, steuern und kontrollieren. Bei gängigen PIM- (z. B. Microsoft „Outlook“/„Exchange Server“) und PMS-Lösungen (z.B. Microsoft „Project“/„Project Server“) handelt es sich um Client-Server-Systeme, die entsprechende, in der Regel Systemplattform-abhängige und proprietär lizenzierte Infrastrukturen voraussetzen. Ihr Betrieb verursacht meist einen relativ hohen zentralen Administrationsaufwand. Durch die Konkurrenzsituation am Markt konnten sich außerdem bislang keine einheitlichen Standards etablieren; offene Schnittstellen – beispielsweise zum Wissensmanagement behandelte Inhalte – fehlen [7, 8].

1.3 Ziele

Bei dem in diesem Beitrag skizzierten Modell eines frei zugänglichen Werkzeugs zur öffentlichen Verbreitung relevanter Inhalte und Unterstützung kooperativer arbeitsteiliger Prozesse an Hochschulen und Forschungseinrichtungen sollen die verschiedenen technologischen Ansätze der digitalen Kommunikation, des Projektmanagements und der Wissensorganisation zu einem ganzheitlich integrierten Konzept einer kollaborativen, verteilten Software (*Groupware*) zum Kommunikations- und Wissensmanagement zusammengeführt werden. Bei ihrer Synthese gilt es zudem, funktionale Synergieeffekte zur verbesserten Interoperabilität der Komponenten zu identifizieren und daraus Lösungen zu generieren. Den Kern bildet jedoch die technische Umsetzung eines gemeinschaftlich be-

triebenen, skalierbaren Wissensnetzwerks für Forschung, Lehre und Studium. Im Gegensatz zu bisherigen Konzepten semantischer Informationsnetze sollen dabei sowohl die Editierbarkeit und Recherchierbarkeit der Inhalte, als auch die Genauigkeit ihrer inhaltlichen Referenzierungen deutlich verbessert werden. Weiterhin sollen auf frei zugänglichen Standards basierende und erweiterbare Schnittstellen zur Anbindung externer Tools angeboten werden.

Das Prinzip der kollaborativen Software ist generell auf eine möglichst breite Partizipation ihrer Anwendergemeinde, sowie auf die formale und informale Sorgfältigkeit der Benutzung angewiesen. Um eine maximale – sowohl lokale, als auch temporäre – Verfügbarkeit bei gleichzeitiger Systemplattform-Unabhängigkeit zu gewährleisten, soll das vorgestellte Konzept daher als datenbankgestützte Webapplikation implementiert werden. Die Akzeptanz beim Anwender kann auch bei hoher Komplexität optimiert werden, indem die grafische und funktionale Gestaltung der Benutzeroberfläche auf Benutzerfreundlichkeit bzw. Gebrauchstauglichkeit (*Usability*) optimiert wird. Die intuitive Bedienbarkeit soll dabei durch individuelle Personalisierbarkeit, assistierende Hilfs- und Lernfunktionen sowie eine dynamische Kontextsensitivität unterstützt werden.

2 Entwurf

2.2 Datenstruktur

Als Basis aller inhaltlichen Verknüpfungen, zur Klassifizierung von Benutzern, Benutzergruppen und Institutionen wie auch von Projekträumen und Themenkomplexen dient ein monohierarchisch strukturierter, d. h. durch $1:n$ -verknüpfte Knotenpunkte aufgebauter Rubrikenbaum. Jede seiner Rubriken jeder hierarchischen Instanz besitzt dabei mindestens einen Moderator, welcher beliebige Zugriffsprivilegien seines Administrationsraums jeder adressierbaren Person, Gruppe oder Institution verfügen oder entziehen kann. Darüber hinaus kann er Regeln zur Vererbung der Zugriffsrechte seiner Domäne festlegen, die solange Gültigkeit behalten, bis sie von ihm oder einer höheren administrativen Instanz aufgehoben werden.

Inhalte werden in *Beiträgen* veröffentlicht. Diese können neben Textdaten auch Raster- und Vektorgrafiken sowie multimediale Informationen beinhalten. Grundsätzlich muss jeder Beitrag zur Veröffentlichung einer dem Autor freigegebenen Rubrik zugeordnet werden. Diese spezifiziert die Zugehörigkeit zu einer bestimmten Domäne, d. h. zu einem Themenkomplex oder Projektraum, ihren Freigaben und Nutzungsrichtlinien.

Beiträge werden jedoch nicht direkt im Basiskatalog abgelegt, dieser dient – als Metainstanz – ausschließlich der Strukturierung. Institutions-, Projekt- und Themenrubriken können durch eine beliebig breite und tiefe Gliederung in polyhierarchisch strukturierte, d. h. in mit $n:m$ -verknüpften Knotenpunkten aufgebaute Unterrubriken bzw. Verzeichnisse differenziert und gegenseitig referenziert werden. Diese Verzeichnisse können ebenfalls mit Freigabekriterien versehen werden und sowohl Beiträge als auch weitere Unterverzeichnisse enthalten.

2.3 Vernetzung

Bei themenbezogenen Recherchen mittels gezielter oder explorativer Suche sollen dem Anwender auch thematisch verwandte Beiträge vorgeschlagen werden. Ein möglichst hoher Grad inhaltsbezogener Übereinstimmung kann dabei durch den Aufbau mehrerer sich überlagernder und dynamisch gewichteter Verknüpfungen erreicht werden, welche in ihrer Addition letztlich zu einer engmaschigen semantischen Vernetzung der Inhalte führen. Die qualitative und quantitative Komponente bei der Gewichtung von Verknüpfungen bilden dabei dynamische Relevanzierungen der Benutzer und Themenrubriken sowie der veröffentlichten Inhalte. Die Auswertung der Beziehungen zwischen Beiträgen soll letztlich den Grad ihrer potentiellen inhaltlichen Übereinstimmung exakter anzeigen, als dies bei gegenwärtigen Wissensnetzwerken und Gliederungswerkzeugen der Fall ist.

2.3.1 Dynamische Relevanzierung

Die Relevanz eines Benutzers entscheidet unmittelbar über dessen Moderations- und Redaktionsprivilegien und hat einen direkten Einfluss auf die Gewichtung aller von ihm veröffentlichten Inhalte und getätigten Aktionen. Sie wird aus einem Zusammenspiel statischer und dynamischer Faktoren gebildet und permanent aktualisiert. Verfügte administrative Kompetenzen und sein Standort innerhalb der sozialen akademischen Hierarchie werden in einer statischen Komponente aggregiert. Einen maßgeblicheren Einfluss nehmen jedoch dynamische Faktoren, welche sowohl die Qualität, als auch relative und absolute Quantitäten des persönlichen Beitrags eines Benutzers abbilden, beispielsweise die Anzahl veröffentlichter Beiträge oder die durchschnittliche Bewertung bzw. das *Rating* seines Beitrags.

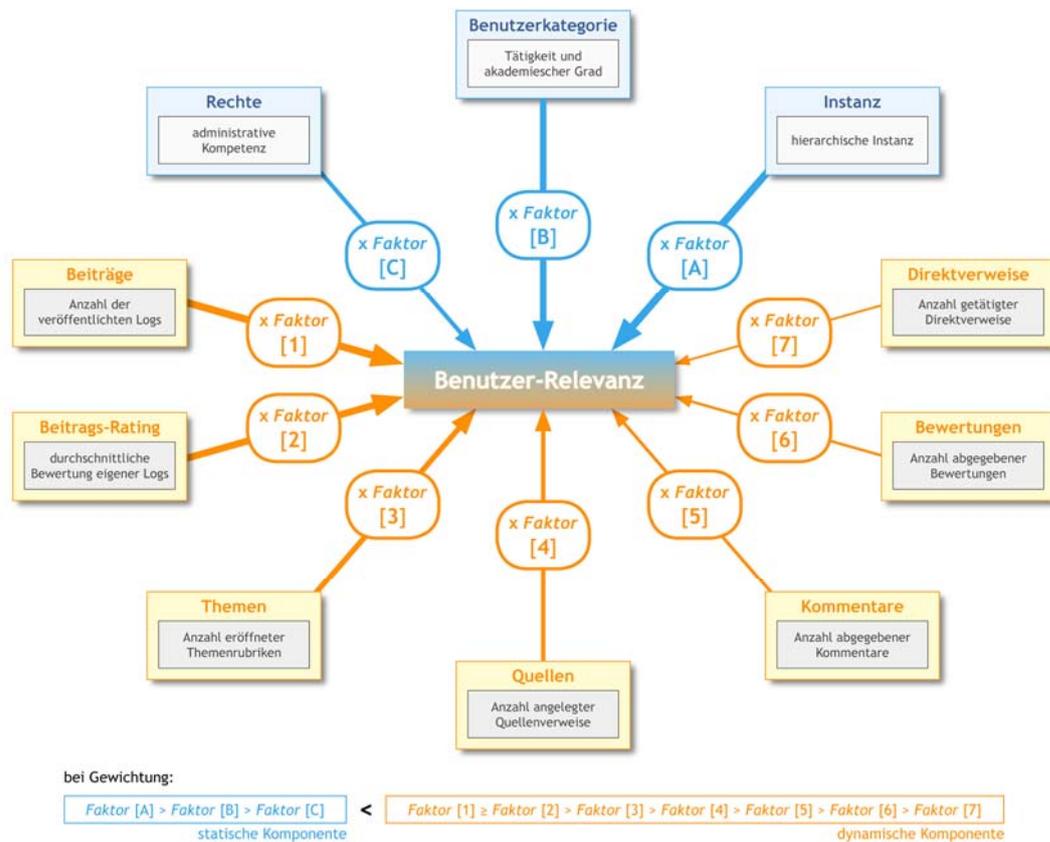


Abb. 1: Dynamische Benutzer-Relevanzierung.

Die Relevanz eines Beitrags soll Aufschluss über die öffentliche Akzeptanz und Qualität enthaltener Inhalte geben. Sie entscheidet beim Aufbau des semantischen Netzes maßgeblich über seine konkrete Gewichtung bei der Auswertung direkter oder indirekter Referenzierungen. Abgeleitet wird sie aus mehreren, unterschiedlich priorisierten, sowohl quantitativen, als auch qualitativen Faktoren, wobei die aktuelle Relevanz des Autors das größte Gewicht hat. Ebenso fließen auch die Relevanzen derjenigen Benutzer als Faktoren in die Auswertung ein, welche durch ihre Aktionen auf den Beitrag Bezug nehmen (z. B. bei Bewertungen, Kommentaren, Lesezeichen oder Direktverweisen).

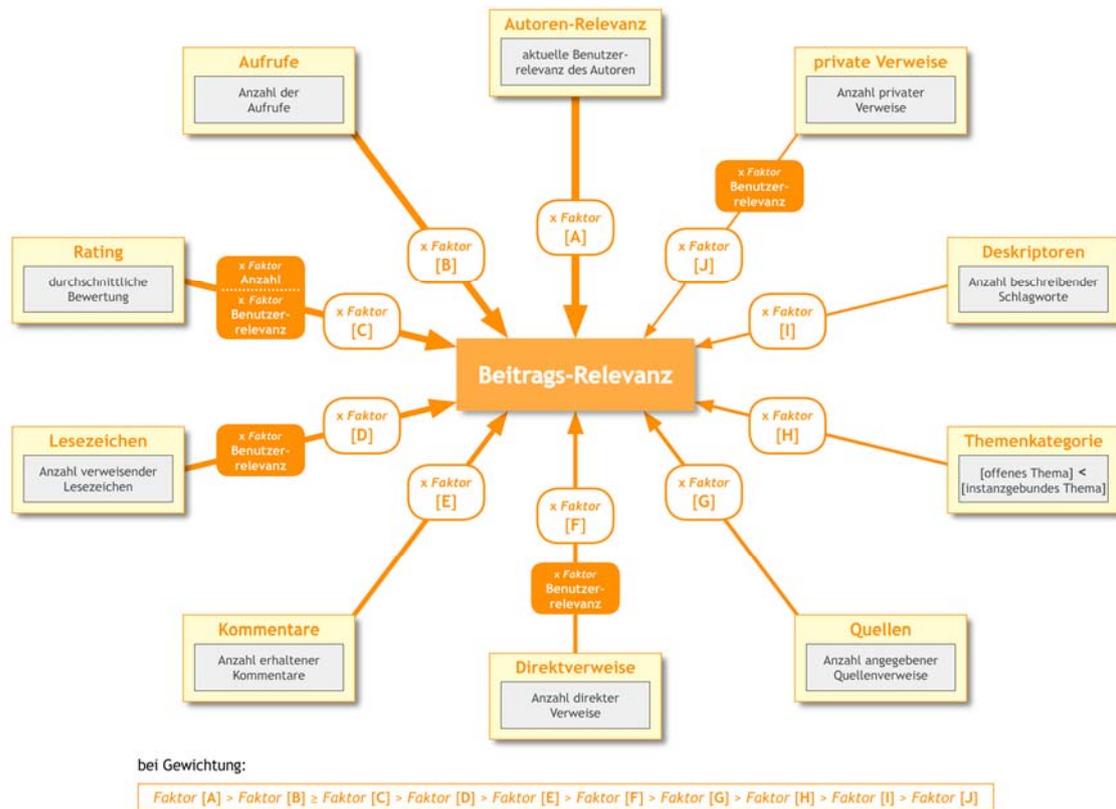


Abb. 2: Dynamische Beitrags-Relevanzierung.

2.3.2 Auswertung

Der Aufbau des semantischen Netzes erfolgt in mehreren operativen Verarbeitungszyklen. Zunächst werden bestehende physikalische Verknüpfungen veröffentlichter Beiträge ausgewertet. Diese direkten Verknüpfungen bestehen über mehrere sekundäre Kataloge auf Basis syntaktischer (Schlagwortverzeichnis), inhaltsbezogener (Themenrubriken, Projekträume, Quellenverweise) oder benutzerverhaltensbezogener Referenzierungen (Benutzerverläufe, Lesezeichen, Bewertungen, Direktverweise, Rubrikenabonnements, Mitgliedschaften). Eine Verknüpfung zwischen zwei Beiträgen ist dann gegeben, wenn beide denselben Eintrag eines sekundären Katalogs referenzieren. Die Auswertung des ersten Teilschritts führt zu bidirektionalen bzw. symmetrischen Zwischenergebnissen [$a \Rightarrow b$ ist gleich $b \Rightarrow a$], da lediglich die absolute Anzahl bestehender Verknüpfungen zwischen Beitrags-Paaren aufsummiert wird. Bei verhaltensbezogenen Sekundärkatalogen werden in den Ergebnissen zudem auch die Relevanzen der entsprechenden Benutzer berücksichtigt. Im zweiten Schritt erfolgt die Einbeziehung der qualitativen Komponente, bei welcher der ganzzahlige, bidirektionale Wert durch die Einbeziehung der Beitragsrelevanzen

in ein monodirektional differenziertes Ergebnispaar umgewandelt wird [$a \Rightarrow b$ ist ungleich $b \Rightarrow a$, wenn *Relevanz a* ungleich *Relevanz b*]. Im letzten Teilschritt werden schließlich auch alle indirekten Verknüpfungen zwischen Beiträgen ausgewertet. Durch transitive Kettenschlüsse werden dabei die vorangegangenen Ergebnisse präzisiert und auch Relationen zwischen Beiträgen einbezogen, welche über keine direkte Verknüpfung verfügen [wenn $a \Rightarrow b$ und $b \Rightarrow c$, dann $a \Rightarrow (b \Rightarrow c)$].

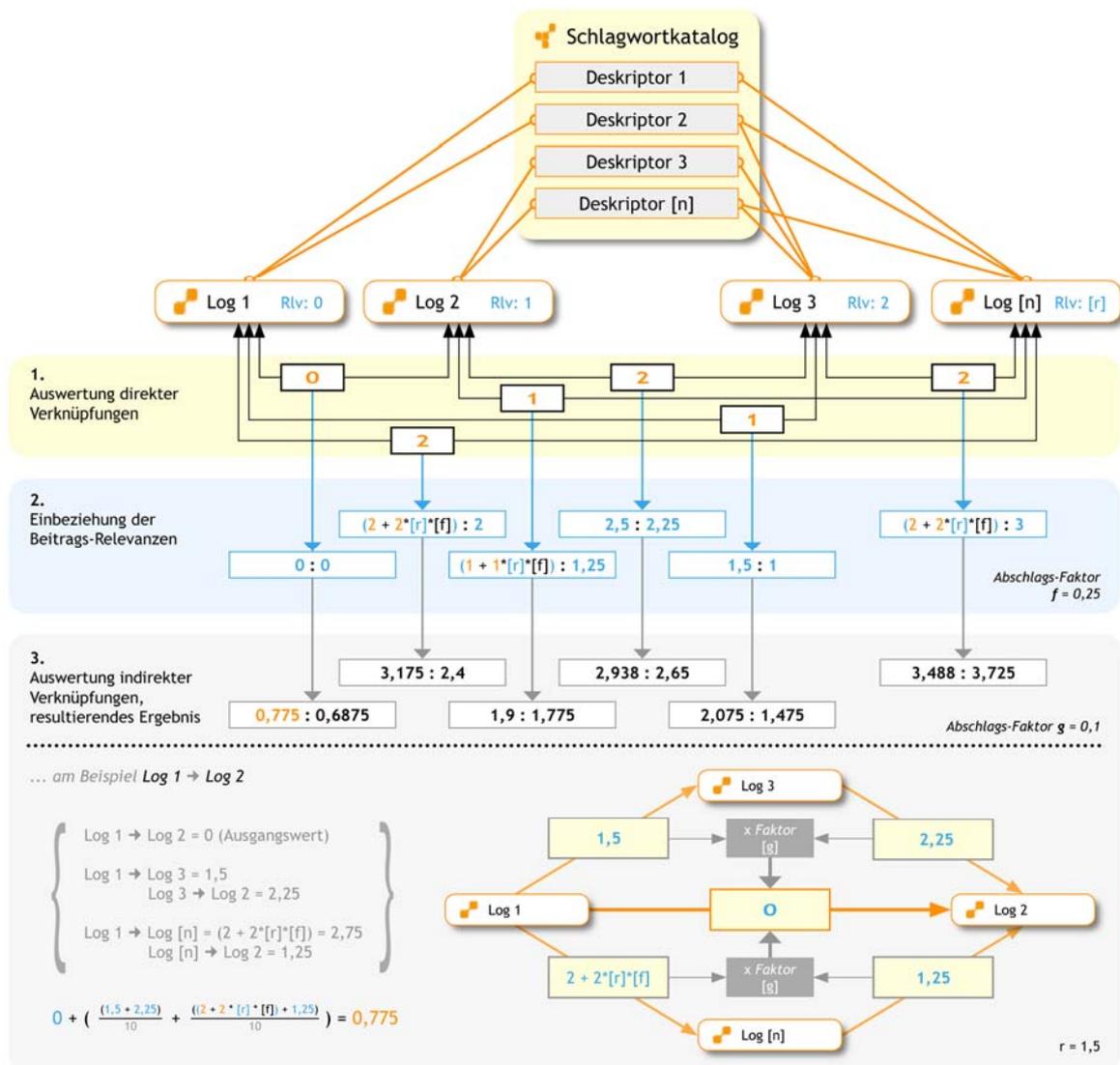


Abb. 3: Auswertung der Verknüpfungen von Beiträgen am Beispiel ihrer Verschlagwortung.

Sind die Beitragsvernetzungen auf Basis der einzelnen Sekundärkataloge entsprechend ausgewertet, können sie in einer abschließenden Rechenoperation zu einem integrierten Netz zusammengefasst werden. Dabei werden die Einzelergebnisse zunächst mittels Mul-

tiplikation iterativ zu präzisierender Faktoren gemäß der Priorität ihrer Sekundärkataloge gewichtet. Die resultierenden aggregierten Werte sollten schließlich die Wahrscheinlichkeit, bzw. den Grad ihrer inhaltlichen Übereinstimmung möglichst zutreffend beschreiben.

2.3.3 Dynamisches Redaktionssystem

Durch eine verteilte, hierarchisierte Administration kann zum einen der zentrale Verwaltungsaufwand deutlich verringert, zum anderen für eine schnellere Verbreitung gesorgt und eine höhere Diversifikation der Inhalte begünstigt werden. Eine hohe Dynamik des inhaltlichen Wachstums soll zudem durch eine verteilte dynamische Redaktion und Moderation unterstützt werden. Dies ist ohne einen zusätzlichen administrativen Aufwand zu erreichen, indem jedem Teilnehmer die Möglichkeit zur selbstständigen Qualifizierung gegeben wird. Je größer die Relevanz eines Benutzers, welche sich an der Qualität und Quantität seines Beitrags bemisst, bewertet wird, desto mehr Privilegien werden ihm zugestanden; sinkt seine Relevanz, beispielsweise durch vandalistisches Verhalten, werden ihm entsprechend bereits verfügte Rechte wieder entzogen.

2.4 Systemarchitektur

Die Webanwendung soll mittels hybrider Drei-Schichten-Architektur als verteiltes System implementiert werden. Ihre Präsentationsschicht bzw. das grafische Benutzer-Frontend soll zum Zwecke der intuitiven Bedienbarkeit als interaktive, Desktop-ähnliche Oberfläche gestaltet werden. Dies ist durch den Einsatz von *Ajax (Asynchronous JavaScript and XML)*, der Schlüsseltechnologie des *Web 2.0*, möglich. Ajax gestattet die Darstellung und Verarbeitung komplexere Inhalte im Web bei einer gleichzeitigen Steigerung der Performanz, da einzelne Steuerelemente und bestimmte Daten einer Webseite gezielt geladen werden können, ohne dass dabei ihr kompletter Neuaufbau erforderlich wird [9].

Die konsistente Abbildung komplexer Ontologien eines skalierbaren semantischen Informationsnetzes erfordert ein polyhierarchisches Datenmodell. Dieses wird in der zentralen Datenhaltungsschicht mittels eines ausreichend performanten und skalierbaren *Datenbankmanagementsystems (DBMS)* abgebildet. Für die Zusammenführung sozial-kollaborativer Ansätze des *Web 2.0* mit Methoden zur semantischen Wissensvernetzung wurden die Begriffe *Social Semantic Web* oder *Web 3.0* etabliert [10].

3 Fazit und Ausblick

Umfassende, direkt zugängliche und durch eine strukturierte thematische Klassifizierung und semantische Vernetzung schnell und effizient recherchierbare Informationssammlungen brächten allen Akteuren an Hochschulen und Forschungseinrichtungen einen nachhaltigen Nutzen bei der Bewältigung ihrer Aufgaben. Durch die Bereitstellung einer zentralen kollaborativen Software-Plattform zum Austausch veranstaltungs-, projekt- oder objektbezogener Inhalte könnte zudem die mit den Prozessen in Forschung, Lehre und Studium verknüpfte intra- und interdisziplinäre Kommunikation, die projektbegleitende Organisation von Gruppen, die Koordination verteilter Aufgaben, sowie auch das persönliche Informationsmanagement deutlich erleichtert werden.

Eine konkrete Umsetzung ist mit den heute zur Verfügung stehenden Informationstechnologien vollständig realisierbar. Ein reibungsloser Betrieb bei einer breiten Partizipation erforderte jedoch hochperformante backendseitige Infrastrukturen, welche sich am effizientesten durch eine Zusammenlegung verteilter Rechnerkapazitäten (*Grid-Computing*) erreichen ließe.

Literaturverzeichnis

- [1] P. Hitzler, M. Krötzsch, S. Rudolph, and Y. Sure. *Semantic Web – Grundlagen*. 2008.
- [2] <http://www.w3.org/RDF>
- [3] <http://www.w3.org/TR/owl-semantic>
- [4] A. Ebersbach, M. Glaser, R. Heigl, and A. Warta. *Wiki – Web Collaboration*. 2008.
- [5] http://iasl.uni-muenchen.de/discuss/lisforen/Eberhardt_Softwaretest.html
- [6] <http://de.wikipedia.org/wiki/E-mail>
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Personal_information_management
- [8] http://en.wikipedia.org/wiki/Project_management_software
- [9] J. Gamperl. *Ajax. Galileo* 2006.
- [10] A. Blumauer, T. Pellegrini (Hrsg.). *Social Semantic Web. Web 2.0 – was nun?* 2009.

Unterstützung der Arbeitsvorbereitung im Baubetrieb durch Prozess-Simulation

Mikko Börkircher

*Rheinkalk GmbH, Am Kalkstein 1, 42489 Wülfrath, Deutschland,
E-mail: mikko.boerkircher@rheinkalk.de, Telefon: +49(0)2058/173757*

Gert Zülch

*Universität Karlsruhe, Institut für Arbeitswissenschaft und
Betriebsorganisation, 76128 Karlsruhe, Deutschland,
E-mail: gert.zuelch@ifab.uni-karlsruhe.de, Telefon: +49(0)72 1/6084250*

Kurzfassung

Obwohl die Bauwirtschaft immer noch zu den wichtigsten Sektoren der bundesdeutschen Wirtschaft gehört und einer ihrer Konjunkturmotoren ist, liegt sie weitgehend im Schatten der organisatorischen Forschung. Es lässt sich der Eindruck gewinnen, dass in einer auf industrielle Großbetriebe und Wachstumssektoren fixierten Öffentlichkeit und Forschung die „Altindustrie“ Bauwirtschaft mit ihren vielen Klein- und Mittelbetrieben als wenig interessant gilt. Dies ist aber weder quantitativ noch qualitativ berechtigt, wie am Beispiel einer Prozess-Simulation aus dem Baubetrieb aufgezeigt wird.

Stichworte

Arbeitsvorbereitung, Baubetrieb, Bauablauf, Prozess-Simulation, Störungen

1 Unsicherheit in der Bauplanung

Die Bauausführung stellt einen sehr dynamischen Produktionsprozess dar, der auf exogene und endogene Veränderungen [1] reagieren muss. Eine große Unsicherheit für den Bauplaner in einem Bauunternehmen besteht darin, ob der geplante Bauablauf zur Erreichung der Unternehmensziele geeignet ist beziehungsweise ob die Ziele überhaupt erreicht werden können, die – aufgrund von Einflussgrößen wie Bauablaufstörungen – ständig auf den Bauablauf einwirken. Vor diesem Hintergrund gaben in einer wissenschaftlichen Studie zu Zukunftsstrategien der deutschen Bau- und Anlagenbauindustrie

nahezu 95 % der befragten Bauunternehmen an, dass sie durch eine ständige Überwachung sämtlicher Risiken eine Effizienzsteigerung erwarten [2].

Die Bauindustrie sieht sich mit ihren überwiegend tradierten Verfahren und Organisationsprozessen großen Planungsunsicherheiten gegenüber. Bei der planerischen Berücksichtigung der im Bauablauf auftretenden Probleme wird oft die Frage gestellt, inwiefern die Kenntnisse und Verfahren aus anderen Industriebereichen übernommen werden können. Vor diesem Hintergrund rücken die im Bereich der Stückgüterindustrie gewonnenen Erfahrungen mit weiterführenden Planungsinstrumenten in den Blickpunkt. Ein Ansatz, der sich im Bereich der Stückgüterindustrie vielfach bewährt hat, ist die Simulation von Produktionsabläufen, mit deren Hilfe quantitative Prognosen über die zu erwartende Produktionssituation sowie die Effektivität des Ressourceneinsatzes erstellt werden können [3].

2 Möglichkeiten der Prozess-Simulation

In der Entwicklung eines neuartigen, simulationsbasierten Verfahrens wird ein geeigneter Ansatz gesehen, um die Planung des Fertigungssystems „Baustelle“ besser zu unterstützen und die Leistungsfähigkeit eines Bauunternehmens zu analysieren (siehe Abb. 1 zum Aufbau des Verfahrens).

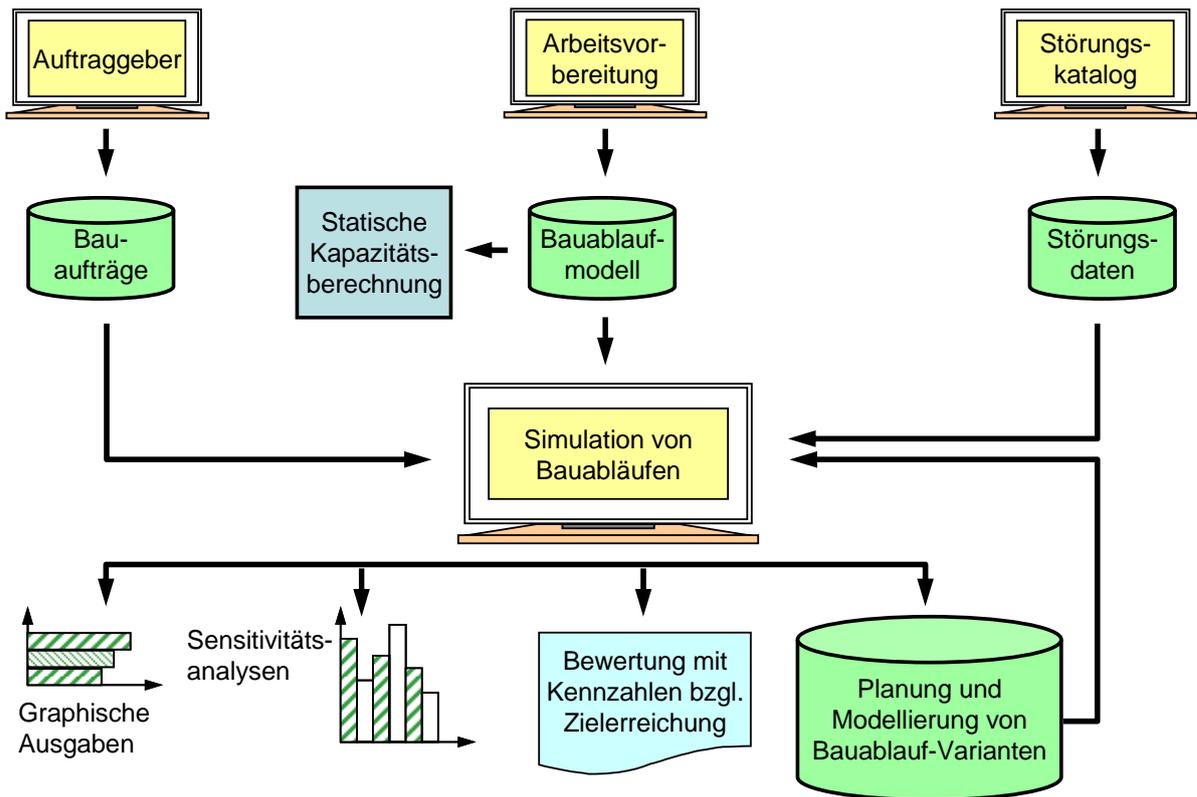


Abb. 1: Aufbau des Simulationsverfahrens (in Anlehnung an Zülch [4]).

Dem Bauplaner kann damit ein Instrumentarium an die Hand gegeben werden, mit dem er bereits im Planungsstadium mögliche Risiken im Bauablauf erkennen kann und das ihm aufzeigt, welche Folgen sich aus Bauablaufstörungen ergeben können. Daraus kann er Rückschlüsse für die Arbeitsvorbereitung ziehen, um damit bereits in der Planungsphase mögliche Abhilfemaßnahmen beziehungsweise Ablaufalternativen vorzuhalten. Im Gegensatz zu bisherigen Simulationsanwendungen im Bauwesen ist die Neuartigkeit eines solchen Ansatzes zum Beispiel darin zu sehen, dass reale, aus einem Störungskatalog abgeleitete Bauablaufstörungen als Einflussparameter auf Bauabläufe modellhaft berücksichtigt werden. Der Störungskatalog basiert auf einer Access-Datenbank und gibt Bauunternehmen die Möglichkeit, Bauablaufstörungen strukturiert und systematisch zu erfassen beziehungsweise zu dokumentieren. Hieraus lassen sich dann in Simulationsexperimenten Störungsszenarien generieren und deren Auswirkungen auf den geplanten Bauablauf (Ausgangsmodell) oder daraus abgeleiteten Alternativen aufzeigen. Die Prozess-Simulation liefert dem Bauplaner somit eine Risikoabschätzung des Bauprojekts hinsichtlich Prozesskosten und Durchlaufzeit (beziehungsweise Erstellungszeit) aufgrund von Planungs- und Prozessänderungen, und zwar unter Einbeziehung von Per-

sonalauslastung und Termineinhaltung der Baumaßnahme. Dadurch können Einblicke in den Bauablauf gewonnen werden, die sonst erst während der tatsächlichen Durchführung möglich wären.

3 Modellierung von Bauablauf-Alternativen

Durch die Planung von Abhilfemaßnahmen und ihrer Simulation lässt sich überprüfen, inwieweit ein ursprünglich geplanter Bauablauf gegenüber möglichen Prozessunsicherheiten robuster gemacht werden kann. Dadurch kann eine zielgerichtete Verbesserung der ersten Planungslösung in einem iterativen Prozess stattfinden, wobei die Veränderung des Bauablaufes oder Parameter wie Einsatzzeiten des Personals durch den Bauplaner in das Simulationsmodell eingefügt werden. Diese Vorgehensweise ist durchaus praxisgeeignet, da sie zum einen der bisherigen Herangehensweise eines Bauplaners sehr nahe kommt, zu dessen Alltagsaufgaben es oft gehört, Ablaufalternativen zu entwickeln. Andererseits kann der Bauplaner aufgrund seiner Erfahrung die innerhalb eines bestimmten Ablaufabschnittes zu untersuchenden Alternativen sinnvoll einschränken. Dies ist immer dann anzuraten, wenn die Baumaßnahme sehr umfangreich und komplex ist, der Bauablauf als Ganzes also zu umfangreich und unübersichtlich wäre. Solche in sich abgeschlossene Ablaufabschnitte können zum Beispiel die Fertigung einzelner Bauteile, Geschosse, Bauabschnitte, aber auch zeitliche Unterteilungen (z.B. Rohbau- oder Ausbauphase) sein. Die Entwicklung von Ablaufalternativen sollte dabei aber nicht konzeptlos erfolgen, sondern muss als zielgerichteter, methodisch-systematischer Problemlösungsprozess aufgefasst werden. Dazu stehen dem Bauplaner Verbesserungsmethoden zur Verfügung, die exemplarisch in Abb. 2 aufgelistet sind.

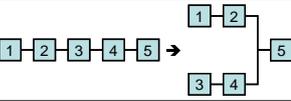
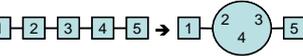
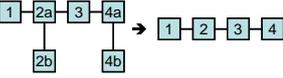
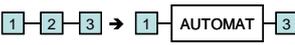
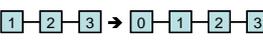
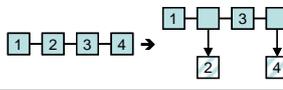
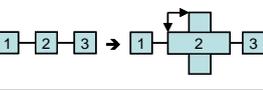
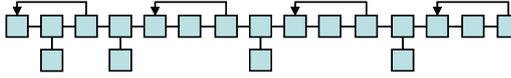
Nr.	Ablaufverbesserung	Schaubild	Nr.	Ablaufverbesserung	Schaubild
1	Änderung von Reihenfolgen		7	Verbessern	
2	Simultan anordnen		8	Streichen	
3	Integrieren		9	Ergänzen	
4	Standardisieren		10	Automatisieren	
5	Beschleunigen		11	Früher beginnen	
6	Outsourcing		12	Flexibilisieren	
13	Verringern der Komplexität				

Abb. 2: Methoden zur Modellierung alternativer Bauabläufe.

4 Objektorientierte Simulationsverfahren OSim-BAU

Aufbauend auf dem am Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation (ifab) der Universität Karlsruhe (TH) entwickelten Simulationsverfahren *O*Sim (*Objekt-Simulator*) [5], wurde das Verfahren *O*Sim-BAU (*Objektsimulator zur bauprozessorientierten Analyse und Unterstützung der Arbeitsvorbereitung im Baubetrieb*) konzipiert und informationstechnisch umgesetzt. Es wurde in der Programmiersprache C++ implementiert und ist unter den Betriebssystemen Windows 98, Windows 2000 und Windows XP verfügbar.

Bei dem Simulationsverfahren *O*Sim-BAU handelt es sich wie bei dem ihm zugrunde liegenden *O*Sim um ein zeitdiskretes, ereignisgesteuertes Verfahren, das einen objektorientierten Ansatz verfolgt. Um dem Anwender von (simulationsbasierten) Planungsinstrumenten eine möglichst einfache Handhabung zu ermöglichen, hat es sich als vorteilhaft erwiesen, Ablaufstrukturen in Form so genannter Durchlaufpläne als spezielle Form eines Netzwerks zu modellieren (vgl. hierzu z.B. Grobel [6]). Die Durchlaufpläne im Baubetrieb umfassen alle zur Bearbeitung eines Bauvorhabens notwendigen Vorgänge

(im engeren Sinne Aktivitäten) in ihrer logischen Abfolge, die durch Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen abgebildet werden.

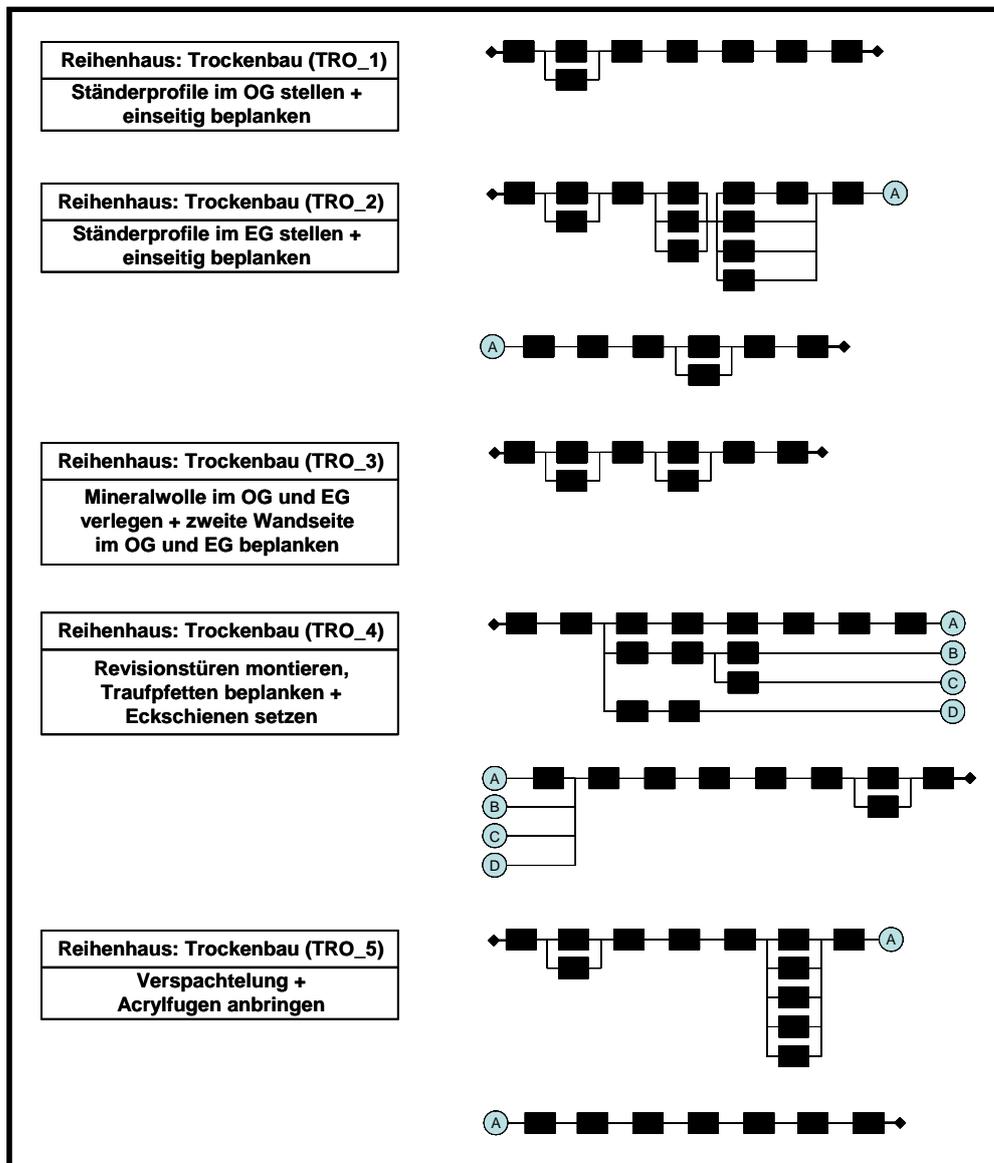


Abb. 3: Durchlaufpläne für das Gewerk *Trockenbau*.

Der zu planende Bauablauf wird vom Benutzer des Verfahrens, zum Beispiel dem Bauplaner, in einem Simulationsmodell abgebildet, indem zusätzlich zu den zeitlich-logischen Abhängigkeiten der sequenziell aufeinander folgenden, parallel bearbeitbaren oder auch alternativ erfolgenden Vorgänge noch weitere Systemelemente, wie zum Beispiel Belegungsressourcen (Personal) mit ihren Attributen (wie zum Beispiel Arbeitszeitregelungen) eingegeben werden (vgl. Zülch und Börkircher [3]). Das Verfahren beschränkt

sich auf die Betrachtung von personellen Ressourcen, da die anschließenden Simulationsuntersuchungen überwiegend im nachgelagerten Bereich von Erd- und Rohbauarbeiten, also vorwiegend im Ausbau durchgeführt werden. In Abb. 3 sind fünf Durchlaufpläne dargestellt, die das Gewerk *Trockenbau* innerhalb eines Reihenhausbaus repräsentieren.

Die Modellierung von Bauablaufstörungen erfolgt über die in Abb. 4 dargestellte Eingabemaske. Das Auftreten nur einer Bauablaufstörung innerhalb eines Bauablaufs ist sehr unwahrscheinlich. Deshalb können neben gezielt modellierten Einzelstörungen (vgl. Abb. 4, Typ a) auch komplexere Störungsszenarien (vgl. Abb. 4, Typ b) analysiert werden. Mit der Auswahl einer bestimmten Kante eines Durchlaufplanes und der Zuordnung einer verteilten Vorgangsdauer kann zum Beispiel eine materialbedingte Störung (fehlerhafte Lieferung Beton auf Baustelle) vom Typ a definiert werden.

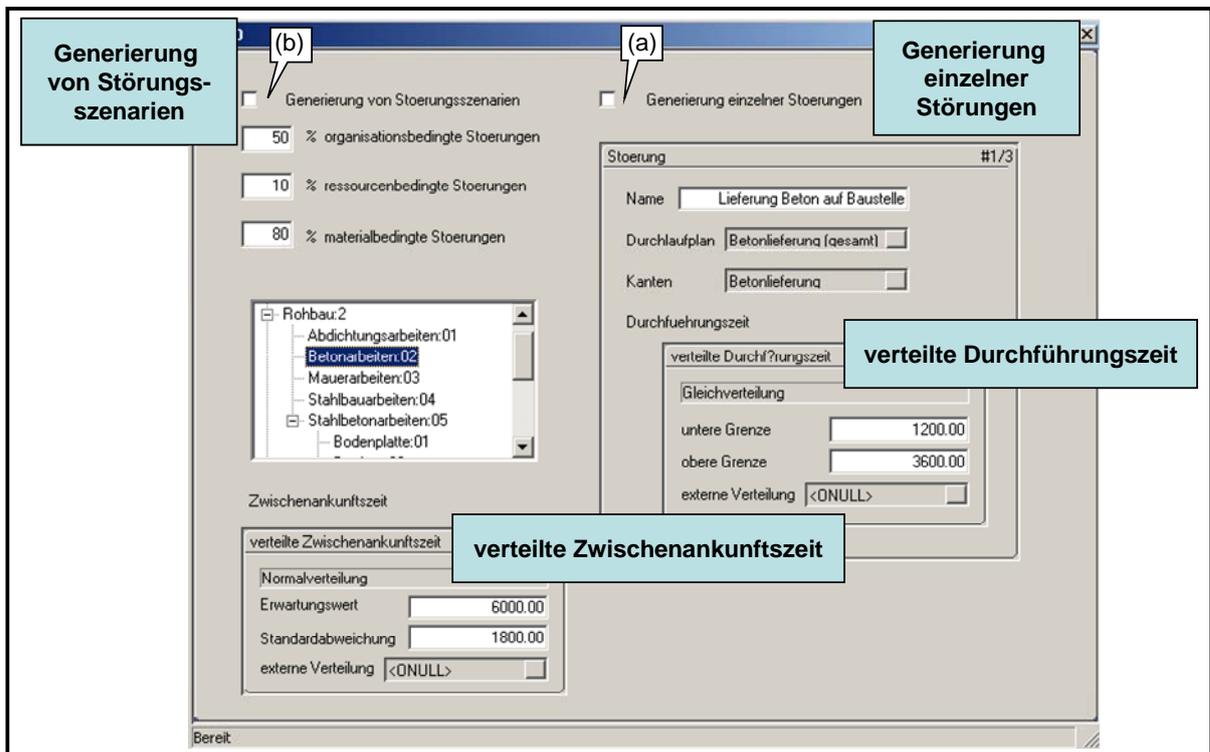


Abb. 4: Modellierung von Bauablaufstörungen in OSim-BAU.

Der Typ b einer Störung wird durch die Angabe einer Prozentzahl für eine organisations- (beziehungsweise prozess-), ressourcen- oder materialbedingte Störung (zum Beispiel bezogen auf einen definierten Abschnitt eines Bauprojekts) parametrisiert. Gemäß den Parameterangaben werden während der Simulation dann Bauablaufstörungen „zufällig“

erzeugt. Anzahl und Art der erzeugten Störungen können nach dem jeweiligen Simulationslauf im Durchlaufplaneditor von OSim-BAU entnommen werden.

Weiterhin besteht bei dieser Art der Störungsgenerierung die Möglichkeit, bei Bedarf den Untersuchungsbereich einer anschließenden Simulationsstudie einzuschränken. Dies wird durch die Auswahl eines oder mehrerer Gewerke, die in Form einer Baumstruktur dargestellt sind, ermöglicht. Die Baumstruktur der Gewerke baut sich automatisch aufgrund der dem Simulationsverfahren OSim zugrunde liegenden Metaklassenstruktur auf. Sollte sich der „Gewerkekatalog“ aufgrund einer weitergehenden Modellierung erweitern, wird diese Information automatisch erkannt und dem Benutzer zur Modellierung von Bauablaufstörungen angeboten.

5 Simulationsuntersuchung von Störungsszenarien

Mit dem konzipierten Simulationsverfahren werden der Arbeitsvorbereitung vielfältige Untersuchungsmöglichkeiten eröffnet. Einige davon sind nachfolgend aufgelistet:

5.1 Analyse der Abhängigkeit zwischen einem geplanten Bauablauf und den Auswirkungen verschiedener Störungsszenarien

Hierbei wird der Einfluss von unterschiedlich stark variierten Störungsparametern, nämlich Dauer (betaverteilt) sowie Zwischenankunftszeiten (normal-, gleich- oder betaverteilt), dreier Störungskategorien (Prozess-, Personal- und Materialstörungen) auf einen Bauablauf aufgezeigt. Anhand von Sensitivitätsanalysen wird untersucht, wie empfindlich das Fertigungssystem "Baustelle" auf eine Streuung der Parameter reagiert, und dies unter Heranziehung von bauphysikalischen und monetären Bewertungskriterien. In Abb. 5 wird beispielhaft veranschaulicht, wie sich der Zielerreichungsgrad Durchlaufzeit (prozentuale Annäherung der Durchlaufzeit an einen Idealzustand; ein Zielerreichungsgrad kann eine Ausprägung zwischen 0 und 100% annehmen, wobei 100% den Idealzustand darstellt) bei einem steigenden Anteil von Personalstörungen bezogen auf eine Soll-Durchlaufzeit verändert, bei einem sonst konstanten Prozentsatz an Prozess- und Materialstörungen während eines Bauabschnittes (vgl. Abb. 5).

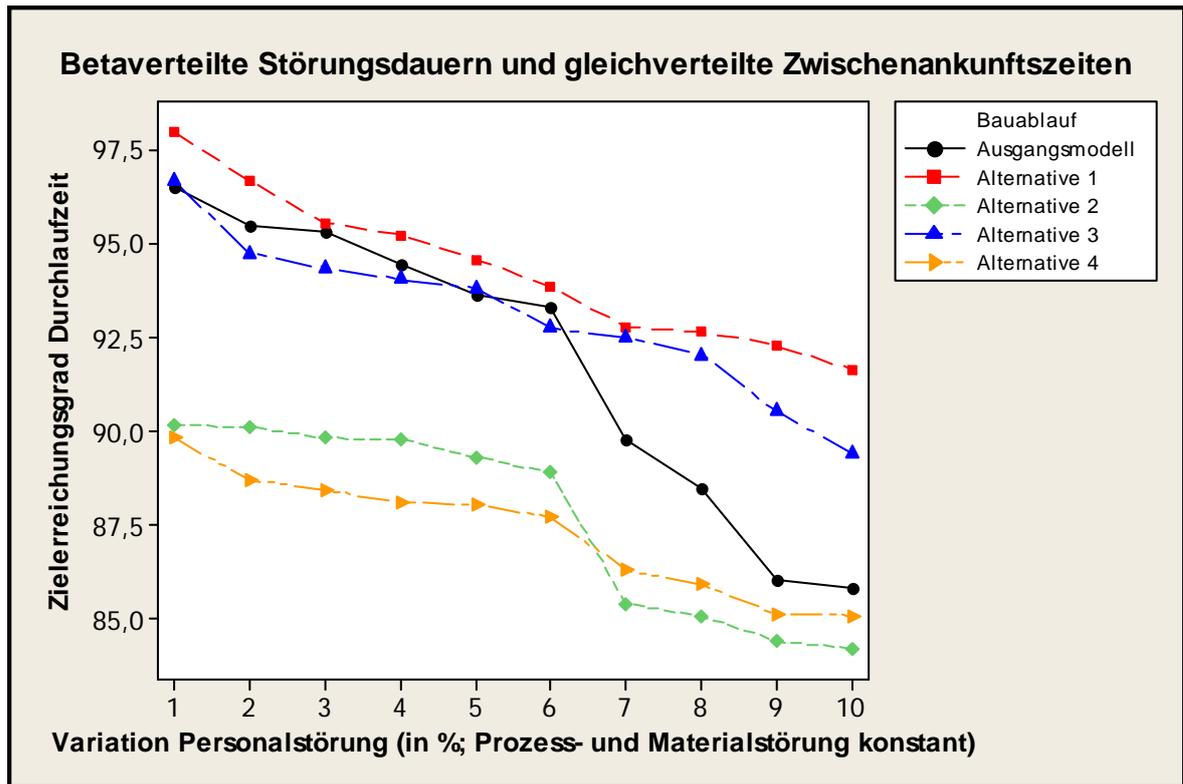


Abb. 5: Beispiel eines Simulationsergebnisses.

5.2 Untersuchung der Störungsrobustheit technologisch gleichwertiger Ablaufalternativen bei denselben Störungsszenarien

Durch die Planung von Alternativen zu einem ursprünglich geplanten Bauablauf wird eine Aussage darüber möglich, inwieweit die (dynamische) Robustheit eines Bauvorhabens erhöht werden kann beziehungsweise wie stark dann der Einfluss von Störungen ist. In Erweiterung zum erst genannten Untersuchungspunkt werden hier Variationskoeffizienten für Input- und Output-Variablen gebildet und miteinander verglichen. Der Input bezieht sich auf die Systembelastung durch variierende Bauablaufstörungen, der Output auf bauphysikalische und monetäre Zielkriterien. Der Variationskoeffizient ergibt sich aus dem Verhältnis von Standardabweichung zu Mittelwert der jeweiligen Variablen. Wenn der Variationskoeffizient der Input-Variablen größer oder gleich dem Variationskoeffizienten der Output-Variablen ist, dämpft der betrachtete Bauablauf das Systemverhalten im Sinne einer erhöhten Robustheit. Ist der Variationskoeffizient der Input-Variablen hingegen kleiner als der Variationskoeffizient der Output-Variablen, deutet dies darauf hin, dass der Bauablauf weniger robust ist beziehungsweise empfindlich reagiert.

In Abb. 6 sind die Ergebnisse von vier Bauablauf-Alternativen im Vergleich zum Ausgangsmodell dargestellt, welche jeweils unter 1000 generierten Störungsszenarien untersucht wurden. Es wird deutlich, dass bei den Varianten 1 und 3 alle Zielkriterien gegenüber dem Ausgangsmodell verbessert werden. Zusätzlich wird die Abweichung des Variationskoeffizienten der beiden Output-Variablen Prozesskosten und Termintreue des Ausgangsmodells mit denen der Modellvarianten verglichen und die jeweilige Erhöhung (das heißt der Variationskoeffizient des Ausgangsmodells ist im Gegensatz zur Alternative geringer) sowie Verringerung der einzelnen Variationskoeffizienten dargestellt. Daraus ist zu schließen, dass die Zielkriterien bei allen Alternativen sowie dem Ausgangsmodell stärker variieren beziehungsweise streuen als bei Alternative 1, welche damit als eine neue Planungslösung ausgewählt werden sollte.

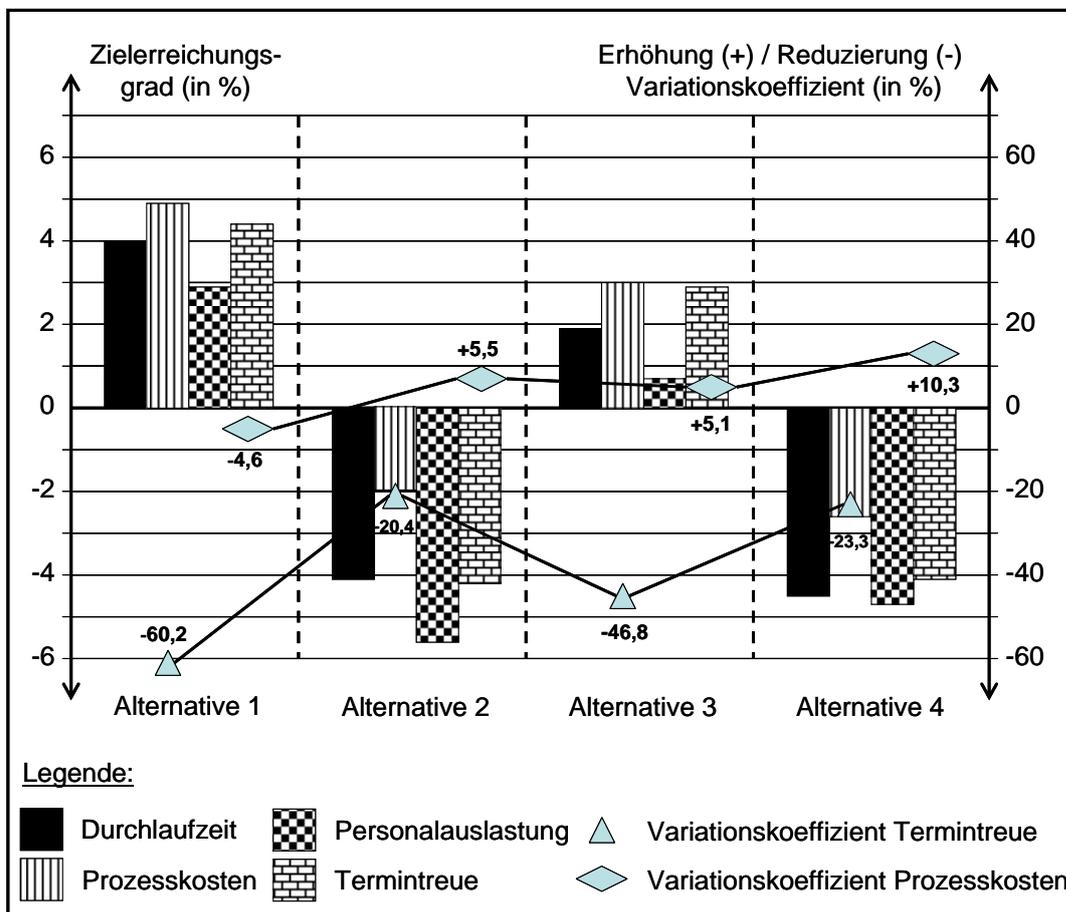


Abb. 6: Vergleich von Bauablauf-Alternativen zum Ausgangsmodell.

5.3 Bestimmung der Komplexität eines Bauablaufs anhand der beiden Kennzahlen Vernetzungsgrad und Parallelitätsgrad

Hierbei beschreibt der Vernetzungsgrad die Anzahl der Anordnungsbeziehungen (im Sinne der Summe der Anzahl Vorgänger und Nachfolger eines Arbeitsvorgangs) innerhalb einer Bauablauf-Alternative, bezogen auf die Gesamtzahl der darin insgesamt enthaltenen Vorgänge. Der Parallelitätsgrad charakterisiert den Umfang, in dem parallele Vorgänge eingeplant, aber auch sequenziell durchgeführt werden können. Unter Hinzuziehung beider Kennzahlen kann ein Zusammenhang zwischen der Netzstruktur eines Bauablaufs und seiner Robustheit abgeleitet werden (siehe Grobel [6] zur Definition der Kennzahlen).

6 Weiterführung des Simulationsansatzes

Im Mittelpunkt dieses Beitrags stand die Anwendung eines Verfahrens, das zur Modellierung und Simulation von Bauabläufen mit und ohne Bauablaufstörungen eingesetzt werden kann. Es bietet dem Bauplaner eine Hilfestellung, um bereits in der Phase der Arbeitsvorbereitung Auswirkungen auf zukünftige Bauabläufe systematisch zu analysieren. Dabei wird nicht durch einen iterativen Verbesserungsprozess – wie er bei vielen Simulationsstudien zu finden ist – versucht, einen möglichst „guten“ Bauablauf aus vorgefertigten Bausteinen sukzessive zu generieren. Im Gegensatz dazu, werden bereits in der Arbeitsvorbereitung alternative Bauabläufe geplant, um möglichst zielgerichtet auf eventuell auftretende Störungen reagieren zu können.

Durchgeführte Untersuchungen mit dem Verfahren zeigen, dass es für das logistische und monetäre Gelingen einer Baustelle notwendig ist, die Stochastik von Bauablaufstörungen realitätsnah mit in die Planung einzubeziehen. Der Ansatz ermöglicht ein besseres Verständnis der dynamischen Zusammenhänge und Wechselwirkungen, die sich aus Störungen im Bauablauf ergeben können. Bauplaner können damit die Dynamik des Fertigungssystems „Baustelle“ sowie Best-Case- und Worst-Case-Szenarien untersuchen.

Ähnlich der in der Produktion eingesetzten *OEE-Kennzahl* (*Overall Equipment Effectiveness*; vgl. zum Beispiel Hansen [7]), die zur Bewertung der Effektivität von Produktionsanlagen dient, können die aus der Simulation generierten Kennzahlen zur Leistungsfähigkeit eines Bauunternehmens beziehungsweise einer Baustelle herangezogen werden. Die Angabe von Prozentwerten für die in diesem Beitrag erwähnten baulogistischen und monetären Kennzahlen kann verglichen werden mit dem Cockpit eines Fahrzeugs: Zu jedem Zeitpunkt einer Bauproduktion hat der Bauplaner, ähnlich einem Fahrzeuglenker,

alle für ihn relevanten Betriebsdaten auf einem Blick und kann somit (vorausschauend) gegenlenken (vgl. Abb. 7). Auf diese Weise können die verschiedensten Plan- beziehungsweise Zielabweichungen deutlich gemacht und Maßnahmen zur Verbesserung eingeleitet werden.

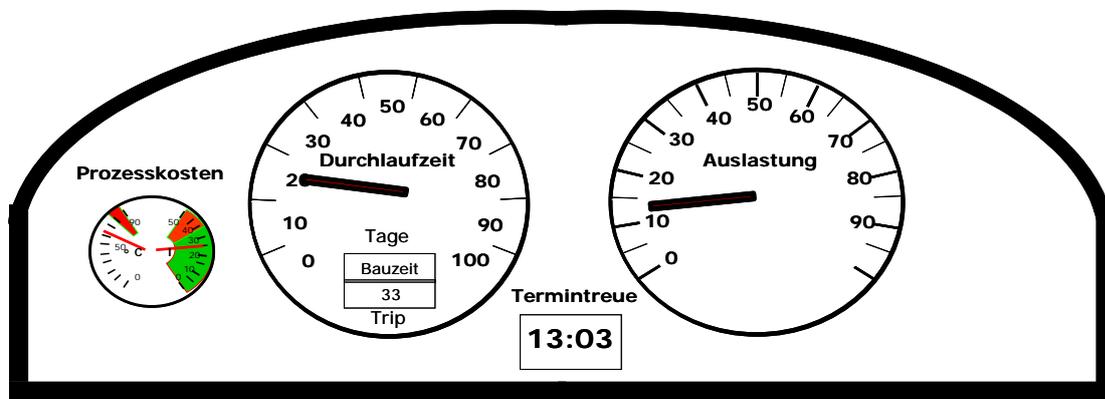


Abb. 7: Kennzahlen- und Management-Cockpit für den Baubetrieb.

Literaturverzeichnis

- [1] REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation (Hrsg.): *Planung und Steuerung, Teil 1. Methodenlehre der Betriebsorganisation*. 1991.
- [2] M. Seefeldt und S. Pekrul. *Zukunftsstrategien der Bauindustrie. Ein Vergleich mit der Anlagenindustrie*. 2005.
- [3] G. Zülch und M. Börkircher. *Simulationsbasierte Untersuchung zur Kooperation im Baubetrieb*, in: H. Wojda und A. Barth (Hrsg.). *Innovative Kooperationsnetzwerke*. 2006. pp. 273-294.
- [4] G. Zülch. *Einbeziehung der Arbeitsorganisation in die Simulation von Produktionsstrukturen - ein neuer Ansatz zur Unterstützung einer ganzheitlichen Fabrikplanung*, in: VDI-Gesellschaft *Produktionstechnik (ADB)* (Hrsg.). *Rechnergestützte Fabrikplanung '92*. VDI-Berichte 949. 1992.
- [5] U. Jonsson. *Ein integriertes Objektmodell zur durchlaufplanorientierten Simulation von Produktionssystemen*, Karlsruhe Uni: *Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation*. ifab *Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe*, Band 21. 2000.
- [6] T. Grobel. *Simulation der Organisation rechnerintegrierter Produktionssysteme*, Karlsruhe Uni: *Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation*. ifab *Forschungsberichte aus*

*dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe,
Band 3. 1992.*

- [7] R. C. Hansen. *Overall Equipment Effectiveness (OEE)*. 2005.

nuBau – Methoden der nutzerorientierten Bausanierung

Jörg Braunes

Bauhaus-Universität Weimar, Professur Informatik in der Architektur, 99423 Weimar, Deutschland, E-mail: joerg.braunes@uni-weimar.de, Telefon: +49(0)3643/584236

Kurzfassung

Bauvorhaben im Altbau sind gekennzeichnet durch eine im Lebenszyklus des Gebäudes gewachsene und oftmals einzigartige Informationsbasis. Die heutige Praxis und die bisherige informationstechnische Unterstützung sind durch eine sequentielle Arbeitsweise und damit isolierte Betrachtung und Unterstützung von einzelnen Teilaspekten gekennzeichnet. Insbesondere die Verwaltung von Daten verschiedener am Projekt beteiligter Fachdisziplinen ist derzeit nicht gelöst. Während im Neubaubereich sich der Einsatz von digitalen Bauwerksmodellen (BIM) immer weiter etabliert, sind solche Modelle auf Grund ihrer mangelnden Flexibilität in der Bestandsplanung derzeit unzureichend. Gerade bei der Sanierungsplanung gilt es eine Vielzahl unterschiedlicher Informationen, angefangen von der Geometrie über Mängel und Zustände bis zu spezifischen Bauteileigenschaften, zu sammeln und effektiv zu verwalten. Im Rahmen eines aktuellen Forschungsprojektes an der Bauhaus-Universität Weimar, wird daher der Einsatz eines digitalen Bauwerksmodells vorgeschlagen, welches die Daten verschiedenster am Bau beteiligter Fachdisziplinen verwaltet. Der Artikel gibt zunächst einen Überblick über die Schwerpunkte des Forschungsprojektes und beleuchtet anschließend Konzepte der dynamischen Datenverwaltung in einem Bauwerksmodell und Möglichkeiten der Integrationen verschiedenster Methoden der Baudiagnostik.

Stichworte

Bauen im Bestand, Bausanierung, digitale Bauwerksmodelle, Baudiagnostik

1 Nutzerorientierte Bausanierung

Das Bauen im Bestand ist in zunehmendem Maße ein wichtiges Tätigkeitsfeld für Architekten und Ingenieure. Bereits heute sind mehr als die Hälfte aller Tätigkeiten in der Objektplanung in den Bereichen Sanierung, Umbau und Modernisierung angesiedelt [1].

Vor diesem Hintergrund hat sich das Forschungsvorhaben „nuBau – Methoden und Baustoffe zur nutzerorientierten Bausanierung“, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung, zum Ziel gesetzt, innovative Methoden und Verfahren für die Planung und Durchführung von Bauvorhaben im Bestand zu entwickeln. Nutzerorientierte Bausanierung bedeutet eine gegenüber dem herkömmlichen Vorgehen deutlich stärkere Ausrichtung des Planungs- und Sanierungsprozesses sowohl auf die Anforderungen der am Bau Beteiligten als auch der Gebäudenutzer.

Das Vorhaben wird als Gemeinschaftsprojekt der Bereiche Informatik in der Architektur, Bauphysik sowie Materialentwicklung und Prüfung durchgeführt. Einen wesentlichen Schwerpunkt der Forschung bilden dabei die Vernetzung der einzelnen Fachbereiche und die Schaffung einer gemeinsamen Datenbasis für alle planungs- und ausführungsrelevanten Informationen in Form eines digitalen Bauwerksmodells.

2 Bauaufnahme und Bauwerksdiagnostik

Voraussetzung für eine gesicherte Planung im Bestand sind entsprechende Kenntnisse zum Ist-Zustand des Gebäudes. In der Regel liegen jedoch beispielsweise frühere Planungs- und Ausführungsunterlagen nicht mehr vor oder befinden sich nicht, wie gefordert, auf einem aktuellen Stand. Aufgrund dieser Tatsache muss eine Bestandsaufnahme durchgeführt werden, die entweder eine Ergänzung, Prüfung oder vollständige Neuanlage der Planungsunterlagen zum Ziel hat. Eine auf die Planung abzielende Bestandsaufnahme beinhaltet dabei neben der Erfassung der Gebäudegeometrie auch die Aufnahme von Zuständen, spezifischen Schäden und Mängeln sowie baustoffliche und bauphysikalische Kennwerte.

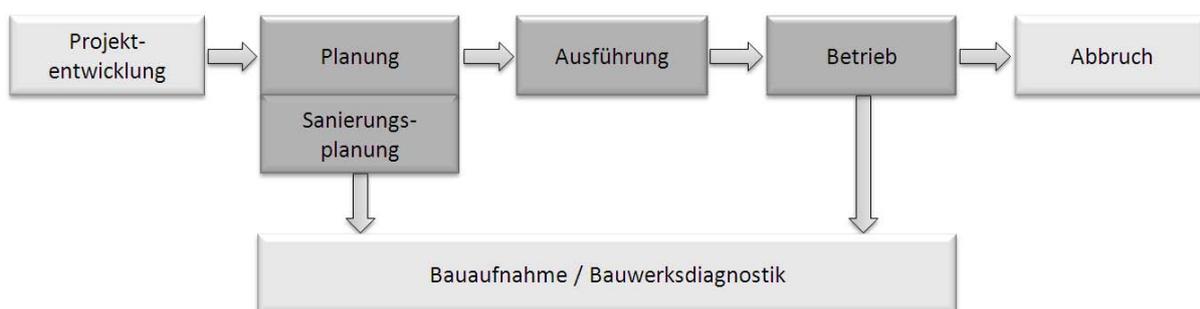


Abb. 1: Bauaufnahme und Bauwerksdiagnostik innerhalb des Gebäudelebenszyklus.

Eine wesentliche Zielstellung des Projektes ist daher, die Ergebnisse dieser Bauaufnahme und Bauwerksdiagnostik allen Fachplanern in adäquater Form zur Verfügung zu stellen, um während der Planung auf identifizierte Problemstellen reagieren zu können, denn aus den Versäumnissen einer detaillierten Untersuchung entstehen die meisten Konflikte in der Planung im Bestand. Ergebnisse sind dissonante Bauvorbereitung, Informationsverluste im Bauablauf und Terminverzögerungen sowie Kostennachträge durch den damit provozierten Nachplanungsbedarf während der Bauphase [2].

3 Computergestützte Bauaufnahme

Mittlerweile hat sich eine Vielzahl von kommerziellen Produkten zur computergestützten Bauwerksaufnahme auf dem Markt etabliert. Die Systeme unterstützen vor allem die geometrische Erfassung mit den Techniken computergestützten Handaufmaßes, Tachymetrie, Photogrammetrie und in zunehmendem Maße terrestrischen Laserscannings. Die tendenzielle industrielle Entwicklung zielt auf die Verbesserung der Basistechnologien für eine effizientere und damit kostengünstigere Geometrieerfassung.

Obwohl die flexible Kombination verschiedener Aufmaßtechniken je nach gegebener Situation sinnvoll und notwendig ist, stellen marktübliche Applikationen in der Regel Insellösungen für spezielle Techniken dar.

Eine Bauaufnahme geschieht in der Regel in verschiedenen Schritten. In den frühen Stadien der Bauaufnahme (Vorbereitung und Durchführung der Erstbegehung) gewinnt der Aufnehmende einen ersten Eindruck über das zu erfassende Bauwerk: Räumliche Gliederung, allgemeiner Zustand der Bauteile sowie sichtbare Schäden und Mängel. Ebenso können Konstruktionsprinzipien und verwendete Materialien bereits abgelesen werden.

Dieser erste Eindruck nimmt bereits Einfluss auf den späteren Planungsprozess, da bereits erste Entscheidungen über mögliche Umbaumaßnahmen des Bauwerkes getroffen werden können. Aus diesen Entscheidungen resultieren Festlegungen, welche Informationen in den folgenden Schritten der Bauaufnahme und Bauwerksdiagnostik vor Ort detailliert erfasst werden müssen. Dabei handelt es sich nicht um einen streng sequentiellen Prozess: Auch iterative Rückkopplungen zwischen den verschiedenen Schritten der Bauaufnahme und Planung sind zu beachten und zeigen so ein eher zyklisches Prozessmodell auf.

Ausgehend von diesen Überlegungen wird im Rahmen des Projektes folgende Vorgehensweise propagiert:

- Der Aufnehmende erfasst zunächst die räumliche Struktur des Gebäudes skizzenhaft, d.h. grobe Maße in hoher Abstraktion. Durch Interpretation der Skizze

wird parallel die räumliche Struktur (Gebäude, Geschoss, Raum etc.) sowie Bauteilstruktur (Wände, Decken, Öffnungen etc.) des Gebäudes erfasst und miteinander in Bezug gesetzt.

- Aus der Skizze erfolgt die Ableitung eines grob maßstäblichen Geometriemodells, welches weiter detailliert und durch Kombination verschiedenen Techniken exakt aufgemessen werden kann. Die Messungen bilden dabei geometrische Beobachtungen, die durch verschiedene numerische Verfahren miteinander ausgeglichen werden. Entsprechend dieser Ausgleichung wird das Geometriemodell schrittweise den Messungen angepasst [3].
- Das aufgemessene Modell wird durch verschiedene Methoden der Bauwerksdiagnostik (u.a. Thermografie und Tomografie) um Informationen zu Materialkennwerten und eventuellen Fehlstellen angereichert.

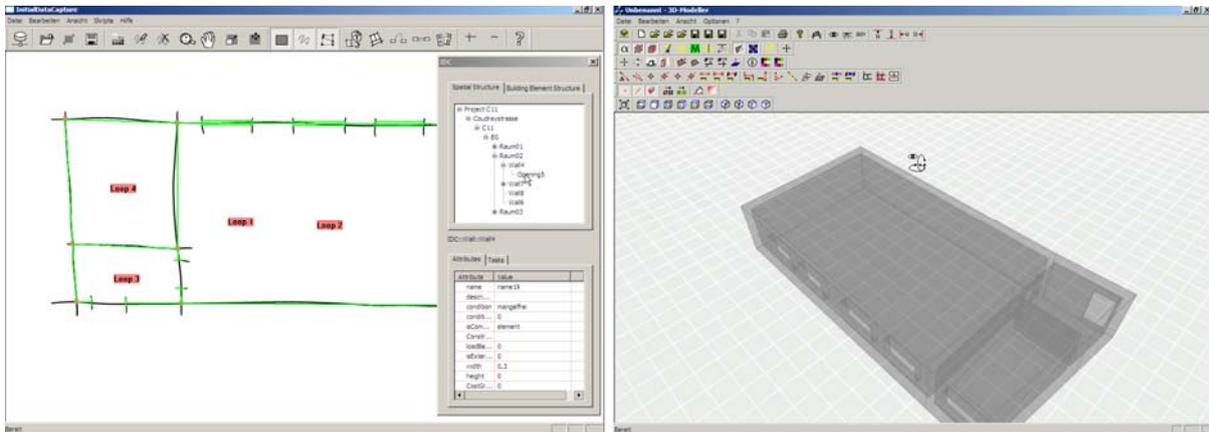


Abb. 2: Schrittweise Erfassung von Bauwerken (Softwareprototypen): Skizze und Bauwerkstopologie (links), abgeleitetes 3-D-Modell (rechts).

4 Dynamisches Bauwerksmodell

Die bei der Bauaufnahme und Bauwerksdiagnostik gesammelten Informationen legen wir in einem geeigneten Datenmodell ab. Üblicherweise verwenden verschiedenen Applikationen auch unterschiedliche Datenmodelle. Ein Austausch und Zusammenführen der Daten ist nur durch meist verlustbehafteten Im- und Export möglich. Im Sinne eines verbesserten Informationsaustausches und einer Qualitätssteigerung in der Planung sollen alle relevanten Informationen über den gesamten Bauaufnahme- und Bauplanungsprozess in einem gemeinsamen Datenmodell, dem Bauwerksmodell, abgelegt werden.

Kommerzielle Systeme zur Unterstützung der Bauaufnahme und Planung besitzen in der Regel kein Bauwerksmodell und können allein geometrische Elemente abbilden, oder aber werden Bauwerksmodelle aus der Neubauplanung angewendet. Diese bieten eine feste Strukturierung in Raum- und Bauteilobjekte sowie deren geometrische Ausprägung an. Eine nutzer- und projektorientierte Anpassung hinsichtlich Strukturierung und geometrischer Ausprägung ist derzeit nicht möglich, unabdingbar durch den Unikatcharakter der Geometrie wie Topologie von Bestandsgebäuden.

Im Rahmen des Projektes wird daher die Nutzung eines zur Laufzeit dynamisch veränderbaren und erweiterbaren Bauwerksmodells vorgeschlagen. Nutzer dieses Modells sind in erster Linie die beteiligten Fachingenieure, die die Daten einpflegen und in der Planung damit arbeiten. Die Nutzer arbeiten in der Regel nicht vor Ort zentral, sondern sind meist auf einzelne Büros verteilt. Für das Bauwerksmodell ist daher der Einsatz eines verteilten Produktmodells (vgl. Hauschild [4]) notwendig, welches den Zugang online ermöglicht. Idealerweise sollte dieser unmittelbar auf den zentral gehaltenen Datenbestand erfolgen. Da dies nicht in jedem Fall möglich ist (z.B. bei Aufmaßarbeiten vor Ort) werden Offline-Synchronisationstechniken notwendig, die das Splitten und spätere Zusammenfügen von Datenbeständen ermöglichen.

Wie bereits erwähnt, besitzen Bauwerke einen starken Unikatcharakter, der es unmöglich macht, sämtliche Elemente und Strukturen vorzudenken. Statische Bauwerksmodelle gelangen früher oder später unweigerlich ans Ende ihrer Einsatzfähigkeit. Aus diesem Grund ist das Bauwerksmodell dynamisch gestaltet, um Strukturen später anpassen und erweitern zu können.

Einzelne Aspekte des Bauwerksmodells lassen sich durch eine Menge von Klassen und Objekten abbilden, welche wiederum aus Attributen und Methoden bestehen (Prinzip der objektorientierten Programmierung). Ein dynamisches Modell erfordert, dass bestimmte Strukturen modifiziert bzw. erweitert werden müssen (vgl. Tab. 1).

Element	Modifikation	Notwendigkeit	Realisierungsaufwand
Klasse	löschen	immer umgehbar	schwierig
	ändern	notwendig	schwierig
	hinzufügen	oft notwendig	leicht realisierbar
Attributdefinition	löschen	immer umgehbar	schwierig
	ändern		schwierig
	hinzufügen	oft notwendig	erhöhter Aufwand
Methoden	löschen	immer umgehbar	schwierig
	ändern		schwierig
	hinzufügen	notwendig	erhöhter Aufwand
Objekte	löschen	oft notwendig	leicht realisierbar
	Typ ändern		erhöhter Aufwand
	Wert ändern	oft notwendig	leicht realisierbar
	hinzufügen	oft notwendig	leicht realisierbar
Attributwert	Wert ändern	oft notwendig	leicht realisierbar

Tab. 1: Strukturen innerhalb eines Teilmodells und Notwendigkeiten der Modifikation.

Zur Umsetzung dieser Dynamik existieren verschiedene Ansätze, wobei unterschiedliche Anforderungen an Flexibilität und Performance an das Bauwerksmodell zu berücksichtigen sind:

- Flexibilität des Gesamtsystems, d.h. die Anpassungen von Attributen und Methoden sollen zur Laufzeit ermöglicht werden
- Teilweise hohe Anforderungen an die Geschwindigkeit, z.B. bei der Geometriedarstellung oder bei der Ausführung aufwendiger numerischer Operationen
- Effiziente Speichernutzung, insbesondere bei der geometrischen Abbildung größerer Bauwerke oder bei Details
- Nötiges Fachwissen des Nutzers bei der Anpassung von Strukturen

Aus diesen Anforderungen ergeben sich Spannungen hinsichtlich Flexibilität und Performance, d.h. Geschwindigkeit und effektive Speichernutzung. Um den Anforderungen größtmöglich gerecht zu werden, wird ein heterogener Systemansatz vorgeschlagen, der Anpassungen auf verschiedenen Ebenen der Programmierung bzw. Nutzeranpassung vorsieht.

Für den vorgeschlagenen Ansatz sind drei unterschiedliche Personengruppen vorgesehen:

- Programmierer
- Fachingenieure
- Anwender

Die Gruppe der Programmierer erstellt hauptsächlich Teilmodelle wie z.B. zur Geometrieabbildung, Beschreibung der Raum- und Bauteilstruktur, Statik etc. Die Teilmodelle werden in der Regel mit Hochsprachen erstellt, wodurch hohe Performance und effiziente Speichernutzung gewährleistet wird. Eine Dynamik der Teilmodelle ist nur begrenzt möglich und wird zur Compile-Zeit bestimmt. Die Menge der Teilmodelle wird als Fachschale bezeichnet.

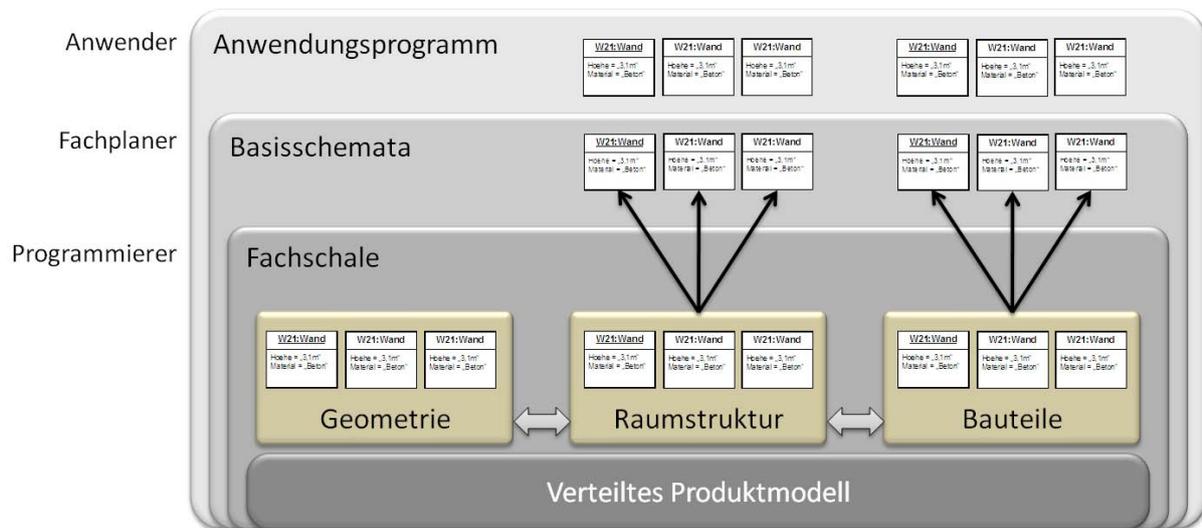


Abb. 3: Aufbau des Bauwerksmodells als Schalenmodell.

Fachingenieure passen als Administratoren das Bauwerksmodell den jeweiligen Aufgaben an: Anpassungen erfolgen zunächst durch Hinzuladen neuer Teilmodelle, welche anschließend angepasst und erweitert werden können. Reflektionsschnittstellen stellen dabei eine Verbindung zwischen den fest programmierten Teilmodellen und den darauf aufbauenden nutzerseitigen Erweiterungen von Attributen und Methoden beispielsweise durch Skripte dar. Die Fachschale, zusammen mit den administrativen Anpassungen bzw. Erweiterungen, stellt die Basisschemata dar, welche dem Anwender zur Verfügung steht. Auf Applikationsebene füllen diese das Modell mit den jeweiligen Daten. Veränderungen am Bauwerksmodell sind auf dieser Ebene nicht möglich. Erste Implementierungen dieser Konzepte sind abgeschlossen und werden derzeit getestet [5].

5 Integration zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden

Der Wert eines gemeinsam genutzten Bauwerksmodells durch alle an der Planung Beteiligte steigt mit dem Informationsgehalt über den Ist-Zustand des Gebäudes. Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden verschiedene Techniken der Bauwerksdiagnostik auf ihre Anwendung in der nutzerorientierten Sanierung untersucht. Deren Unterstützung bei der Durchführung und insbesondere die Integration der Ergebnisse in das Bauwerksmodell sind ein weiteren Hauptaspekt des Forschungsvorhabens.

Der Fachbereich „Zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden“ der Professur Baustoffkunde untersucht im laufenden Forschungsprojekt akustische Methoden zur zerstörungsfreien Untersuchung von Bauwerksteilen. Die Messmethoden werden in der Regel punktuell oder zumeist örtlich begrenzt durchgeführt und liefern Messergebnisse, die auf bestimmte Geometrien beschränkt sind. Um die Ergebnisse in den Gesamtzusammenhang des Gebäudes setzen zu können, ist die Repräsentation der Messstelle in ihrer Geometrie im Gebäudemodell notwendig. Die Zuordnung der Messstelle zur Geometrie kann dabei in zwei Richtungen erfolgen:

- Die Position der Messstelle wird im Bauwerksmodell festgelegt und in die Realität übertragen. Die derzeitige Konzeption sieht hierfür die Markierung der Messstelle vor Ort mit dem sichtbarem Laserstrahl eines motorisierten Tachymeters vor.
- Die Position der Messstelle wird in der Realität vorgegeben und ins Modell übertragen. Hierfür ist das Einmessen des Untersuchungsgerätes mittels Tachymeter vorgesehen. Dies kann bei Verwendung eines motorisierten Tachymeters in Verbindung mit der automatischen Zielfindung von retro-reflektierenden Marken weitestgehend automatisch erfolgen.

Derzeit werden im Projekt die Anbindungen der Ultraschall-Scherwellen-Tomografie sowie des taktilen Ultraschall-Transmissionsverfahrens realisiert. Insbesondere bei letztgenanntem Verfahren verspricht die Kombination mit einem digitalen 3-D-Geometriemodell und der Einsatz motorisierter Tachymeter eine wesentliche Steigerung der Effektivität des Verfahrens [6].

Bei der Durchschallung von Bauteilen wird auf einer Seite des Bauteils ein Ultraschallgeber und auf der anderen Seite gegenüberliegend ein Ultraschallsensor platziert. Nun wird ein Ultraschallimpuls vom Ultraschallgeber ausgelöst und vom -sensor erfasst. Durch die Kenntnis der Positionen von Ultraschallgeber und -sensor kann der dazwischen liegenden Strecke die Geschwindigkeit der Schallwelle zugewiesen werden. Diese gibt indirekt beispielsweise über Festigkeitswerte Auskunft. Wird eine Menge von Messungen in

einem Raster ausgeführt, ergibt sich allein über die Verteilung der Laufzeiten über das Bauteil ein Bild analog einer „Röntgenaufnahme“, welche die elastischen Eigenschaften im untersuchten Bereich des Baukörpers repräsentiert und eventuelle Problemstellen erkennen lässt.

Der Aufbau von zwei gegenüberliegenden Messrastern für den Ultraschallgeber und -sensor, wurde bisher manuell mit Wasserwaage und Zollstock realisiert. Neben dem hohen Aufwand stellt die Genauigkeit der Messmethode ein Problem dar: Gerade die Kenntnis des genauen Abstandes von Ultraschallgeber und -sensor ist wichtig, um aus der gemessenen Ultraschall-Laufzeit ihre Geschwindigkeit berechnen zu können.

Der Einsatz motorisierter Tachymeter mit sichtbarem Laserstrahl erlaubt dabei die exakte Erfassung der Bauteiloberflächen, die Projektion von Punktpositionen auf die Oberflächen (Projektion der Messraster) und die automatische Detektion und Positionserfassung von Ultraschallgeber und -sensor per Infrarot durch aufgeschraubte Miniprismen.

Die bei der Messung gewonnenen Werte fließen direkt in das Bauwerksmodell ein und werden dem jeweiligen Bauteil zugeordnet. Die Visualisierung der Messergebnisse erfolgt direkt in Bezug zur Bestandsgeometrie.

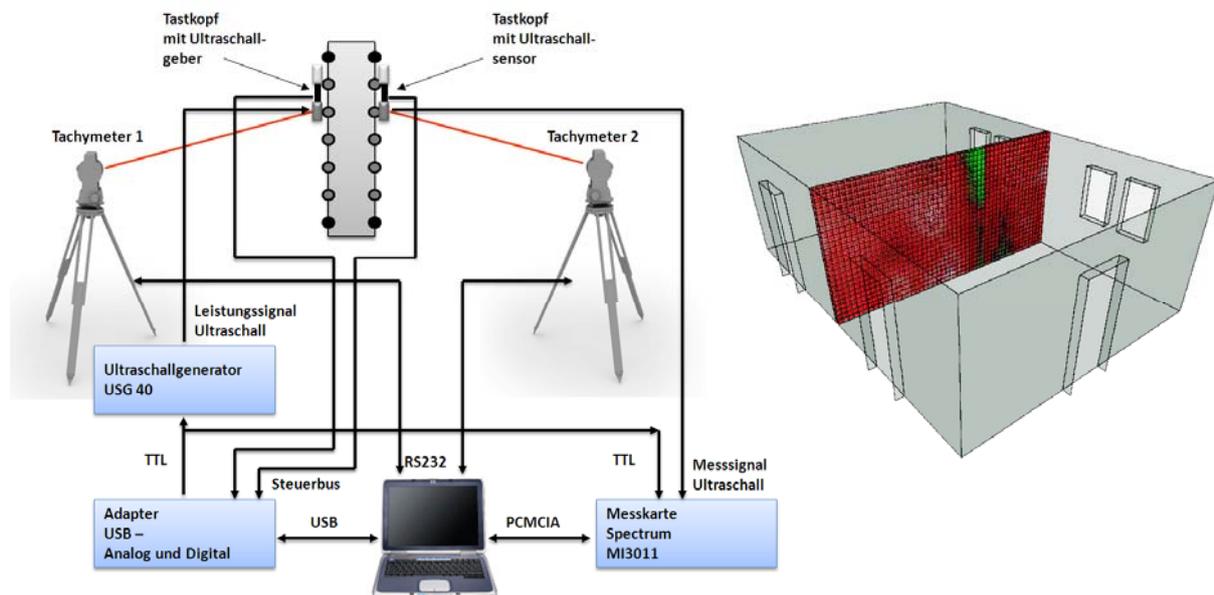


Abb. 4: Prinzip der Unterstützung des Ultraschall-Transmissionsverfahrens mittels Tachymetrie (links) und Visualisierung der Messergebnisse in Bezug zum Geometriemodell (rechts).

6 Ergebnis und Ausblick

Das interdisziplinäre Forschungsvorhaben „nuBau“ zielt auf eine effektive Vernetzung der verschiedenen Fachaspekte innerhalb des Sanierungsprozesses. Der Fokus des Artikels liegt dabei insbesondere auf der Darlegung der informationstechnischen Grundlagen in Form eines dynamischen Bauwerksmodells. Die vorgestellten zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden sollen als exemplarisches Beispiel für die Integration verschiedener Informationen über den Ist-Zustand eines Bauwerkes stehen. Innerhalb des Projektes werden darüber hinaus in den nächsten Jahren weitere relevante Methoden der Bausanierung in das Modell einfließen.

Als weiterer Schwerpunkt werden dabei bauphysikalische Simulation auf Grundlage des im Bauwerksmodell abgebildeten Ist-Zustandes des Gebäudes betrachtet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] C. Hommerich, N. Hommerich, F. Riedel. *Zukunft der Architekten – Berufsbild und Märkte. Eine Untersuchung im Auftrag der Architektenkammer Nordrhein-Westfalen. 2005.*
- [2] D. Donath, et al. *Sketch-based Building Information Capture for Cost and Risk Assessment in the Early Stages of Planning in Existing Built Contexts, in eCAADe. Conference on Education in Computer Aided Architectural Design in Europe. eCAADe: Antwerp, Belgium. p. 109-116. 2008.*
- [3] T. Thurow. *Digitaler Architekturbestand. Untersuchungen zur computergestützten, schrittweisen Erfassung und Abbildung der Geometrie von Gebäuden im Kontext der planungsrelevanten Bauaufnahme. Dissertation an der Fakultät Architektur der Bauhaus-Universität Weimar. 2004.*
- [4] T. Hauschild. *Computer Supported Cooperative Work-Applikationen in der Bauwerksplanung auf Basis einer integrierten Bauwerksmodellverwaltung. Dissertation an der Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar. 2003.*
- [5] T. Thurow. *Kombination verschiedener Fachaspekte auf Basis eines dynamisch erweiterbaren Bauwerksmodells, in Methoden und Baustoffe zur nutzerorientierten Bausanierung. 1. Workshop. 2008.*
- [6] R. Tatarin, W. Erfurt. *Zerstörungsfreie Untersuchung von Bauwerksteilen mit akustischen Untersuchungsmethoden im Rahmen der Bauzustandsanalyse und bei der Sanierung von Bestandsbauwerken, in Methoden und Baustoffe zur nutzerorientierten Bausanierung, 1. Workshop. 2008.*

Distributed Services

Ein modellbasierter Prozess für das integrierte Design verteilter Systeme

Arno Schlüter

ETH Zürich, Institut für Hochbautechnik, 8093 Zürich, Schweiz, E-mail:

schlueter@arch.ethz.ch, Telefon: +41(0)44/63333618

Kurzfassung

Der Betrieb von Gebäuden verursacht einen erheblichen Anteil der weltweiten CO₂-Emissionen. Den technischen Systemen für die Versorgung der Gebäude mit Stoffen und Energie kommt dabei eine große Bedeutung zu. Eine neue Generation hoch entwickelter, verteilter Systeme der Gebäudetechnik (*Distributed Services*) ermöglicht eine wesentlich effizientere und flexiblere Versorgung. Die Eigenschaften verteilter Systeme und die aus ihren Abhängigkeiten resultierende Komplexität macht die Gesamtbetrachtung eines Gebäudes allerdings bereits ab den frühen Phasen einer Planung notwendig. In dieser Arbeit wird ein modellbasierter Prozess beschrieben, welcher die Konzeption, das Design und die Implementierung verteilter Systeme in den frühen Phasen des Planungsprozesses ermöglicht. Die Modellierung des integrierten Designprozesses dient als Ausgangspunkt für die Realisierung von Software-Werkzeugen, welche intuitiv im architektonischen Planungsprozess eingesetzt werden können. Informationsgrundlage einer Realisierung sind digitale Gebäudemodelle und darin integrierte Komponenten der verteilten Systeme. Für die ersten Stufen des Prozesses wurde eine solche Software bereits prototypisch realisiert und in verschiedenen „Case Studies“ angewendet.

Stichworte

Verteilte Systeme, Building Information Modeling, Building Performance, UML

1 Einleitung

Gebäude tragen mit 38% des Primärenergieverbrauches und 40% der CO₂-Emissionen erheblich zum Klimawandel bei [1]. Mehr noch als ihre Errichtung verursacht der Betrieb von Gebäuden, deren Versorgung mit Stoffen und Energie, einen Großteil der Emissionen. Den technischen Systemen der Versorgung kommt eine große Bedeutung zu.

Eine wichtige Anforderung für die Nutzung von Gebäuden gemäß ihres Verwendungszwecks ist ein der Nutzung entsprechendes komfortables Innenklima. Die Beurteilung des Komforts durch den Menschen ist ein kognitiver Prozess: Sie wird von vielen Faktoren beeinflusst, so z.B. von physikalischen, physiologischen und psychologischen Einflüssen [2]. Eine wichtige Einflussgröße ist das thermische Gleichgewicht des menschlichen Körpers und sein Aufwand, dieses Gleichgewicht zu halten. Nur innerhalb schmaler Grenzen ist dieser Aufwand gering, wird die Umgebung damit als komfortabel empfunden. Beeinflusst wird dieses Gleichgewicht von Effekten wie beispielsweise Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftbewegung und Strahlungssymmetrie.

In den meisten geographischen Breiten ist für die Einhaltung komfortabler Raumbedingungen eine Versorgung des Raumes mit Stoffen und Energie notwendig. Seit Mitte des 19. Jahrhunderts werden hierzu technische Systeme eingesetzt [3]. Herkömmliche, hierarchisch organisierte Systeme der Gebäudetechnik erzeugen den Effekt auf ein Medium an zentraler Stelle. Durch das Primärsystem, die zentrale Anlage, wird beispielsweise Wasser aufgeheizt oder Luft durch einen Ventilator unter Druck gesetzt. Das Sekundärsystem verteilt das Medium über eine Baumtopologie im Gebäude [4]. An diesem Prinzip hat sich seit dem Aufkommen technischer Systeme im Gebäude nicht viel geändert. Unter den heutigen Rahmenbedingungen und damit den gestiegenen Anforderungen an die technischen Systeme weisen letztere allerdings Nachteile auf: Die Distribution von Medien über lange Strecken durch verästelte Rohrnetze erfordert ein hohes Maß an Transportenergie, weist hohe Druckverluste auf und macht damit hohe Ausgangsleistungen der Ventilatoren und Pumpen notwendig. Auf individuelle Anforderungen an Komfort beispielsweise an Arbeitsplätzen oder punktuelle Veränderungen des Innenklimas lässt sich im starren, hierarchischen System nur schwer reagieren. Für die Verwendung des Rasters als architektonische Gliederung zur Perfektion hin entwickelt [5], lassen sich zentral organisierte Systeme nur schwer auf die zunehmend verwendeten komplexen Gebäudegeometrien anpassen. Ihre umfangreichen Leitungsnetze benötigen viel Platz, welcher durch doppelte Böden, abgehängte Decken und großräumige Technikzentralen geschaffen werden muss und nicht als Nutzfläche des Gebäudes zur Verfügung steht. Die Kaschierung von Leitungsnetzen durch aufwändige Verkleidung verursacht hohe Kosten und hat große Auswirkungen auf die Ästhetik der Innenräume.

Herkömmliche Systeme der Gebäudetechnik werden zunehmend durch eine neue Generation von Systemen ergänzt bez. abgelöst. Distributed Services sind Systeme, die im Gebäude verteilt werden und flexibel auf den Bedarf an vielen Punkten im Gebäude

reagieren können. Analog zu den Entwicklungen in der Informationstechnik lassen sich diese Systeme zunehmend miniaturisieren und können so in strukturelle Komponenten des Gebäudes implementiert werden. Sie erzeugen allerdings auch komplexe Abhängigkeiten, welche bereits in den frühen Planungsphasen berücksichtigt werden müssen.

Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Formulierung eines modellbasierten Prozesses für die Integration verteilter Systeme in die frühen Planungsphasen. Dabei soll die Versorgung von Gebäuden mit Stoffen und Energie, d.h. deren Bedarf und dessen Lieferung durch die Gebäudeinfrastruktur, bereits von Anfang an mit berücksichtigt werden. Die Modellierung der verschiedenen Stufen des Prozesses dient als Grundlage zur Umsetzung von Softwarewerkzeugen für die Anwendung im integrierten Gebäudeentwurf. Die Verwendung digitaler Gebäudemodelle sowie domänenspezifischer Objektmodelle dient dabei als wichtige Informationsgrundlage für die Realisierung solcher Werkzeuge.

2 Verteilte Systeme (Distributed Services)

Verteilte Systeme ermöglichen neue Ansätze für die effiziente Versorgung von Gebäuden. Sie lassen sich wie folgt charakterisieren:

Dezentralität und Distribution

Der Effekt auf ein Medium (z.B. Luft erwärmen) geschieht dezentral durch im Gebäude verteilte Komponenten. Diese erzeugen den Effekt individuell und auf einen spezifischen Wirkungsradius begrenzt. Mittels Kooperation der Komponenten können unterschiedliche Raumeinheiten flexibel versorgt werden.

Miniaturisierung

Durch den begrenzten Wirkungsradius und die kooperative Versorgung des Gebäudes können die einzelnen Komponenten klein sein. Durch ihre geringe Größe können die Komponenten in strukturelle Bauteile integriert werden.

Integration

Das funktionale Systemdesign und die Platzierung der Systemkomponenten in der Gebäudestruktur sind abhängig vom Gebäude als Gesamtsystem, von Form, Materialität,

Konstruktion und Kontext. Eine Gesamtsicht auf das Gebäude, welche diese Stellschrauben berücksichtigt ist bereits von Anfang einer Planung an notwendig.

Kommunikation

Um ein Gebäude zu versorgen und auf die Bedingungen des Innen- und Außenklimas einzugehen müssen die Komponenten der Systeme und die Systeme untereinander kommunizieren.

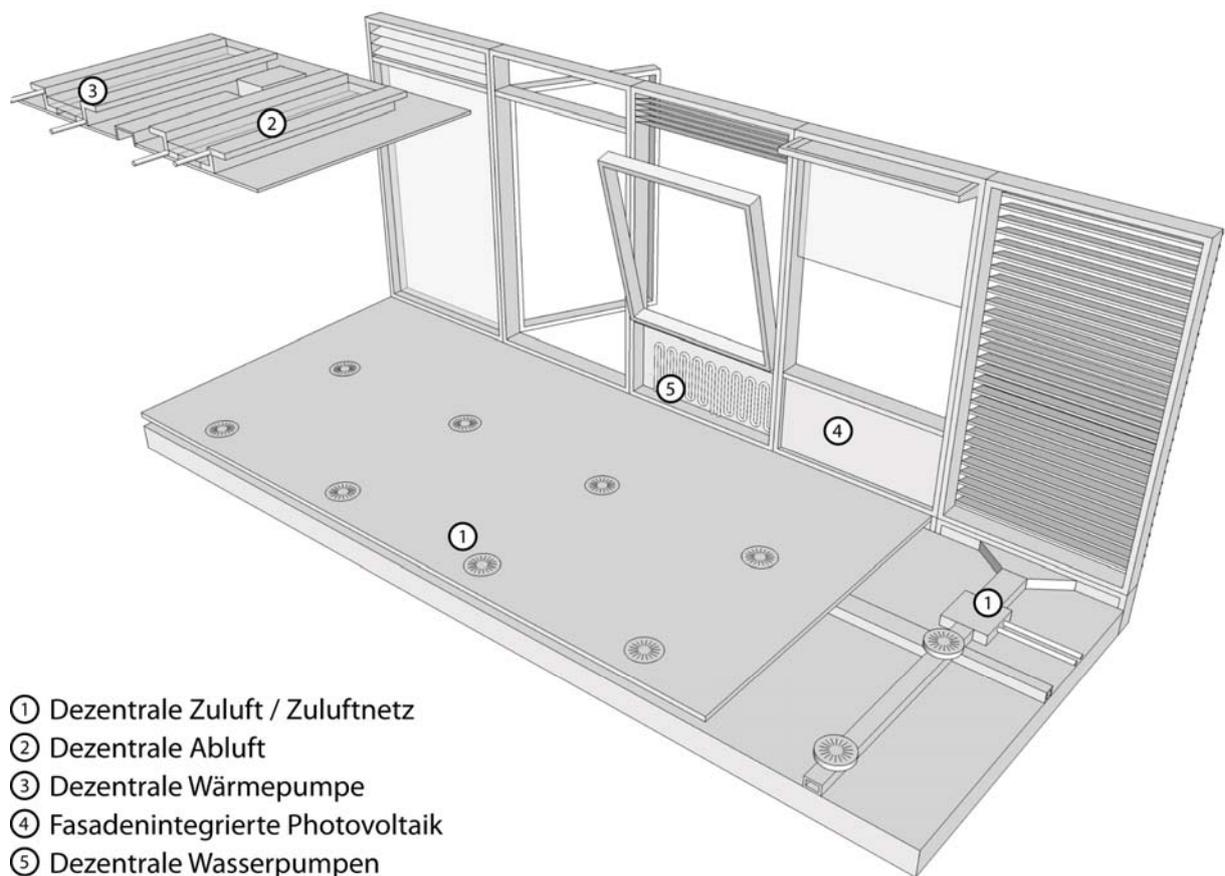


Abb. 1: Beispielhafte, verteilte Systeme (Distributed Services) im Gebäude.

Als beispielhaftes System dient hier das System der dezentralen Zuluftversorgung. Es besteht aus fassadenintegrierten Transporteinheiten, welche frische Zuluft aus dem Außenraum gewinnen, diese temperieren und über ein in den Boden oder die Decke integriertes, vermaschtes Zuluftnetz in den Raum verteilen. Durch die Vielzahl von

Transporteinheiten kann das System sehr fein auf Veränderungen des Innen- oder Außenklimas reagieren, so z.B. auf einen erhöhten CO₂-Anteil der Innenluft.

3 Modellbasierter Designprozess

Für die Strukturierung des Prozesses für die Berücksichtigung solcher System in den frühen Phasen einer Planung wird eine Methodik zur Modellierung komplexer Systeme verwendet, welche in der Softwareentwicklung [6] aber auch für die Modellierung beliebiger anderer Systeme, so z.B. für das Systems Engineering [7], verwendet werden kann. Hierzu zählt auch die Modellierung technischer Systeme im Gebäude [8]. Der *Unified Process* [6, 8] ist eine Prozessstruktur, welche die notwendigen Schritte für die Entwicklung eines spezifischen Systems definiert. In dieser Arbeit wird er adaptiert, um im architektonischen Kontext die Definition eines technischen Systems als Summe seiner Komponenten zu beschreiben. Der Unified Process ist iterativ und inkrementell und damit kohärent zu dem Vorgehen in einem architektonischen Planungsprozess. Die Modelle der jeweiligen Prozessstufen werden in der Sprache UML spezifiziert, visualisiert und in letzter Konsequenz in Programmcode übersetzt [9]. Durch die Fokussierung auf die frühen Phasen des Planungsprozesses liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Konzeptions- und Entwurfsphase.

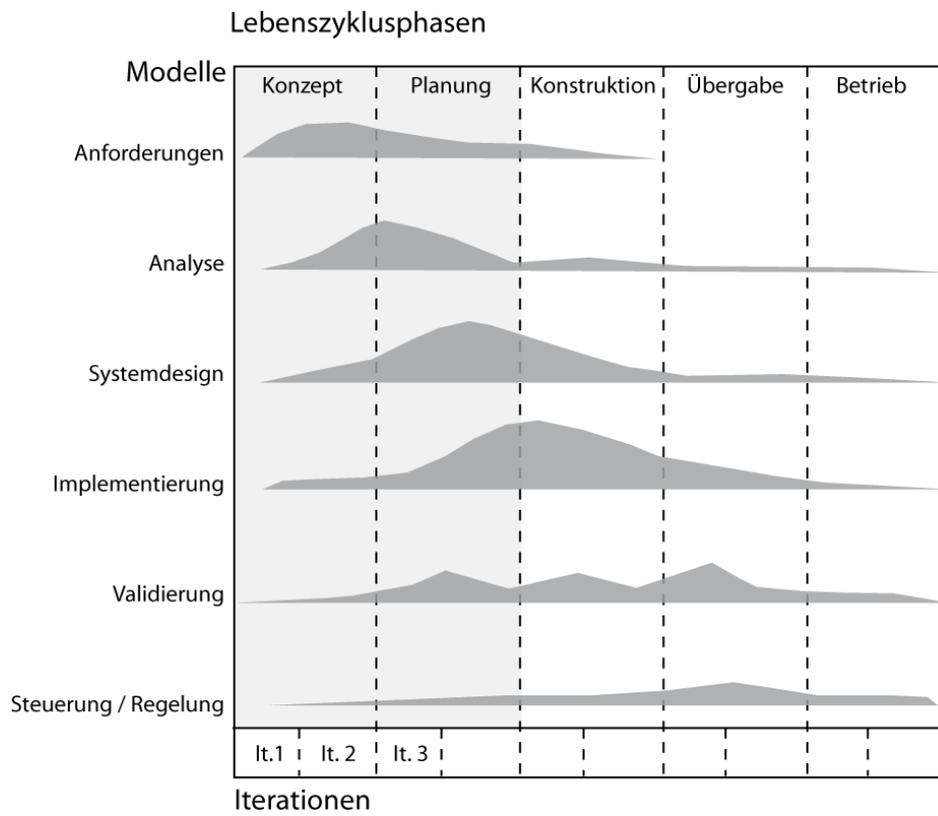


Abb. 2: Unified Process [12], adaptiert.

Die Grundlage für den Designprozess bildet ein Designszenario (Abb. 3). Es beschreibt schematisch den Ablauf eines integrierten Entwurfsprozesses in den frühen Phasen. In einem ersten Schritt wird der Bedarf an Masse und Energie des Gebäudes abhängig von Kontext, Form, Konstruktion und einer groben Auswahl technischer Systeme ermittelt. Im Wechselspiel mit der architektonischen Gestaltung kann dabei Ästhetik und Performance des Gebäudes miteinander ausbalanciert werden (siehe hierzu auch 10, 11]). Nach der Berechnung des Bedarfes wird die Bedarfsinformation im digitalen Gebäudemodell gespeichert. In einem zweiten Schritt werden die Systeme für die Versorgung mit den jeweiligen Medien definiert. Sie sind in der Lage, den berechneten Bedarf der individuellen Raumeinheiten zu decken. Anschließend werden die jeweiligen Topologien für die Vernetzung der Systemkomponenten etabliert. Für deren Platzierung in der Gebäudestruktur muss der Platzbedarf und die Leitungsführung mit der vorhandenen Gebäudegeometrie in der jeweiligen Entwurfsiteration abgestimmt werden. Um die

Wechselwirkungen zwischen Form, Konstruktion, Topologie der Systeme und den daraus resultierenden Einfluss auf Ästhetik und Performance abzubilden, muss der Designprozess der verteilten Systeme von einem frühen Zeitpunkt in den Entwurfsprozess integriert sein.

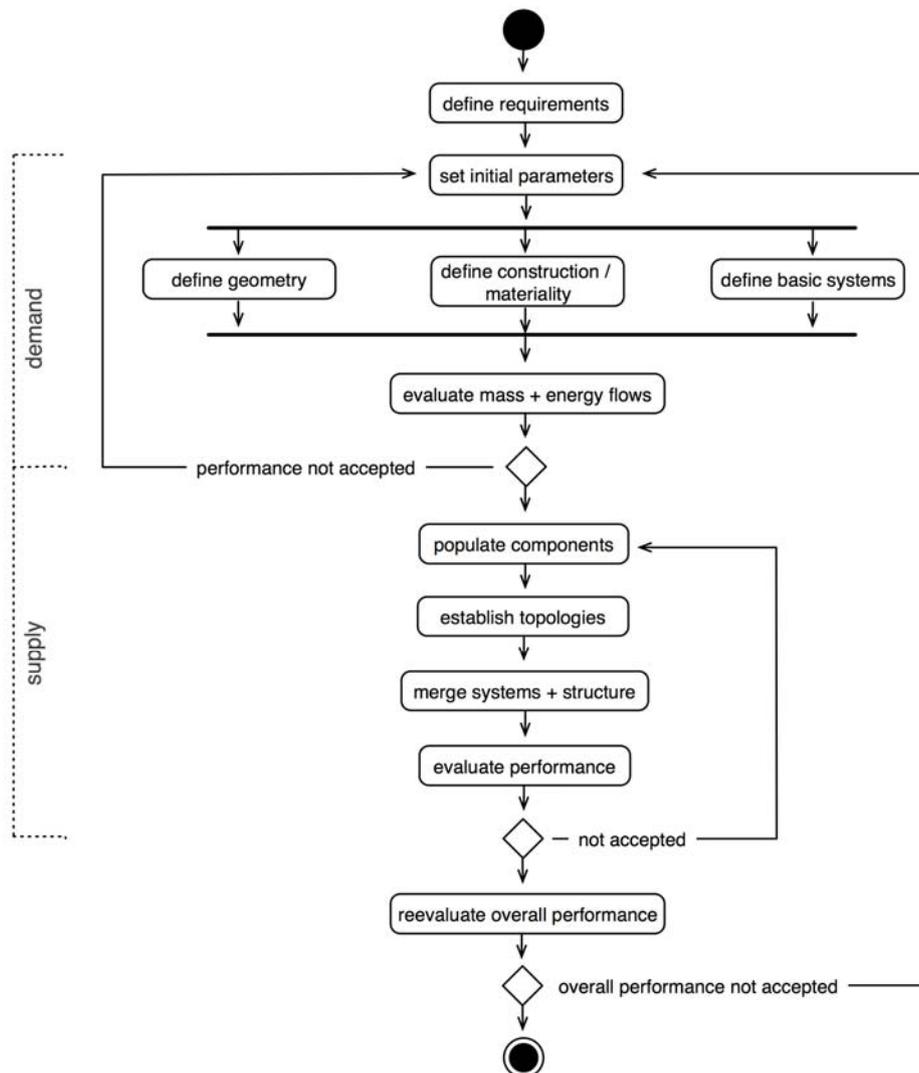


Abb.3: Aktivitätsdiagramm Designprozess.

Die im Aktivitätsdiagramm (Abb. 3) dargestellten Tätigkeiten lassen sich in der Struktur des Unified Process in Modellen beschreiben. Im Folgenden werden diese Modelle näher beschrieben.

3.1 Anforderungen

Die Anforderungen an ein spezifisches System definieren sich aus der vorhergesehenen Nutzung des Raumes und damit verbundenen Komfortbedingungen der Benutzer. Parameter sind hier z.B. die Innenraumtemperatur, der CO₂-Gehalt der Luft, Tageslichtqualität oder Strahlungssymmetrie. Der Zustand des Innenklimas muss bei allen Zuständen des Außenklimas sowie unter Einfluss von Aktivitäten im Inneren des Raumes komfortabel bleiben. Das Anforderungsmodell berücksichtigt die verschiedenen einflussnehmenden Akteure. Die Bedingungen am Standort bestimmen das Außenklima. Sich im Raum befindliche Apparate sowie Personen beeinflussen durch ihre Aktivität das Innenklima. Die Gebäudehülle bildet die perforierte Grenze zwischen Innen- und Außenklima, welche Stoff- und Energieflüsse maßgeblich mitprägt. Für die Einhaltung der Komfortbedingungen ist die Zufuhr von Stoffen und Energie notwendig. Alle Anforderungen lassen sich dabei mit den Medien Luft, Wasser und Elektrizität abdecken.

3.2 Analyse

Im Analysemodell werden die Anforderungen präziser spezifiziert. Zu der Sicht des Benutzers, welche im Anforderungsmodell beschrieben wird, kommt nun die Sicht des Systemdesigners hinzu: Es wird analysiert, wie das spezifische Gebäudesetup die Komfortbedingungen beeinflusst. Daraus errechnet sich, wie hoch die Zufuhr von Stoffen und Energie sein muss, um die Anforderungen an den Komfort in der jeweiligen Iteration des Gebäudeentwurfes zu erfüllen. Wichtige Einflussfaktoren sind die geometrischen und konstruktiven Eigenschaften, aber auch der Kontext:

Ort

Der Ort definiert den unmittelbaren Kontext eines Gebäudes. Standortfaktoren wie die gebaute Umwelt beeinflussen die Verschattung und das Mikroklima. Auch der Zugang zu Quellen regenerativer Energie wie beispielsweise geothermischer Wärme aus Erdreich oder Wasser beeinflussen die Versorgung durch die Auswahl bestimmter technischer Systeme.

Klima

Das am Standort herrschende Klima definiert die Rahmenbedingungen bezüglich Außentemperaturen, Bewölkungsgrad und Windverhältnisse. Die Menge der solaren Einstrahlung definiert die Menge möglicher Energiegewinne vor Ort.

Form

Auf der Ebene des Gebäudes bestimmt die Gebäudeform über Verhältnisse von Hüllfläche zu Volumen, Ausrichtung von Flächen zu bestimmten Himmelsrichtungen sowie Anteile von offenen zu geschlossenen Flächen. Die Gebäudeform bestimmt aber auch über Flächen von Bauteilen, welche für die Heizung aktiviert werden können.

Konstruktion / Material

Die Konstruktion des Gebäudes hat wesentlichen Einfluss auf die Verluste der Gebäudehülle aber auch auf thermisches Speicherverhalten. Die Materialität der Außenhülle und resultierende physikalische Eigenschaften beeinflusst wesentlich die Wärmeverluste bzw. Aufheizung des Innenraumes.

Technische Systeme

Erste, grobe Annahmen bezüglich ausgewählter Systeme müssen getroffen werden, so z.B. für die Wärmeerzeugung.

Für die Analyse wird der Innenraum des Gebäudes in Raumzellen unterteilt. Jede dieser Raumzellen steht für einen funktional definierten Raum, der nicht notwendigerweise durch Wände begrenzt sein muss. Die Energie- und Stoffflussbilanz jeder Raumzelle wird mittels mathematischer Modelle analysiert [10]. Hierzu können sowohl statistische, normenbasierte Berechnungsmodelle als auch physikalische Simulationen verwendet werden. Je nach Berechnungsmodell und Auflösung variiert dabei Anzahl der notwendigen Eingabeparameter sowie die Berechnungsgeschwindigkeit. Um einen iterativen und damit immer noch intuitiven Arbeitsprozess zu ermöglichen, werden Modelle bevorzugt verwendet, die eine hohe Berechnungsgeschwindigkeit mit genügender Präzision verbinden. Für das folgende Systemdesign der verteilten Systeme wird die spezifische Bilanz jeder Raumzelle im Objekt der Raumzelle gespeichert.

3.3 Systemdesign

Im Designmodell wird beschrieben wie das System definiert werden muss, um die Anforderungen d.h. den Komfort unter den analysierten Bedingungen einzuhalten. Es gilt, den berechneten Bedarf durch die Versorgung mit Systemen aktiv zu decken. Jedes der Systeme benötigt eine Kombination der Zufuhr von Stoffen, Energie und Information um den lokalen Effekt zu erzeugen. Der ermittelte Bedarf an Stoffen und Energie bestimmt die Auswahl und Konfiguration des jeweiligen Systems aus seinen Systemkomponenten. Im Designmodell werden Typ und Anzahl der Komponenten definiert und über ihre Vernetzung das System etabliert.

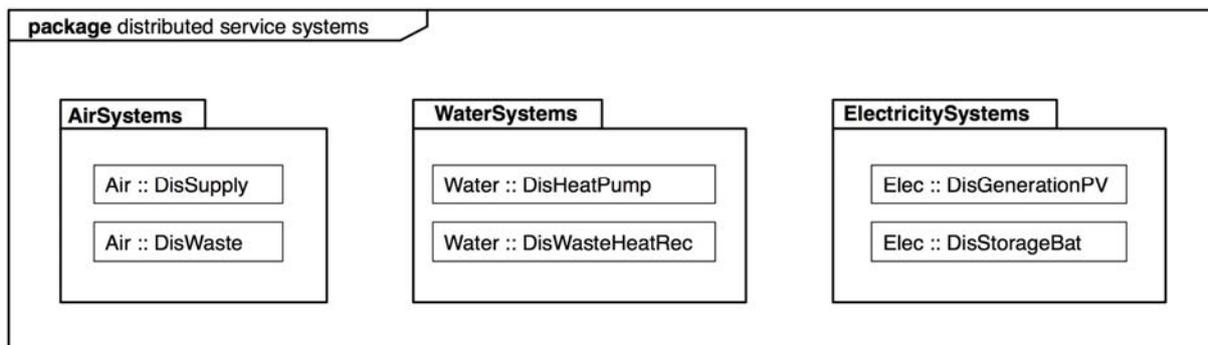


Abb. 4: Distributed Systems (Auswahl), gruppiert nach Medien.

Komponenten

Für die objektorientierte Beschreibung im Designmodell werden die Komponenten in Klassen definiert. Grundsätzlich lassen sich drei Grundklassen als Bestandteil jedes Systems definieren: Die Transportklasse, die Effektklasse und die Austauschklasse. Die Transportklasse beschreibt Objekte des Transports von Medien, so z.B. Ventilatoren oder Pumpen. Die Effektklasse beschreibt Objekte der Applikation eines Effektes auf das Medium wie beispielsweise Heizspiralen und die Input/Outputklasse Objekte der Emission oder Immission von Medien. Ein System für die dezentrale Zuluftversorgung setzt sich beispielsweise aus einem Ventilator, einem Wärmetauscher sowie einem oder mehreren Auslässen zusammen. (siehe Abb.5). Alle diese Komponenten sind über Leitungen miteinander verbunden.

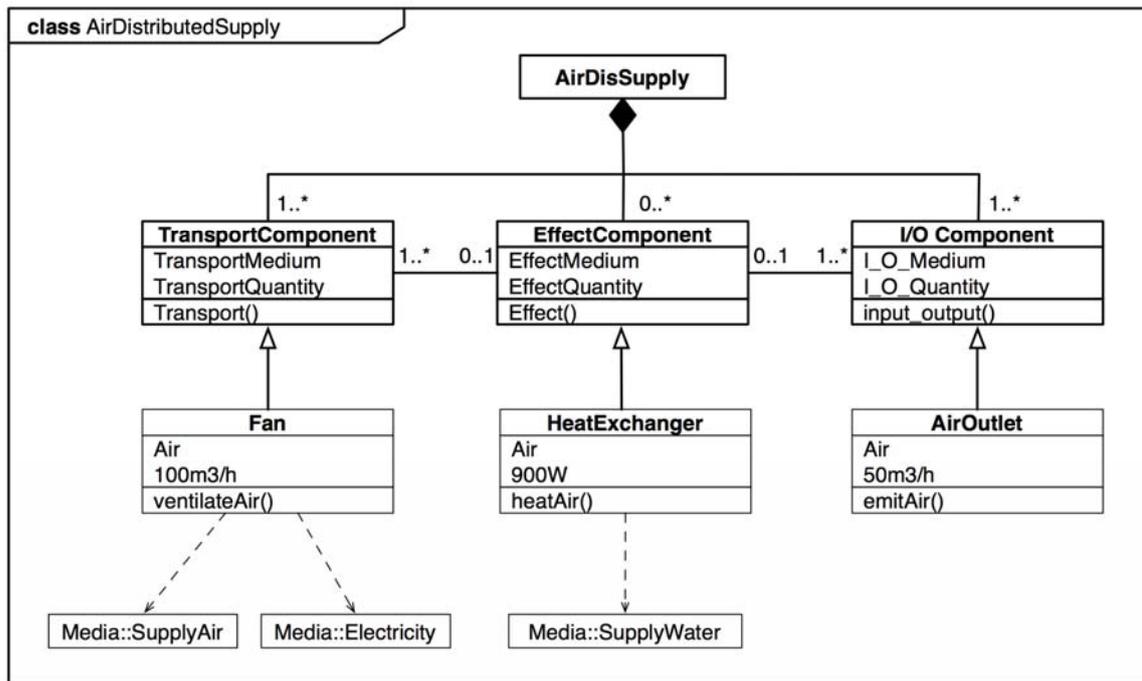


Abb. 5: System *dezentrale Zuluft*, Komponenten.

Topologien

Jede Komponente greift auf ein oder mehrere Medien zu. Die Vernetzung der im Raum verteilten Komponenten definiert die Topologie des Systems. Die Vernetzung orientiert sich an den Anschlussstellen der Komponenten und heuristischen Regeln des Gesamtsystems. Mittels Algorithmen werden Varianten einer Vernetzung erzeugt. Für eine Vernetzung mit möglichst minimalen Längen der Verbindungen können beispielsweise „shortest Path“-Algorithmen oder genetische Algorithmen [12] verwendet werden. Die Praktikabilität solcher Ansätze zeigen Beispiele in den Bereichen der technischen Systeme [13] sowie Elektrotechnik [12]. Auch die funktionale Performance des Systems, z.B. die Druckverhältnisse des Volumenstroms der Zuluft im Netzwerk (siehe 4.5), kann maßgeblich für die Topologie sein. In der Vernetzung kommen die besonderen Eigenschaften der verteilten Systeme zu tragen. Die Komponenten der Systeme versorgen den Raum kooperativ und kollektiv. Sie sind modular aufgebaut und können punktuell und individuell auf veränderte Zustände im Innen- und wie Außenklima reagieren. So können am Beispiel der dezentralen Zuluft Winddruck und –sog an gegenüberliegenden Fassaden eines Gebäudes für die Versorgung mit Frischluft ausgenutzt und damit Transportenergie eingespart werden [14].

Nachdem die Systeme etabliert sind muss deren Zugang zu den Mediennetzen des Gesamtgebäudes hergestellt werden. Im Beispiel der dezentralen Zuluft kann das Medium Luft direkt aus der Umgebung des Gebäudes gewonnen werden. Die Medien Wasser und Strom werden dem Leitungsnetz entnommen, welches horizontal wie vertikal an die Raumzellen hingeführt wird. Auch der Zugang zum Informationsnetz für die Koordination und Steuerung der Komponenten erfolgt über diese Schnittstelle.

3.4 Implementierung

Nach dem funktionalen Design werden im Implementierungsmodell die Komponenten und ihre Verbindungen im Gebäude verortet. Deren geometrischen Eigenschaften werden mit der Geometrie der Gebäudestruktur kombiniert. Im Implementierungsmodell werden Systemvarianten bezüglich Platzierung und deren spezifische Anforderungen beschrieben. Im Beispiel der dezentralen Luftversorgung betrifft dies den Platzbedarf für die Komponenten sowie der Rohre und Leitungen für deren Vernetzung. Je nach Systemvariante fällt dieser Platzbedarf in unterschiedlichen strukturellen Komponenten wie z.B. Fassade, Boden oder Decke an (siehe Abb.1). Ständiges Feedback zwischen Designmodell und Implementierungsmodell ist daher notwendig, um Konflikte zu vermeiden.

3.5 Validierung

Nach der Platzierung der Komponenten im Gebäude findet eine funktionale Überprüfung der verorteten Systeme statt. Die Systemperformance kann dabei nach verschiedenen Kriterien bewertet werden. So wird beispielsweise der Volumenstrom in der gewählten Netztopologie berechnet und die Druckzustände in den Netzwerkknoten berechnet [14]. Berücksichtigt werden kann auch deren Beeinflussung durch externe Quellen wie z.B. Winddrücke. Auftretende Konflikte zwischen Implementierung (z.B. zu geringes Platzangebot, zu hoher Druckverlust) führt zum iterativen Anpassung des Design- und Implementierungsmodells.

4 Prototypische Realisierung

Die Integration verteilter Systeme in den Entwurfsprozess erzeugt durch ihre vielfältigen Abhängigkeiten eine hohe Komplexität. Um die Systeme, ihre Komponenten und deren Einflüsse auf die Performance und Ästhetik eines Gebäudes im Planungsprozess mit

einzu beziehen, ist eine Vielzahl von Informationen notwendig. Produktdatenmodelle [15, 16] oder die für das Bauen adaptierten Digitale Gebäudemodelle bzw. *Building Information Models (BIM)* [17], haben in den letzten Jahren den Sprung aus der Forschung in die Anwendung in realen Bauprojekten geschafft. Sie ermöglichen es, Informationen zur dreidimensionalen Geometrie, zur Semantik der Bauteile sowie zu Topologien im Gebäude abzulegen [18]. Neben proprietären Werkzeugen für die Erstellung digitaler Gebäudemodelle ist mittlerweile mit den *Industry Foundation Classes (IFC)* [19] auch ein herstellerübergreifendes Beschreibungs- und Austauschformat für digitale Gebäudemodelle vorhanden. In dem hier beschriebenen Ansatz ist insbesondere die Fähigkeit solcher Modelle wichtig, die notwendigen Parameter der strukturellen Komponenten des Gebäudes für das Anforderungs- und Analysemodell bereits vom Anfang des Entwurfs mitführen zu können. Sie dienen daher als Grundlage für die prototypische Realisierung von integrierten Planungswerkzeugen. Die Komponenten der verteilten Systeme werden ebenfalls in das digitale Gebäudemodell integriert. Jede Komponente eines Systems ist dabei ihren Eigenschaften, Methoden und Beziehungen zu anderen Komponenten im System beschrieben. Dies ermöglicht das funktionale Design des Systems wie auch die geometrische Überprüfung im digitalen Gebäudemodell.

5 Ergebnis und Ausblick

Der in dieser Arbeit vorgestellte, modellbasierte Designprozess zeigt einen Weg auf zur Berücksichtigung und Integration verteilter Systeme der Gebäudetechnik bereits früh im Planungsprozess. Die Modellierung unter Verwendung des *Unified Process* und der UML als kompatible, objektorientierte Sprache dient als Grundlage für die Ausformulierung der Modelle in Softwarewerkzeuge, welche sich intuitiv in den Entwurf einbeziehen lassen. Die Modelle der Stufen Anforderungen und Analyse wurden bereits prototypisch in einer Software, dem Design Performance Viewer (DPV) [10, 11] umgesetzt. Zu jedem Zeitpunkt und Zustand eines Entwurfes können sofortige Aussagen über den Masse- und Energiebedarf des spezifischen Entwurfszustandes getroffen werden. Ein integrierter Entwurfsprozess unter gleichzeitiger Betrachtung von Energie- und Stoffflüssen und deren gestalterischen Auswirkungen wurde im Rahmen von Seminaren und Workshops mit bisher über 150 Architekturstudierenden erfolgreich durchgeführt [10, 20]. In einem nächsten Schritt werden die Modelle für die Phasen Systemdesign, Implementierung und Validierung der verteilten Systeme zur bestehenden, prototypischen Software hinzugefügt. Damit wird die vollständige Berücksichtigung verteilter Systeme in den

frühen Phasen des Planungsprozesses ermöglicht, welcher zu wesentlich effizienter versorgten Gebäuden und damit zur Reduktion von CO₂-Emissionen führt.

Literaturverzeichnis

- [1] Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of on the energy performance of buildings. 2002.
http://ec.europa.eu/energy/demand/legislation/buildings_en.htm
- [2] 2005 ASHRAE Handbook, Fundamentals. Atlanta, GA. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.*, 2005.
- [3] R. Banham. *The Architecture of the Well-tempered Environment*. Chicago. 1964.
- [4] B.D. Hunn. *Fundamentals of building energy dynamics*. Edited by B.D. Hunn. 1996.
- [5] F. Haller. *System Design*. Fritz Haller. Edited by Hans Wichmann. 1989.
- [6] I. Jacobson, G. Booch, J. Rumbaugh. *The Unified Software Development Process*. 1999.
- [7] J. Holt. *UML for Systems Engineering - Watching the Wheels*. 2004.
- [8] T. Bahill, J. Daniels. *UML Object-oriented and UML Tools for Hardware Design. A Case Study*. *Systems Engineering Vol.6*. 2002.
- [9] I. Jacobson, G. Booch, J. Rumbaugh. *Das UML Benutzerhandbuch*. 2006..
- [10] A. Schlueter, F. Thesseling. *Building Information Model Based Energy/Exergy Performance Assessment in Early Design Stages*. *Automation in Construction*. 2008.
- [11] A. Schlueter, F. Thesseling. *Balancing Design and Performance in Building Retrofitting – a Case Study based on parametric Modelling*. 2008.
- [12] D. Floreano, C. Mattiussi. *Bio-inspired Artificial Intelligence*. 2008.
- [13] R. Brahme, A. Mahdavi, K. Lam, S. Gupta. *Complex Building Performance Analysis in Early Stages of Design*. *Seventh International IBPSA Conference*. Rio de Janeiro, Brazil. 2001.
- [14] L. Baldini. *Advanced Distribution and Decentralized Supply. A Networked Approach for Minimum Pressure Losses and Maximum Comfort*. *Advanced Building Ventilation and Environmental Technology, 29th AIVC Conference, Tokyo, JP*. 2008.
- [15] H. Grabowski, M. Eigner. *Semantic Data-Model Requirements and Realization with a Relational Data-Structure*. *Computer-Aided Design Vol. 11*. 1979. pp. 158-168.
- [16] H. Grabowski. *Produktdatenaustausch und CAD-Normteile*. 1990.
- [17] J. Laiserin. *The Laiserin Letter*. <http://www.laiserin.com>

- [18] C. Eastman. *Building Product Models. Computer Environments Supporting Design and Construction*. 1999.
- [19] International Alliance for Interoperability (IAI). <http://www.iai-international.org>
- [20] F. Thesseling, A. Schlueter. *Energy and Exergy Performance as Parameters in Architectural Design Sketching - a Case Study. 25th Annual Conference on Education in Computer Aided Architectural Design, Antwerpen, Belgium*. 2008.

NURBS-basierte Finite Elemente als Basis für die Integration von Ingenieur Anwendungen

Peter Stein

Bauhaus-Universität Weimar, Graduiertenkolleg 1462, 99423 Weimar, Deutschland

E-mail: peter.stein@uni-weimar.de, Telefon: +49(0)3643/584110

Kurzfassung

Bauwerksinformationsmodelle (BIM) besitzen großes Potenzial zur Steigerung der Produktivität und Qualität von Bauplanungsprozessen. Dieses Konzept hat jedoch noch keine weite Verbreitung gefunden, was unter anderem auf die unzureichende Kopplung der Tragwerksplanung mit den Bauwerksmodellen zurückzuführen ist. Bisherige Arbeiten verwendeten eine vollständig volumenorientierte Formulierung zusammen mit der p-Version der Finiten Elemente, um numerische Modelle von einem Bauwerksmodell abzuleiten. Dieser Ansatz führt aber zu erheblich größeren Gleichungssystemen und es verbleibt immer noch ein signifikanter Diskretisierungsfehler im numerischen Modell. In diesem Artikel wird daher ein alternativer Ansatz umrissen, mit dem sich der Diskretisierungsfehler reduzieren lässt. Dazu werden die volumenorientierten Modelle mit der Isogeometrischen Analyse kombiniert. Deren Konzept ist, kurz gesagt, die Verwendung der Basisfunktionen NURBS-basierter Geometrie als Formfunktionen für Finite Elemente. Der Vorteil daran liegt in den günstigen numerischen Eigenschaften dieser Funktionen - und in dem Umstand, dass sich die geometrische Beschreibung eines Objektes *exakt* in ein FE-Netz überführen lässt. Der Diskretisierungsfehler lässt sich so stark reduzieren.

Dennoch ist die direkte Verwendung von NURBS-Funktionen in der FEM nicht ohne weiteres möglich. Dieser Artikel geht auf ein paar Besonderheiten von NURBS-Funktionen ein und betrachtet wichtige Punkte, die bei der Implementierung eines NURBS-basierten Scheibenelementes auffielen.

Stichworte

NURBS, Isogeometrische Analyse, Building Information Modelling

1 Einleitung

Digitale Bauwerksmodelle sind ein vielversprechender Ansatz für die Vereinigung der heterogenen Planungsprozesse des Bauwesens. Ausgangspunkt dieses Konzeptes ist es, sämtliche zu einem Bauwerk existierenden Pläne mit einem zentralen Objektmodell zu verknüpfen und gebündelt vorzuhalten. Die Motivation dahinter ist der Umstand, dass die Pläne der verschiedenen Fachdisziplinen wie Gebäudetechnik oder Kostenplanung im Prinzip *Teilmodelle* des künftigen Bauwerkes darstellen, da die einzelnen Fachplaner durch ihre *fachspezifische Sicht* vom Gesamtmodell des Gebäudes abstrahieren. Das ermöglicht eine voneinander unabhängige Bearbeitung der Planungsaufgaben, führt aber letztendlich zu Konflikten bei der Zusammenführung der Teilpläne in den Gesamtplan.

Durch das Einpflegen der Teilpläne in das Gebäudemodell stehen jedoch allen Beteiligten Parteien die jeweils aktuellsten Pläne zur Verfügung und Inkonsistenzen können verringert oder sogar ausgeschlossen werden, da sich gegenseitige Auswirkungen der einzelnen Pläne jederzeit prüfen lassen. Darüber hinaus sind die Fachmodelle mit der Geometrie des Bauwerkes verknüpft, das heißt, dass sich Änderungen in der Bauwerksgeometrie unmittelbar auf davon abgeleitete Größen (wie Flächen bestimmter Nutzungsarten oder Stückzahlen von verbauten Elementen) auswirken.

Ungeachtet dieser Vorteile haben sich Bauwerksmodelle im allgemeinen Planungsprozess aber noch nicht durchgesetzt, was unter anderem auf eine geringe Motivation der Industrie und auf rechtliche Komplikationen zurückzuführen ist [3]. Es lässt sich aber noch ein weiterer Grund identifizieren: die unzureichende Kopplung des Tragwerksmodells mit dem Bauwerksmodell. Die Ursache dafür ist in den Eigenschaften von Strukturmodellen und Finiten Elementen verwurzelt:

1. Für die Tragwerksplanung wird ein Bauwerk in eine Vielzahl von strukturellen Elementen wie Balken, Platten oder Stützen zerlegt. Diese werden dann durch die Übertragung von Auflagerreaktionen und Verschiebungsgrößen miteinander gekoppelt und erlauben so eine getrennte Analyse der Komponenten. Diese Teilmodelle sind aber in der Regel dimensionsreduziert, das heißt entweder werden bei ihnen gewisse physikalische Effekte vernachlässigt oder ihr Verformungsverhalten wird teilweise vorbestimmt [8]. Beispiele für diese Praxis finden sich mit der Vernachlässigung zeitabhängiger Parameter oder mit dem „Verhindern“ von Schubverformungen.

Die Vorteile dieses Vorgehens sind offensichtlich: die Unbekannten in den vereinfachten Modelle sind zunächst einfacher zu bestimmen und die Ergebnisse sind besser zu interpretieren. Auch findet die Bemessung von tragenden Bauteilen üblicherweise an solchen vereinfachten Modellen statt. Die Dimensionsreduktion führt aber auch zu unterschiedlichen Schnittgrößen in den verschiedenen Teilmodellen, so dass, um eine Kopplung von Modellen umzusetzen, spezielle Kopplungsbedingungen definiert werden müssen. Da dies ein generelles Verständnis des Modellverhaltens voraussetzt kann dieser Schritt - nach Kenntnis des Autors - nicht automatisiert werden.

2. Das strukturelle Verhalten eines Bauwerkes wird üblicherweise mit einem FE-Modell simuliert. Dabei wird das geometrische Modell des Gebäudes - in der Regel - mit linearen Elementen dis-

kretisiert, was (abgesehen von einfachen Bauteilformen) zu einer Approximation der originalen Geometrie führt. Das resultierende numerische Modell beschreibt also nur ein *benachbartes Problem*. Die Genauigkeit der Lösung desselben ist also mindestens durch die „Distanz“ des Modells vom ursprünglichen Problem begrenzt.

Dazu kommt, dass die oben genannte Approximation eine Rekonstruktion der originalen Geometrie aus dem Elementnetz im Allgemeinen nicht zulässt, da eventuell vorhandene Krümmungsinformationen bei der Diskretisierung verloren gehen. Bei einer Überarbeitung des ursprünglichen Modells muss das FE-Netz also (zumindest teilweise) neu vernetzt werden - inklusive der manuellen Definition der Kopplungsbedingungen.

1.1 Bisherige Ansätze

In den letzten Jahren haben sich zwei Dissertationen mit der Integration von Tragwerksplanung und Gebäudemodell-basiertem Planungsprozess beschäftigt. Beide Arbeiten verwenden einen volumenorientierten Ansatz zusammen mit der p -Version der FEM. Dabei konzentriert sich Romberg [10] auf die Gewinnung geeigneter Elementnetze aus dem Gebäudemodell, während [6] die effiziente Behandlung der daraus entstehenden Gleichungssysteme und die Einbindung der numerischen Modelle in den Planungsprozess behandelt.

Für die Erzeugung des numerischen Modells wurde das Bauwerksmodell (also eine semantische, objektorientierte Beschreibung) zunächst in ein *Boundary-representation*-Modell (BRep) konvertiert und von Überlappungen und Fugen bereinigt. Dieses Modell wurde wiederum in ein so genanntes „Verbindungsmodell“ transformiert, welches die Bauwerksgeometrie als eine Kombination aus *Differenz-* und *Verbindungsobjekten* darstellt. Diese Objekte sind Hexaeder-förmig oder lassen sich durch *Sweeping* einer polygonal begrenzten Fläche gewinnen [11] - sind also vergleichsweise einfach mit Hexaederelementen zu vernetzen.

Da diese mitunter recht große Seitenverhältnisse besitzen, wurden zur Diskretisierung Hexaederelemente auf der Basis der p -Version der FEM verwendet die zur Berechnung sowohl „dicker“, gedrungener Körper als auch für die Simulation dünnwandiger Strukturen eingesetzt werden können [8]. Zusammen mit der volumenorientierten Formulierung führt dies zu vergleichsweise großen Gleichungssystemen. In Niggel [6] wurde das resultierende Modell daher durch eine *rekursive Substrukturierung* und *Kondensation* der Teilsysteme vereinfacht. Die Zerlegung wurde dabei in Abhängigkeit von den strukturellen Beziehungen der Bauwerkskomponenten durchgeführt. Das ermöglichte es letztendlich, die Steifigkeitsmatrizen der einzelnen Komponenten unabhängig voneinander zu berechnen und unter Berücksichtigung der Bauwerksstruktur miteinander zu kombinieren. Das resultiert in einer schnelleren Neuberechnung der Systemmatrix bei lokalen Modifikationen von Teilsystemen und es erlaubt zudem die parallele Arbeit an unterschiedlichen Teilen eines Gebäudemodells. Die betrachtete Arbeit demonstriert abschließend die Handhabbarkeit volumenorientierter Tragwerkssimulation in Verbindung mit Bauwerksmodellen anhand

einer Bauprozess-Simulation sowie an der Bemessung von Stahlbetonbauteilen auf Basis der volumenorientierten Berechnungsergebnisse.

Wie der Autor jedoch anmerkt, verbleibt im Modell ein merklicher Diskretisierungsfehler [6].

Ein Ansatz, der die Reduktion des verbleibenden Diskretisierungsfehlers verspricht, ist mit der Kombination aus volumenorientierter Formulierung und der *Isogeometrischen Analyse* gegeben [1, 4]. Das Prinzip dieser relativ jungen Erweiterung der FEM ist, grob gesagt, die Verwendung von *Non-uniform rational B-Spline* (NURBS)-Funktionen sowohl zur Beschreibung der Geometrie eines Objektes als auch als Basisfunktionen für Finite Elemente¹.

NURBS sind im Bereich der CAD und der Computergraphik weit verbreitet und erlauben die Darstellung einer großen Bandbreite geometrischer Objekte, von einfachen Linien bis hin zu komplex geformten Oberflächen und dreidimensionaler Körper. Die Haupteigenschaft der Isogeometrischen Analyse ist die exakte Übertragung einer durch NURBS beschriebenen Objektgeometrie auf ein Finites Element. Das entstehende numerische Modell beschreibt also nicht mehr ein benachbartes Problem sondern die exakte Geometrie.

Dieser Artikel beschreibt daher einen Ansatz, der volumenorientierte Modelle und die Isogeometrische Analyse kombinieren soll. Dazu wird in Abschnitt 2 eine kurze Beschreibung der Eigenschaften von NURBS-Funktionen und NURBS-basierter Geometrie vorgenommen. Die Details dazu können Piegl und Tiller [7] sowie Rogers [9] entnommen werden.

Die Verwendung von NURBS-Funktionen in der FEM bringt einige Besonderheiten und mögliche Problempunkte mit sich, die in Abschnitt 3 kurz umrissen werden sollen. Das umfasst beispielsweise die numerische Integration der Elementsteifigkeitsmatrizen und die Bestimmung der Ableitungen der NURBS-Funktionen.

Abschnitt 4 geht dann auf weitere Schritte ein, die für eine Kopplung der Tragwerksplanung mit Bauwerksmodellen zu berücksichtigen sind.

¹Es existieren zwar noch andere Funktionsklassen, die hierbei verwendet werden können [4], aber NURBS wurden wegen ihres ausgereiften Konzepts, ihrer weiten Verbreitung und der zahlreichen für sie existierenden Algorithmen ausgewählt.

2 Geometrische Beschreibungen mittels NURBS

Geometrische Beschreibungen auf NURBS-Basis bestehen immer aus einer Menge von Basisfunktionen und den ihnen zugeordneten *Kontrollpunkten*. Die eigentliche Geometrie einer Kurve oder einer Fläche ergibt sich durch die Interpolation der Koordinaten der Kontrollpunkte. Einer parametrische Kurve liegt dabei ein so genanntes *Kontrollpolygon* zugrunde, während parametrische Flächen oder Körper durch ein räumliches Gitter aus Kontrollpunkten gebildet werden.

Die bestimmenden Elemente der eben erwähnten Interpolation sind die NURBS-Funktionen, also stückweise rationale Funktionen, die auf einem parametrischen Bereich Ω_N definiert sind. Die Punkte entlang einer Kurve oder auf einer Fläche ergeben sich dann durch die Iteration über diesen Parameterbereich: für jeden Punkt in Ω_N wird der Wert der Basisfunktionen bestimmt und damit die Kontrollpunkte „gewichtet“. Aus der stückweisen Definition der Basisfunktionen ergibt sich dann eine stückweise geometrische Beschreibung.

Eine NURBS-Kurve C ist dementsprechend gegeben durch

$$C(\xi) = \sum_{i=0}^n R_{i,p}(\xi) \mathbf{P}_i \quad [1]$$

dabei ist ξ die gegenwärtige parametrische Koordinate in Ω_N , \mathbf{P}_i sind die $(n+1)$ Kontrollpunkte und $R_{i,p}$ sind die entsprechenden Basisfunktionen p -ten Grades. Eine NURBS-Fläche (ein so genannter *Patch*) wird ähnlich definiert als die Abbildung aus einem zweidimensionalen Parameterraum nach \mathbb{R}^d :

$$\mathcal{P}(\xi, \eta) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m R_{i,p}(\xi) R_{j,q}(\eta) \mathbf{P}_{ij} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m R_{ij,pq}(\xi, \eta) \mathbf{P}_{ij} \quad [2]$$

hierbei sind (ξ, η) die Koordinaten eines Punktes in Ω_N . Die bivariaten Basisfunktionen $R_{ij,pq}$ ergeben sich dabei aus dem Produkt der univariaten Basisfunktionen $R_{i,p}$ und $R_{j,q}$ und erlauben so eine unterschiedliche Anzahl von Kontrollpunkten und Funktionsgraden p, q in den beiden parametrischen Richtungen.

Ein NURBS-*Solid* ergibt sich, in Analogie zu den beiden vorangegangenen Definitionen, aus

$$\mathcal{S}(\xi, \eta, \chi) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^l R_{ijk,pqr}(\xi, \eta, \chi) \mathbf{P}_{ijk} \quad [3]$$

nur dass hier die Basisfunktionen $R_{ijk,pqr}$ aus dem Produkt dreier univariater Basen gebildet werden - und somit wieder sowohl unterschiedliche Funktionsgrade als auch unterschiedliche Mengen von Kontrollpunkten in den unterschiedlichen Raumdimensionen erlauben. Der Nachteil ist aber der *Overhead*, der sich hierdurch ergeben kann: selbst für die Beschreibung einfacher Geometrien und planar begrenzter Körper ist ein *vollständiges räumliches Gitter* aus Kontrollpunkten erforderlich, auch wenn, beispielsweise im Falle eines einfachen Würfels acht Knoten für die Eckpunkte ausreichen würden.

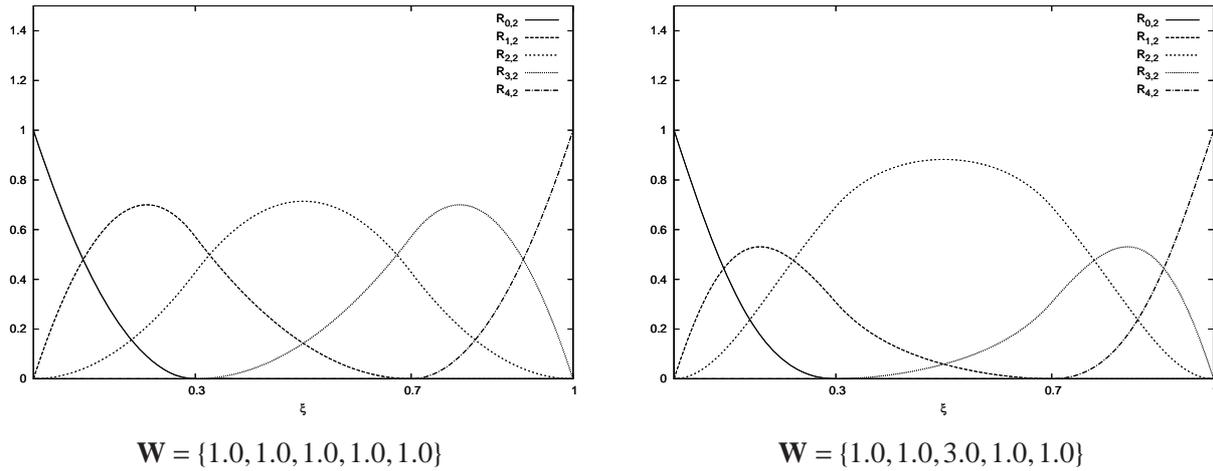


Abb. 1: Der Einfluss der Wichtungsfaktoren auf die NURBS-Funktionen. Die Bilder zeigen die quadratischen Basisfunktionen die sich aus dem Knotenvektor $\Xi = \{0, 0, 0, 0.3, 0.7, 1, 1, 1\}$ ergeben. Im Bild auf der rechten Seite wurde das Gewicht w_2 vergrößert, welches der Funktion $R_{2,2}$ zugeordnet ist.

2.1 Basisfunktionen

Die univariaten Basisfunktionen $R_{i,p}$, die bei der Interpolation der Kontrollpunkte verwendet werden, ergeben sich wiederum aus der Kombination einer Reihe von B-Spline-Funktionen $N_{j,p}$ zusammen mit einer Menge von Wichtungsfaktoren w_j :

$$R_{i,p}(\xi) = \frac{N_{i,p}(\xi)w_i}{\sum_{j=0}^n N_{j,p}(\xi)w_j} \quad , \quad w_i > 0 \quad \forall i \quad [4]$$

Dabei steuern die w_i den Einfluss der Kontrollpunkte auf die Kurve, wie in Abbildung 1 zu sehen ist. Die (geometrische) Motivation hinter der Einführung der Wichtungsfaktoren sowie der rationalen Basisfunktionen kann [7, 9] entnommen werden.

Die Bestimmung der B-Spline-Funktionen $N_{i,p}$ gestaltet sich dank einer Rekursionsvorschrift nach COX & DE BOOR sehr effizient:

$$N_{i,0}(\xi) = \begin{cases} 1 & \text{für } \xi \in [\xi_i, \xi_{i+1}) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad [5]$$

$$N_{i,p}(\xi) = \frac{\xi - \xi_i}{\xi_{i+p} - \xi_i} N_{i,p-1}(\xi) + \frac{\xi_{i+p+1} - \xi}{\xi_{i+p+1} - \xi_{i+1}} N_{i+1,p-1}(\xi)$$

Das Schlüsselement in den Berechnungen ist dabei der so genannte *Knotenvektor* Ξ , der eine Reihe von parametrischen Koordinaten ξ_i enthält. Diese bezeichnen die Endpunkte der *Knotenspannen*, also der Segmente in Ω_N , die später auf Kurven- und Flächenstücke abgebildet werden. Die Basisfunktionen sind, abhängig von ihrem Grad, immer nur auf bestimmten Knotenspannen ungleich Null, wie in den Abbildungen 1 und 2 gezeigt.

Wie zu Beginn schon angedeutet, besitzen NURBS-Funktionen für die Anwendung als Formfunktionen günstige Eigenschaften, von denen im Folgenden einige aufgelistet werden sollen. Bezüglich der Details siehe Literaturangaben [2, 4, 7, 9].

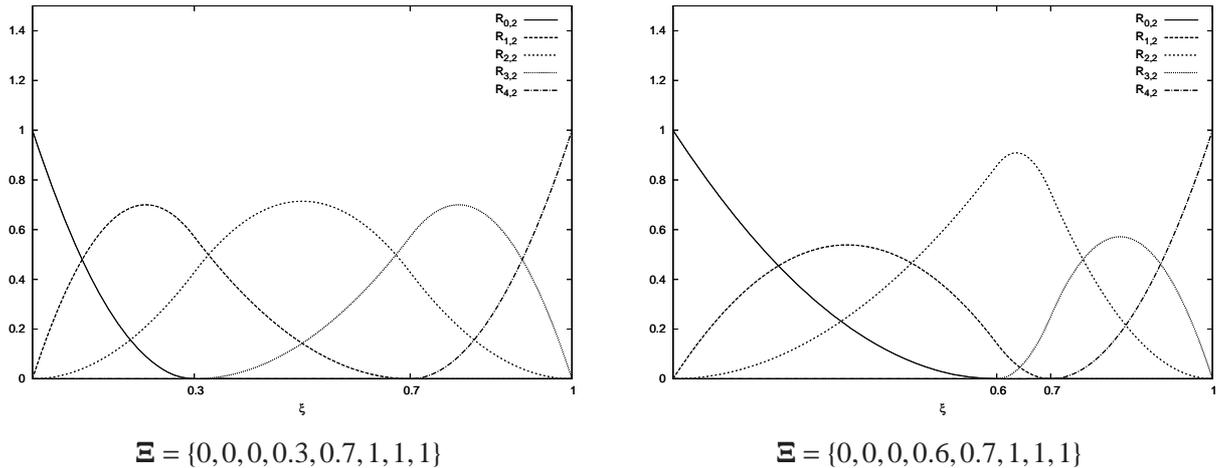


Abb. 2: Der Einfluss der Knotenspannen auf die NURBS-Basisfunktionen. Die Bilder zeigen die quadratischen ($p = 2$) Basisfunktionen die sich aus dem jeweils unter den Bildern gezeigten Knotenvektoren ergeben. Der Einfluss der Knotenspannen kann anhand des rechten Bildes erkannt werden, in dem der Knoten an der Stelle $\xi_3 = 0.3$ an die Stelle $\xi = 0.6$ verschoben wurde.

1. Die Basisfunktionen sind im ganzen Parameterraum nichtnegativ

$$R_{i,p}(\xi) \geq 0 \quad \forall i, p, \xi \in \Omega_N \quad [6]$$

2. Sie stellen eine „Zerlegung der Eins“ dar:

$$\sum_i R_{i,p}(\xi) = 1 \quad \forall i, p, \xi \in \Omega_N \quad [7]$$

3. Während die Basisfunktionen an den Rändern des Parameterraumes C^0 -Stetigkeit aufweisen, besitzen sie innerhalb des Parameterraumes im Allgemeinen eine höhere Stetigkeit. Diese hängt von der Vielfachheit einzelner Knoten ab: ein Knoten der Vielfachheit k reduziert die Stetigkeit der Basisfunktionen auf C^{p-k} .
4. Die Funktionen besitzen nur einen lokalen Einflussbereich: $R_{i,p}(\xi) = 0$ für $\xi \notin [\xi_i, \xi_{i+p+1})$. Innerhalb einer beliebigen Knotenspanne sind also höchstens $(p + 1)$ Funktionen nichtnegativ, was eine sehr effiziente Auswertung ermöglicht. Ein entsprechender Algorithmus dafür kann [7] entnommen werden.

3 Isogeometrische Analyse mit NURBS-basierten Finiten Elementen

Finite Elemente auf NURBS-Basis besitzen einige charakteristische Unterschiede verglichen mit „klassischen“ Finiten Elementen, die sich unter Umständen erst bei der Implementierung bemerkbar machen. Für den vorliegenden Artikel wurde die Implementierung nur für ein NURBS-basiertes Scheibenelement vorgenommen, die Erweiterung auf ein NURBS-Solid sollte aber relativ direkt möglich sein.

Der offensichtliche Unterschied besteht darin, dass NURBS-Patches nicht einzelne Elementen bilden, sondern eher „Teilnetze“: Patches bestehen, in Abhängigkeit ihrer Parametrisierung (die durch die Knotenvektoren gegeben ist) in der Regel aus mehreren Elementen. Die Parametrisierung des eindimensionalen Parameterraumes, die in Abbildung 1 dargestellt ist, würde beispielsweise drei Elemente über den Knotenspannen $[0, 0.3)$, $[0.3, 0.7)$ und $[0.7, 1)$ definieren.

Die direkte Übertragung der Gauß-Quadratur auf NURBS-Elemente führt nun dazu, dass die üblichen Quadratur-Schemata nicht auf die Patches, sondern auf die Knotenspannen angewandt werden. Die Integration über ein NURBS-Scheibenelement mit quadratischen Ansatzfunktionen, bestehend aus neun Segmenten, würde also $2 \times 2 \times 9 = 36$ Gauß-Punkte erfordern. Die höhere Stetigkeit der Basisfunktionen erlaubt es hingegen, wie in Hughes et al. [5] nahegelegt, eine wesentlich geringere Anzahl dieser Punkte zu verwenden, da die Anzahl der benötigten Integrationspunkte scheinbar unabhängig vom tatsächlichen Funktionsgrad ist. Das bedeutet effektiv, dass die numerische Integration auf Patch-Ebene durchgeführt werden kann - wie es schon in Hughes et al. [4] getan wurde. Dabei wurden verschiedene Mengen von Gauß-Punkten verwendet, wobei angenommen wurde, dass (1) die (rationalen) NURBS-Funktionen (polynomiale) B-Spline-Funktionen vom selben Funktionsgrad sind und (2) dass die Jacobi-Determinante konstant bleibt - was beides, wie die Autoren betonen, bloße Näherungen sind. Untersuchungen mit einer unterschiedlichen Anzahl von Gauß-Punkten haben dort bei *ausreichend feinen* Netzen aber zu keinen signifikanten Unterschieden in den Resultaten geführt.

Die Form der Basisfunktionen beeinflusst zudem die Ermittlung der Steifigkeitsmatrix \mathbf{K}_p eines Patches. Diese berechnet sich wie üblich nach

$$\mathbf{K}_p = \int_{A_p} \mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{B} dA_p = \int_{\Omega_N} \mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{B} J d\xi d\eta \quad [8]$$

wobei A_p die Fläche des Patches ist, \mathbf{B} die Verzerrungs-Verschiebungs-Matrix, \mathbf{E} die Matrix der Materialkonstanten und J die Jacobi-Determinante. Für ein NURBS-basiertes Scheibenelement basiert diese Auswertung auf den bekannten kinematischen Beziehungen

$$\boldsymbol{\epsilon} = \begin{bmatrix} u_{,x} \\ v_{,y} \\ u_{,y} + v_{,x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\cdot)_{,x} & 0 \\ 0 & (\cdot)_{,y} \\ (\cdot)_{,y} & (\cdot)_{,x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad [9]$$

Dabei ist $[u, v]^T = \sum_i R_{i,p}(\xi, \eta) [u_i, v_i]^T$ der Vektor der Verschiebungen für einen gegebenen Punkt (ξ, η) im Parametrischen Raum Ω_N , der sich aus der Interpolation der Verschiebungen der Kontrollpunkte ergibt:

$$\mathbf{u}(\xi, \eta) = \begin{bmatrix} u(\xi, \eta) \\ v(\xi, \eta) \end{bmatrix} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m R_{i,j,pq}(\xi, \eta) \mathbf{u}_{ij} \quad [10]$$

Die für die Bestimmung der kinematischen Beziehungen notwendige Jacobi-Matrix berechnet sich durch die Ableitung der Patch-Koordinaten

$$\mathcal{P}(\xi, \eta) = \begin{bmatrix} x(\xi, \eta) \\ y(\xi, \eta) \end{bmatrix} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m R_{i,j,pq}(\xi, \eta) \mathbf{P}_{ij} \quad [11]$$

koinzidente Kontrollpunkte

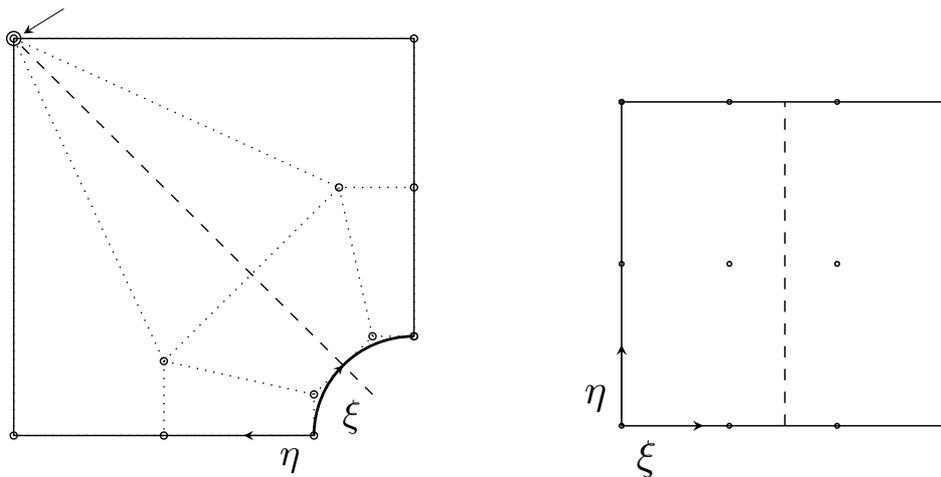


Abb. 3: Eine Scheibe, bestehend aus zwei Elementen, die durch einen einzelnen NURBS-Patch über einem 3×4 -Netz aus Kontrollpunkten dargestellt wird. Die hier verwendeten Knotenvektoren sind $\Xi = \{0, 0, 0, 0.5, 1, 1, 1\}$ und $\mathcal{H} = \{0, 0, 0, 1, 1, 1\}$ und führen auf biquadratische Ansatzfunktionen. Das rechte der beiden Bilder zeigt den Parameterraum aus zwei Segmenten und die (näherungsweise) Position der Kontrollpunkte. Die Segmente werden dann auf die Geometrie der Scheibe im linken Bild abgebildet, wobei in der linken oberen Ecke zwei Kontrollpunkte übereinander gelegt werden müssen um die Ecke zu erzeugen. (Beispiel aus [4]).

nach den parametrischen Koordinaten (ξ, η) und durch Invertierung der resultierenden Matrix der partiellen Ableitungen. Problematisch ist hierbei der Umstand, dass NURBS-Funktionen *rationale Funktionen* sind, deren Ableitungen umständlicher zu berechnen sind als die Ableitungen polynomialer Funktionen. Dazu kommt, dass die Bildung höherer Ableitung numerisch instabil ist, da der Nenner der bestimmenden Funktion zunehmend größere Exponenten besitzt. Dem Autor sind keine Algorithmen zur Bestimmung der Ableitung der rationalen Basisfunktionen bekannt - es existieren jedoch Schemata, mit deren Hilfe die Tangenten an NURBS-Kurven und -flächen bestimmt werden können (siehe zum Beispiel Piegl und Tiller [7] sowie [9]). Da diese vom jeweiligen Kontrollgitter abhängen, lassen sie sich aber nicht direkt für die Berechnung der Ableitungen der Basisfunktionen anwenden. Die Ableitungen lassen sich prinzipiell mit einem Differenzschema ausrechnen (welches die effiziente Auswertung der Basisfunktionen ausnutzt), dennoch bedarf dieser Punkt weiterer Untersuchungen.

4 Zusammenfassung und künftige Arbeit

Die Isogeometrische Analyse stellt einen vielversprechenden Ansatz für die Verknüpfung von geometrischer Modellierung und numerischer Simulation dar. Wie im Rahmen dieses Artikels kurz dargelegt - und wie eine wachsende Anzahl von Artikeln belegt - besitzen NURBS-Funktionen eine Reihe von günstigen Eigenschaften im Hinblick auf die numerische Analyse. Ein Punkt, der in all diesen Artikeln noch nicht betrachtet wurde ist die Herkunft der geometrischen Modelle. Damit von der exakten Übertragung

der Objektgeometrie auf ein Finites Element profitiert werden kann, muss die Geometrie durch NURBS-basierte Primitive beschrieben werden. NURBS sind zwar Bestandteil aller professionellen CAD-Pakete aber die damit erzeugten Modelle sind im Allgemeinen nicht NURBS-basiert. Die Erzeugung eines Patch-basierten Modells ist keine triviale Aufgabe: ausgehend von einem Kontrollpunkt-Netz und assoziierten Knotenvektoren ist die Erzeugung einer geometrischen Beschreibung einfach - das Problem ist die Bestimmung eines Kontroll-Netzes und einer geeigneten Parametrisierung für eine bestimmte „Zielgeometrie“. Das mag für einfache Geometrien noch manuell möglich sein, es wird aber für größere und komplexere Modelle zunehmend schwieriger. Ein Faktor dabei ist der Umstand, dass die Abbildung des Parameterraumes Ω_N auf die tatsächliche Geometrie nicht immer eineindeutig ist, wie man in Abb. 3 sehen kann.

Die Patch-Generierung ist die Kernaufgabe, die es für die Kopplung zwischen einem IFC-basierten Gebäudemodell und der Tragwerksplanung mittels Isogeometrischer Analyse zu bewältigen gilt. Dabei muss die semantische Beschreibung des Gebäudes in ein komplexes, Patch-basiertes Modell übersetzt werden. Man mag hierbei einwenden, dass sich Gebäude vorwiegend aus wenigen Grundobjekten mit planarer Berandung zusammensetzen, dass diese Übersetzung also kein Problem darstellt. Es gilt aber zu bedenken, dass es gerade die *Kopplung* zwischen den strukturellen Komponenten ist, die einen großen Aufwand erfordert. Für einen stetigen Anschluss benachbarter Patches müssen sowohl deren Kontrollnetze als auch ihre Parametrisierungen übereinstimmen. Das führt zunächst zur Einführung einer Vielzahl von überflüssigen Kontrollpunkten und es verhindert eine effektive lokale Verfeinerung der Modelle, da sich die Veränderungen in einem Patch durch das gesamte Patch-Modell fortpflanzen.

Der nächste Schritt für die Kopplung wäre dann die Untersuchung, wie sich das erzeugte Tragwerksmodell mit dem Gebäudemodell verknüpfen lässt, also *welche* Ergebnisse der Tragwerksplanung *wie* an das Gebäudemodell übergeben werden müssen, damit das Tragwerksmodell unter anderem den anderen Planungsparteien zur Verfügung steht. Es ist gerade diese Verknüpfung, die den Erfolg des hier beschriebenen Ansatzes bestimmt.

Literaturverzeichnis

- [1] Y. Bazilevs, V. M. Calo, J. A. Cottrell, J. A. Evans, T. J. R. Hughes, S. Lipton, S., M. A. Scott, and T. W. Sederberg. *Isogeometric Analysis using T-Splines*. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, doi:10.1016/j.cma.2009.02.036. 2009.
- [2] J. A. Cottrell, T. J. R. Hughes, and A. Reali. *Studies of Refinement and Continuity in Isogeometric Structural Analysis*. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 196. 2007. pp. 4160-4183.
- [3] W. Gielingh. *An Assessment of the current State of Product Data Technologies*. In: *Computer-Aided Design*, 40. 2008. pp. 750-759.
- [4] T. J. R. Hughes, J. A. Cottrell, and Y. Bazilevs. *Isogeometric Analysis. CAD, Finite Elements, NURBS, Exact Geometry and Mesh Refinement*. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 194. 2005. pp. 4135-4195.
- [5] T. J. R. Hughes, A. Reali, and G. Sangalli. *Efficient Quadrature for NURBS-based isogeometric Analysis*. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, doi:10.1016/j.cma.2008.12.004. 2008.
- [6] A. Niggel. *Tragwerksanalyse am volumenorientierten Gesamtmodell*. Dissertation, Technische Universität München. 2007.
- [7] L. Piegl, W. Tiller. *The NURBS Book*. 1997.
- [8] E. Rank, A. Düster, A. Muthler, and R. Romberg. *High Order solid Elements for thin-walled Structures with Applications to linear and non-linear structural Analysis*. In: P. Neittaanmäki, T. Rossi, S. Korotov, E. Oñate, J. Périaux, and D. Knörzner (eds.). *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering ECCOMAS*. 2004.
- [9] D. F. Rogers. *An Introduction to NURBS. With historical Perspective*. 2001.
- [10] R. Romberg. *Gebäudemodell-basierte Strukturanalyse im Bauwesen*. Dissertation, Technische Universität München. 2005.
- [11] R. Romberg, A. Niggel, C. van Treeck, and E. Rank. *Structural Analysis based on the Product Model Standard IFC*. In: *10th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering ICCCB*. 2004.

Wavelet-basierte Kompression von bathymetrischen Geländedaten

Christian Asche

Leibniz Universität Hannover, Institut für Bauinformatik, 30167 Hannover, Deutschland, E-mail: asche@bauinf.uni-hannover.de, Telefon: +49(0)511/7625938

Kurzfassung

Mit zunehmend technologisch hochwertigeren Aufnahmeverfahren wächst die Dichte von geologischen und bathymetrischen Messdaten. Die vorliegende Arbeit gibt eine Einführung in die Diskrete Wavelet-Transformation. Weiterhin werden die Möglichkeiten der Kompression von bathymetrischen Geländedaten aus dichten, regulären Punktdaten mit Hilfe geeigneter Algorithmen aus der Bildverarbeitung untersucht.

Stichworte

Wavelet, Wavelet-Transformation, Wavelet-Kompression, Bathymetrie, Morphologie

1 Einleitung

Aus der Verfügbarkeit hoch auflösender, gerasteter, bathymetrischer Geländedaten ergibt sich die Notwendigkeit zur effektiven Kompression. Ein geeignetes Mittel hierfür sind Algorithmen aus der Bildverarbeitung.

1.1 Bathymetriemodelle

In den letzten Jahren konnte die Tendenz beobachtet werden, dass vermehrt reguläre ozeanografische Vermessungsdaten aus den Küstennahgebieten mit zunehmend feinerer Detaillierung zur Verfügung stehen. Im mehrjährigen Projekt *Identifikation morphologischer Tendenzen und Geschwindigkeiten im Küstennahbereich (ImTG)* wurden u. a. Raster-Datensätze gesammelt, archiviert und ausgewertet [4]. Diese basieren auf Fächerecholot-Peilungen, Laserscan-Befliegungen und Satelliten-Daten mit räumlichen Abständen bis zu unter einem Meter. Es lassen sich Küstenbereiche unterschiedlichen Charakters

beobachten. Exemplarisch ist ein Gebiet der Ostfriesischen Inseln dargestellt, das große Flächen mit sehr geringer Neigung oder Variation aufweist (siehe Abb. 1).

Da in Zukunft noch mehr hoch aufgelöste Datensätze zu erwarten sind, stellt sich bereits heute die Frage nach einer möglichst verlustfreien Kompression und Archivierung solcher Daten einerseits, und einer effizienten (ggf. echtzeitfähigen) Verarbeitung andererseits. Darüber hinaus ist zu erwarten, dass geologische Strukturen und morphologische Aktivitäten unter Berücksichtigung räumlicher und zeitlicher Gegebenheiten identifizierbar werden.

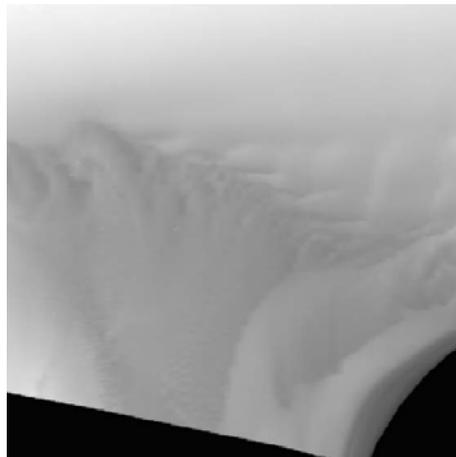


Abb. 1: Grauwert-Darstellung einer Vermessung vor Langeoog — ca 20 km² mit räumlichen Abständen von 5 m. Die schwarzen Gebiete stellen ein 10 m-(Höhen-)Niveau außerhalb des Messbereichs dar.

Betrachtet man eine gerasterte Topografie, so kann man diese auch als Digitalbild auffassen. Den jeweiligen Tiefenwerten können Grauwerte zugeordnet werden. Dieser Ansatz erlaubt es nun, die in der Bildverarbeitung gängigen Algorithmen auch auf bathymetrischen Daten anzuwenden. Das genaue Vorgehen wird in Abschnitt 3 erläutert.

1.2 Spektral- und Wavelet-Analysen

Die theoretischen Grundlagen der *Wavelet-Transformation* entstammen der Funktionsanalyse und der Signalverarbeitung. Spektralbasierte Analysen finden heute in vielfältigen Bereichen Anwendung. Klassische Signaltechnik und Bildverarbeitung sind hier sicherlich die wichtigsten Domänen. Spielten zunächst Zeitreihen- und Frequenzanalysen, wie die *z-Transformation* oder die *Fourier-Transformation*, eine starke Rolle in der Sig-

nalverarbeitung, so wuchs der Wunsch nach der Analyse von zeitlich variierenden Signalen. Einen Zwischenschritt stellt die Kurzzeit-Fourier-Transformation (*short-time Fourier-transformation* — *STFT*) dar, die prinzipiell einer Diskreten Fourier-Transformation auf einem gefensterten, endlichen Intervall des Eingangssignals entspricht. Das Problem der Frequenz-Zeit-Auflösung, d.h. die Wahl zwischen der Bestimmung der resultierenden Frequenzen im Signalausschnitt bzw. der schmalen Lokalisierung in der Zeit, kann jedoch nicht zufrieden stellend behoben werden.

In der Analyse zeitdiskreter Daten erhielt die Wavelet-Transformation in den vergangenen Jahren eine höhere praktische Bedeutung. Aufgrund der Tensor-Eigenschaft lassen sich ihre Eigenschaften auch auf die Verarbeitung flächenhafter Daten erweitern. Ein Beispiel hierfür ist das Dateiformat *JPEG2000* (siehe auch Abschnitt 2.4).

Ansätze zur Nutzung der Wavelet-Analyse für geometrische bzw. geologische Daten aus Geländemodellen findet man in Beyer [1] und Wilson et al. [6]. Im Rahmen dieser Arbeit soll nun der Fokus auf der Wavelet-Analyse liegen, die als Generalisierung der Fourier-Analyse betrachtet werden kann. Im Speziellen soll die Eigenschaft der Approximation unter Einbeziehung der Messgenauigkeit untersucht werden, die eine Kompression der Küstennahgebiets-Bathymetrie mit nachweislicher Entropie-Minimierung ermöglicht (Details in Abschnitt 4.1).

2 Wavelet-Transformation

Das Kapitel gibt eine Einführung in die Kontinuierliche Wavelet-Transformation, die Berechnung der Diskreten Wavelet-Transformation, und benennt letztlich einige Anwendungsgebiete der zweidimensionalen Diskreten Wavelet-Transformation, die die Basis der Kompressionsalgorithmen für bathymetrische Rasterdaten bildet.

2.1 Theorie der Kontinuierlichen Wavelet-Transformation

Die Kontinuierliche Wavelet-Transformation (*continual wavelet transformation* — *CWT*) hat für die Bathymetrie-Kompression lediglich einen theoretischen Hintergrund. Sie motiviert jedoch die später behandelten diskreten Transformationen.

Ein Wavelet ψ ist eine lokal begrenzte Ansatzfunktion. Anschaulich ist diese oszillierend und besitzt ein kompaktes Trägerintervall (Beispiele in Abb. 2). Wavelets zeichnen sich durch weitere Eigenschaften aus: die L^1 -Integrierbarkeit, also $\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)| dt < \infty$ und die L^2 -Integrierbarkeit mit $\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty$, sofern ψ nicht die Nullfunktion ist [3].

Ausgehend von einem „Mutter“-Wavelet ψ lassen sich durch Skalierung $\sigma > 0$ und Translation τ eine Schar an Wavelet-Funktionen generieren, die die Transformation W einer Funktion $f(u)$ über die Operation der Faltung mit dem skalierten und verschobenen Mutter-Wavelet beschreiben (siehe Formel [1]). Der Wavelet-spezifische Vorfaktor stellt hierbei eine erforderliche Normierung sicher.

$$W_{\sigma,\tau}(f) = \frac{1}{\sqrt{c_\psi}} |\sigma|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(u) \psi \left(\frac{u - \tau}{\sigma} \right) du \quad [1]$$

Das Haar-Wavelet gehört zu den anschaulichsten Vertretern. Weitere Wavelet-Typen sind in Abb. 2 dargestellt. Die vollständige Berechnung der CWT ist jedoch schwierig; eine numerische Lösung erfolgt mittels der Diskretisierung der beiden Funktionen f bzw. ψ und ihrer elementweisen Multiplikation im Frequenzraum (Details in Keller [3]).

Eine inverse Transformation der CWT ist durchführbar. Prinzipiell ist hierbei eine vollständige Integration über die Parameter σ und τ notwendig, und somit ist sie ebenfalls nur numerisch annähernd zu lösen.

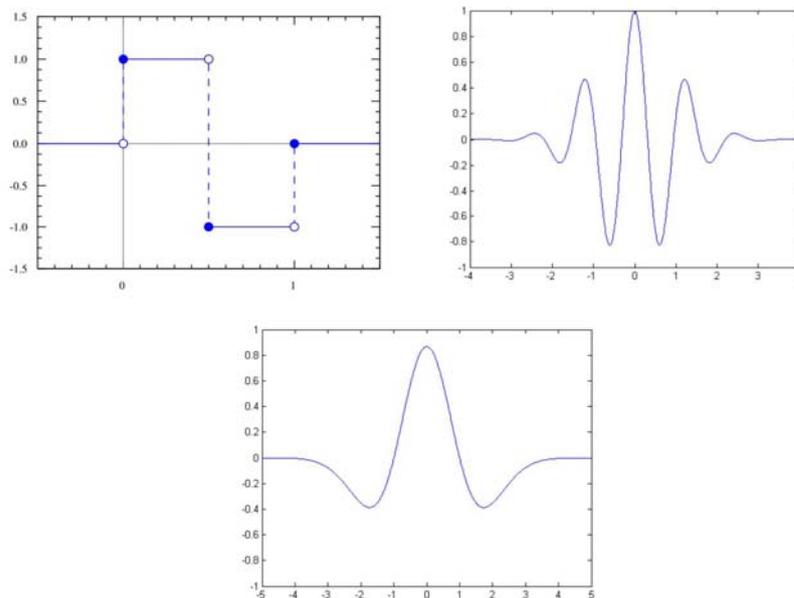


Abb. 2: Haar-Wavelet, Morlet-Wavelet und Mexican-Hat-Wavelet (unten).

2.2 Die Diskrete Wavelet-Transformation

Die Berechnung der CWT einer Funktion ist in der Regel durch eine numerische Approximation möglich. Darüber hinaus stellt sich die Frage, ob grundsätzlich der gesamte Intervallbereich der σ und τ abgedeckt werden muss. In der Tat lassen sich gute Näherungslösungen durch Austausch der kontinuierlichen Integrale mit diskreten Summen bestimmen. Der folgende Abschnitt beschreibt den Weg von der kontinuierlichen zur diskreten Transformation. Die Transformation eines Datensatzes sieht zunächst vor, dass eine (im Allgemeinen unbekannt) kontinuierliche, ein- oder zweidimensionale Funktion diskretisiert wird. Hieraus resultiert ein Vektor bzw. eine Matrix an Funktionswerten. Die weitere Vorgehensweise wird nur für den zweidimensionalen Fall der gerasterten Bathymetrie-Daten beschrieben. Im Folgenden bezeichnet die Datenmatrix die regulären Rasterdaten, die in einer $M \times N$ -Matrix gespeichert werden. Die Diskretisierung einer eindimensionalen Wavelet-Funktion erzeugt den Basisvektor des Wavelets. Analog zu den Fourier-Transformationen existieren nun die Diskrete Wavelet-Transformation (*discrete wavelet transformation* — *DWT*) und für die effiziente Berechnung der DWT die schnelle Wavelet-Transformation (*fast wavelet transformation* — *FWT*), sowohl im ein- als auch im mehrdimensionalen Raum. Letztere werden über das Tensor-Produkt gebildet. Beispiele für die Realisierung der 2D-DWT werden in Abschnitt 2.3 aufgeführt.

Die hier beschriebene DWT benutzt das Konzept der Multiskalen-Analyse. Die in Abschnitt 3 erläuterte Kompressions-Algorithmik zerlegt schrittweise die $M \times N$ -Datenmatrix in eine Folge von vier Submatrizen der Größe $\frac{M}{2} \times \frac{N}{2}$.

An dieser Stelle wird weiterhin der Begriff des Filters eingeführt: ein Filter beschreibt eine Übertragungs-Operation, die aus einer Eingabe eine modifizierte Ausgabe erzeugt. In der digitalen Bildverarbeitung werden beispielsweise Hochpass- bzw. Tiefpassfilter verwendet. Diese filtern ein Bild derart, so dass entweder eine Verschärfung der Details (HP) bzw. eine Weichzeichnung (TP) des Bildinhalts stattfindet. Die Benennung orientiert sich dabei an der Vorstellung, dass sich Signale aus hoch- bzw. tieffrequenten Anteilen zusammensetzen, die durch einen Filter verstärkt oder unterdrückt werden können.

Die DWT kann als diskretes Filter-Paket aufgefasst werden, d.h. die simultane Anwendung mehrerer Filter auf einem Signal. Zusätzlich zu der Wavelet-Funktion, deren Diskretisierung als Tiefpass-Filter g interpretiert wird, wird hierfür eine spezifische Skalierungsfunktion mit diskretem Basisvektor h definiert, der analog als Hochpass-Filter wirkt. Dieses Filterpaar zerlegt die gegebene Datenmatrix in insgesamt vier Teilmatrizen,

die sowohl die gemittelten Werte, als auch die Detail-Koeffizienten für die horizontalen, vertikalen und diagonalen Differenzen enthalten.

2.3 Orthogonale und biorthogonale Wavelet-Basis

Im Kern besteht die DWT aus zwei Multiplikationen von spärlich besetzten Matrizen (jeweils für die Zeilen- bzw. Spalten-Transformation), so dass ein hohes Optimierungspotential gegeben ist. Eine spezielle Klasse an Wavelets wird vorzugsweise in Kombination mit der DWT eingesetzt. Wichtigste Eigenschaft dieser Wavelet-Klasse ist die Orthogonalität des Wavelets- und des Skalierungsvektors g bzw. h zueinander.

An dieser Stelle wird exemplarisch die Gruppe der Daubechies-Wavelets genannt; weitere orthogonale Wavelets sind konstruierbar. Daubechies-Wavelets unterliegen einer Ordnung, die die gerade Anzahl der Transformationskoeffizienten angibt (zwei bis 20). Der spezielle Fall des Daubechies-Wavelets mit zwei Koeffizienten (D2) wird als Haar-Basis bezeichnet. Die Koeffizienten und die Wavelet-Konstruktion können in der angegebenen Literatur eingesehen werden. In den untersuchten Beispielen werden die orthogonalen Wavelets D2, D4 und D6 verwendet.

Eine weitere Klasse beinhaltet die biorthogonalen Wavelets. Im Gegensatz zu den oben beschriebenen orthogonalen Wavelets werden für diese jeweils unterschiedlich lange Koeffizienten-Vektoren für die Hochpass-Filter als auch für die Tiefpass-Filter benötigt. Die vorliegende Arbeit untersucht ferner die biorthogonalen Cohen-Daubechies-Feauveau-Wavelets $CDF53$ und $CDF97$ in Bezug auf verlustbehaftete Kompression (die Zahlen geben hierbei die Anzahl der Koeffizienten für die Filter an).

2.4 Klassische Anwendungen

Diskrete Wavelet-Transformationen kommen überwiegend in der Signalanalyse und Datenkompression zum Einsatz. An dieser Stelle sollen exemplarische Anwendungen aus der 2-D-Datenverarbeitung genannt werden, die als Einstieg in die vorliegende Arbeit aufgefasst werden können. Signale mit starkem Rauschen (d.h. dem Nutzsignal überlagerte Störungen, die z.B. durch das Messgerät entstanden sind) können mithilfe von Wavelet-Analysen sehr gut korrigiert werden. Dies trifft vor allem dann zu, wenn das ursprüngliche Signal hohe lokale Änderungsraten besitzt. Auf Bildern eingesetzt, lässt sich somit ein hochwertiges Entrauschen (*denoising*) durchführen, das steile, lokale Gradienten (Kanten) sehr gut rekonstruiert.

Bis heute werden Digitalbilder überwiegend im verlustbehafteten JPEG-Format abgespeichert. Das Format beruht auf der Diskreten Sinus-Transformation, die blockweise im Eingangsbild durchgeführt wird. Eine Einführung in die Kompression von Rasterdaten gibt Abschnitt 3. Die in Abschnitt 2.3 eingeführten biorthogonalen Wavelet-Basen ermöglichen wahlweise eine verlustfreie oder -behaftete Kompression von Bildern bei gleichzeitig Reduktion der bpp-Rate (Bit pro Pixel). Große Teile der Wavelet-basierten Bild-Kompression lehnen sich an der Vorgehensweise der JPEG-Kodierung an. Das Verfahren ist als JPEG2000 bekannt. Je nach Wahl wird entweder eine CDF97- oder eine CDF53-Wavelet-Basis gewählt, um die Kompression verlustbehaftet zu halten, bzw. verlustfrei zu speichern [5].

3 Kompression von bathymetrischen Daten

An dieser Stelle soll die Transformation von regulären, diskretisierten Bathymetrie-Datensätzen in eine komprimierte Form beschrieben werden. Hierzu werden die Schritte der Transformation, der Quantisierung und der abschließenden Lauflängen-Kodierung erläutert, wie sie prinzipiell aus der Wavelet-basierten Bildkompression stammen (vgl. Abb. 3) [2].

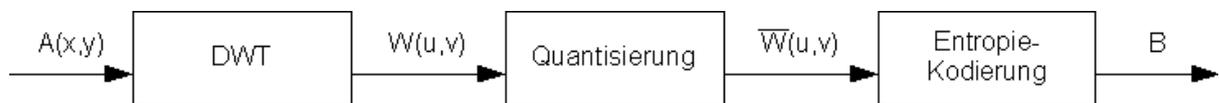


Abb. 3: Kompression einer Datenmatrix zu einem Bitvektor.

Das erste Teilziel ist die Kodierung der Daten in Form einer Koeffizienten-Matrix mithilfe der DWT. Aufgrund der Tensoreigenschaft der Transformation werden zweidimensionale Datenstrukturen, wie Matrizen oder Graustufenbilder, prinzipiell über eine Dekomposition ihrer Zeilen und Spalten behandelt. Dies reduziert die Komplexität der 2D-Transformation auf eine Schar eindimensionaler Transformationen und bietet Potential für eine hocheffiziente Parallelisierbarkeit.

Nach Wahl einer diskreten Wavelet-Filter-Basis wird die zweidimensionale Datenmatrix in ihre Koeffizientenmatrix überführt. Die hierfür notwendigen Matrixmultiplikationen beinhalten die simultane Anwendung der Hoch- und Tiefpass-Filter zunächst zeilen-, dann auch spaltenweise an jeder Position der Eingabematrix.

Als Folge ergeben sich vier anschauliche Sub-Matrizen halber Dimension für die Wavelet-Hochpass- und den drei richtungsabhängigen Skalierungs-Tiefpasskoeffizienten. Die Transformation wird nun rekursiv auf der Skalierungsmatrix wiederholt. Setzt man die Multiskalenanalyse nun fort, so entsteht eine Kette aus Koeffizientenmatrizen, die jeweils die geglättete Eingabematrix und die resultierenden Detail-Differenzen speichern (dargestellt in Abb. 4 und 5).

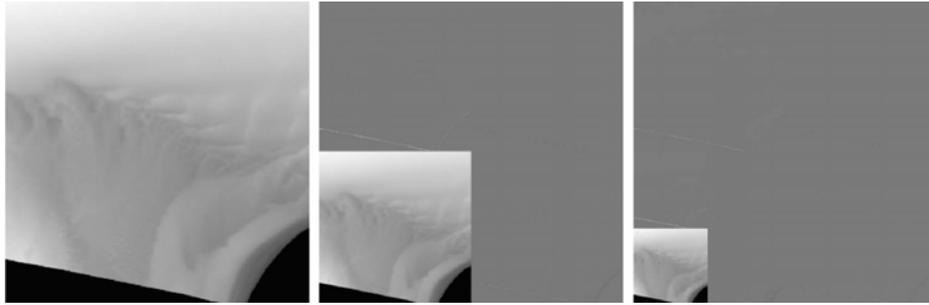


Abb. 4: Schema der Multiskalenanalyse bei der DWT. Die Tiefpass-Koeffizienten „verdichten“ sich, die weiteren Koeffizienten nehmen kaum unterscheidbare Werte nahe Null an.

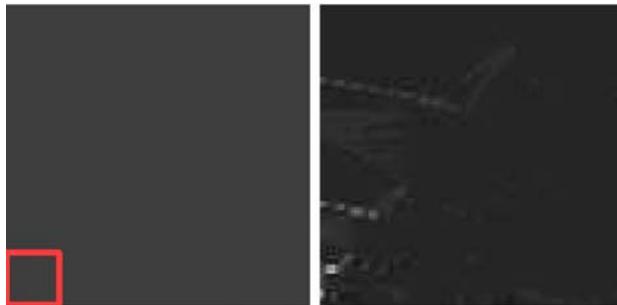


Abb. 5: Die Bündelung der Transformations-Koeffizienten ist nicht mehr erkennbar. Das rechte Bild gibt einen farbskalierten Ausschnitt wieder.

Der nächste Schritt besteht in der Quantisierung der reellen Koeffizienten auf endliche Zahlenbereiche. In der Praxis bedeutet dies ein Runden auf ganze Zahlen, bzw. einer Repräsentation in Binärdarstellung. Hier ist erwünscht, dass das Spektrum der Koeffizienten schmaler wird und nahe liegende Koeffizienten auf den gleichen Wert abgebildet werden. Die zuvor Fast-Null-Werte werden in diesem Schritt anhand der Quantisierungsschrittweite ggf. eliminiert. Nun liegt nahe, die Schrittweite unterhalb der Messgenauig-

keit der Aufnahme-Verfahren festzulegen. Einzelheiten hierzu finden sich in Abschnitt 4.2.

Zuletzt erfolgt die verlustfreie Lauflängen-Kodierung der Transformationskoeffizienten, d.h. die abwechselnde Darstellung von Häufigkeit und Größe eines Wertes. Eine darauf arbeitende Entropie-Kodierung schreibt die Matrix in Binärstrom-Darstellung aus (*Huffman-Kodierung*). In Abschnitt 4.1 wird die theoretische Güte der Kompression anhand der Entropie charakterisiert.

4 Resultate

Zunächst wird eine Einführung in zwei quantitative Maße für die Validierung der Kompression gegeben, und im Anschluss werden die Ergebnisse anhand der Gütekriterien verglichen [5].

4.1 Fehlermaße

Im Allgemeinen besitzt eine Bathymetrie reelle Tiefenwerte. Für die folgende Analyse ist vorab eine Einteilung der Messdaten in Tiefenklassen erforderlich, d.h. die Zahlenwerte werden auf eine reduzierte, rationale Skala transformiert. Hierfür wird eine entsprechende Maßzahl $\tilde{\epsilon}$ angegeben, so dass die resultierenden Werte auf Vielfache des Maßes gerundet werden. Diese Zahl hat lediglich nominellen Einfluss auf die Skala der Analyse; auf die Kompressionsrate hat sie keinen Effekt, da diese durch die Quantisierung gesteuert wird. In den vorliegenden Beispielen ist $\tilde{\epsilon} = 10^{-3}m = 1mm$. Somit liegen die Größen der Tiefenklassen deutlich unterhalb der üblichen Tiefen-Messgenauigkeit.

Die Entropie $E(\mathbf{v})$ gibt ein theoretisches Maß für die „Unordnung“ der Tiefenklassen-Verteilung $\mathbf{v} = (a_1 \dots a_k)^T$ an. Hierbei sind die a_i die einzelnen Tiefenklassen, und $p(a_i)$ beschreibt die relative Häufigkeit (d.h. Wahrscheinlichkeit) der Tiefenklasse in der Datenmatrix. Es ist

$$E(\mathbf{v}) = - \sum_{i=1}^k p(a_i) \log_2(p(a_i)) \quad [2]$$

Ein gebräuchliches Maß für die Fehlerberechnung ist der Mittlere Quadratische Fehler (*mean squared error* — *MSE*). In der vorliegenden Anwendung dient er der Bestimmung des Rekonstruktionsfehlers zwischen zwei Matrizen A und \hat{A} .

$$MSE(A, \hat{A}) := \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (a_{i,j} - \hat{a}_{i,j})^2 \quad [2]$$

4.2 Analyse und Vergleich

Insgesamt wurden fünf Wavelet-Filter implementiert und auf Datensätzen aus dem Testgebiet angewendet. Es zeigt sich eine klare Tendenz dahingehend, dass die verwendeten Testdatensätze im betrachteten Maßstab eine sehr geringe geologische Variation aufweisen. Dies führt letztlich zu einer hohen Kompressionsfähigkeit, die sich an der Entropie-Reduktion festmachen lässt (siehe Abb. 6).

Darüber hinaus wurde mit dem Kriterium des MSE gezeigt, dass eine hohe Komprimierung auch zu einer bemerkbar höheren Fehlerrate führt. Die hierbei auftretenden maximalen Differenzen liegen im Bereich von Millimetern (und somit weit unter der Messqualität) bis hin zu einigen Metern (dargestellt in Abb. 7).

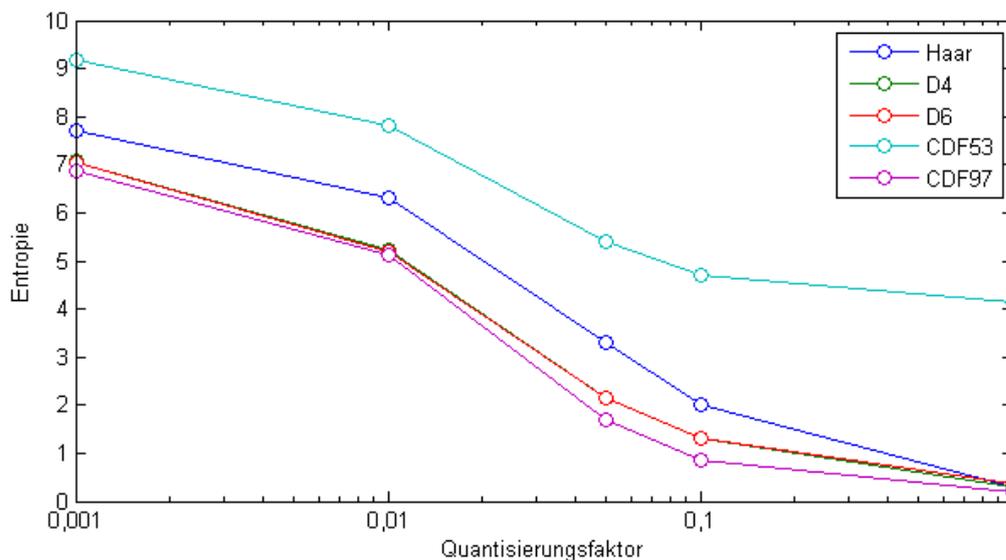


Abb. 6: Vergleich der Entropie-Werte bei logarithmischen Quantisierungsfaktoren. Die D4- und D6-Resultate sind kaum unterscheidbar.

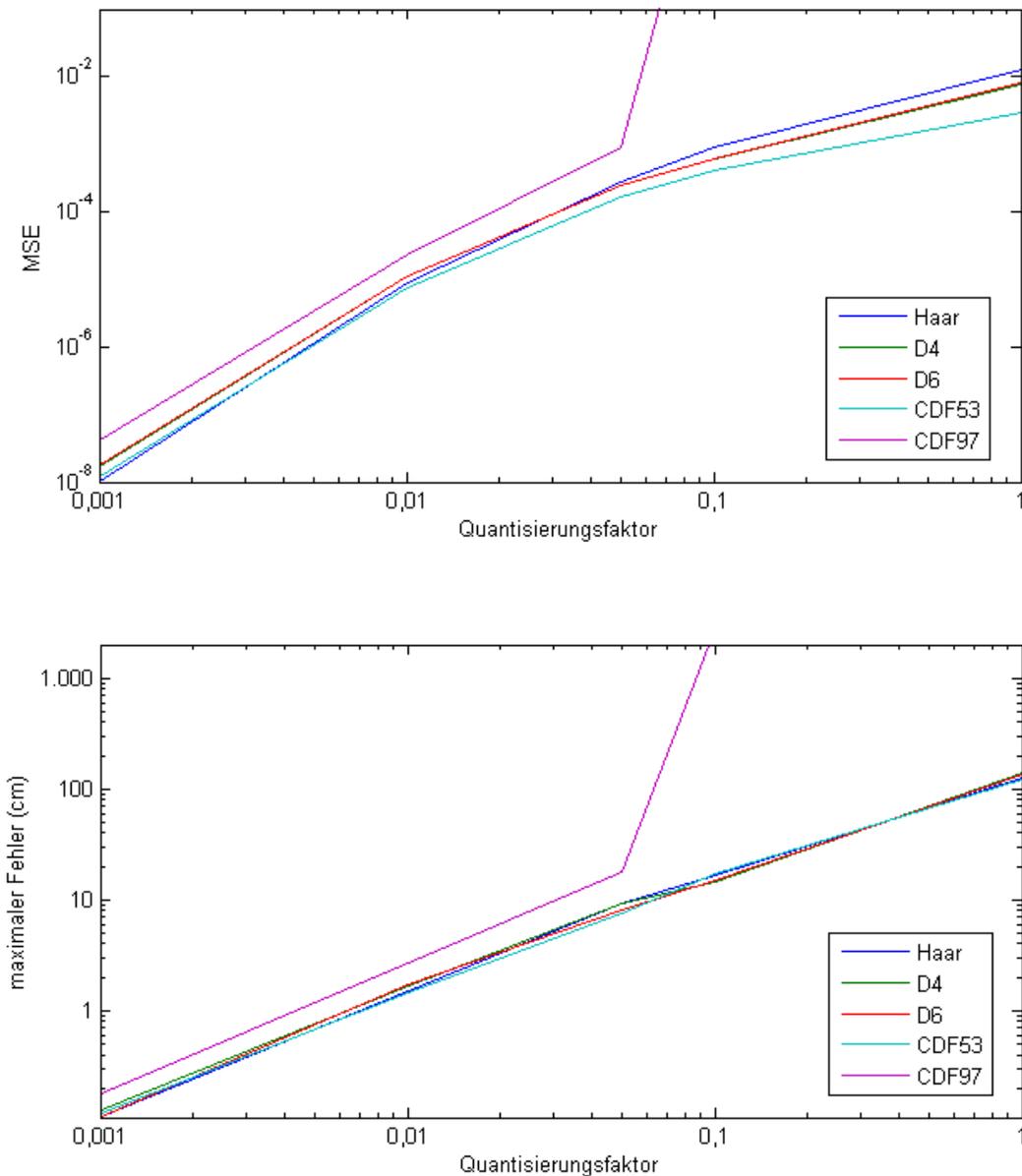


Abb. 7: Darstellung des MSE (oben) und des maximalen Differenz-Fehlers (unten). Die Skalierung ist über beide Achsen logarithmisch.

5 Erkenntnisse und Perspektiven

Die Entropie-Analyse zeigt auf den ausgewählten Datensätzen im Untersuchungsgebiet der Ostfriesischen Inseln eine sehr geringe geologische Variation auf. Berücksichtigt man die Verteilungsdichte der Messpunkte (Abstand ca. 5 m) und die fein aufgelösten Tiefenklassen (ca. 1 mm), so ergeben sich sehr kleine Analysekoeffizienten. Diese eignen sich hervorragend für eine optimale Kompression. Die Ergebnisse weisen zunächst darauf hin, dass hochgradige Scans, bzw. die Archivierung der Bathymetriedaten in hoher Auflösung, keinen informationellen Vorteil bringt. Sofern jedoch Messgeräte mit feinerer Ab-

tast-Genauigkeit zum Einsatz kommen, wären detaillierte Oberflächengeometrien erkennbar, die die Ergebnisse prägnant verändern könnten.

Weiterführende Untersuchungen können ggf. zeigen, ob Wavelet-Analysen morphologische Gegebenheiten betonen oder identifizierbar machen. Hierbei werden örtliche Variabilität und zeitliche Veränderung des Seebodens in Hinblick auf die Klassifikation von richtungsabhängigen Bodenstrukturen untersucht. Die Analyse der *Morphodynamik* orientiert sich hierbei an den Algorithmen der Video-Komprimierung, in denen identische Blöcke in Einzelbildern erkannt und über die Zeit verfolgt werden. Darüber hinaus lassen sich möglicherweise fehlerhafte Messungen identifizieren und mittels Wavelet-Denoising korrigieren (vgl. Abschnitt 2.4).

Ferner ist geplant, die Multiskalen-Eigenschaft der DWT für eine hierarchische Untersuchung von Bathymetrien einzusetzen. So ist es denkbar, anstelle atomarer Aggregation von Tiefenwerten auch flächenhafte Aussagen treffen zu können. Hierfür werden anstelle einzelner Rasterpunkte lediglich Koeffizienten auf höheren Skalierungsebenen betrachtet. In Verbindung mit geeigneten Datenstrukturen (z.B. *Quadrees*) sind somit fortgeschrittene Analysen denkbar.

6 Literaturverzeichnis

- [1] G. Beyer. *Wavelettransformation hybrider Geländemodelle. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Abteilung der Wissenschaften. 2007.*
- [2] W. Bäni. *Wavelets. Eine Einführung für Ingenieure. 2005.*
- [3] W. Keller. *Wavelets in Geodesy and Geodynamics. 2004.*
- [4] P. Milbradt, C. Dorow, und C. Asche. *Abschlussbericht. Identifikation morphologischer Tendenzen und Geschwindigkeiten im Küstennahbereich. 2009.*
- [5] P. J. van Fleet. *Discrete Wavelet Transformations. 2009.*
- [6] F. Wilson, J. Margaret, B. O'Connell, C. Brown, C. Guinan, J. Grehan, and J. Anthony. *Multi-Scale Terrain Analysis of Multibeam Bathymetry Data for Habitat Mapping on the Continental Slope. In: Marine Geodesy, 30 (1-2). 2007. pp. 3–35.*

Hybride Prozessoptimierung unter Berücksichtigung geometrischer Nebenbedingungen am Beispiel der geodätischen Messung

Nils Rinke, Felix Hofmann

Leibniz Universität Hannover, Institut für Bauinformatik, 30167 Hannover, Deutschland, E-mail: rinke@bauinf.uni-hannover.de, Telefon: +49(0)511/7625756

Kurzfassung

Dieser Beitrag befasst sich mit der Beschreibung und Optimierung von Prozessen, welche maßgeblich durch die Geometrie bestimmt werden. Die Kopplung von Methoden zur Bestimmung der kürzesten Wege in Graphen und Prozessmodellen in Form von farbigen Petri-Netzen ermöglicht eine Simulation des Arbeitsablaufes. Dieser wird dann mit Hilfe evolutionärer Algorithmen optimiert.

Zunächst wird ein Modell zur Kopplung von Geometrie und Prozessmodell anhand der Messung eines geodätischen Grundlagentetzes erarbeitet. Anschließend wird ein Optimierungsansatz mittels genetischer Algorithmen für den Prozessablauf aufgezeigt. Dabei soll der Arbeitsablauf bei gegebener Anzahl an Messapparaten hinsichtlich der Bearbeitungszeit optimiert werden. Durch intelligente Initialisierung des genetischen Algorithmus werden schließlich Methoden zur Verbesserung der Konvergenz des Verfahrens erarbeitet.

Stichworte

Prozessoptimierung, genetische Algorithmen, geodätische Messung

1 Einleitung

Die Optimierung von Prozessabläufen im Bauwesen hat seit der Einführung leistungsstarker Computer stark an Bedeutung gewonnen. Selbst sehr große Bauprojekte lassen sich mittlerweile in ihrer Ausführung soweit optimieren, dass die häufig voneinander abhängigen Teilprozesse ideal aufeinander abgestimmt werden können.

1.1 Motivation

Neben Prozessen, die direkt von anderen Prozessen abhängig sind, existieren auch solche, die nur durch die Geometrie bestimmt werden. Logistik-Unternehmen zum Beispiel benötigen zur Einsparung von Zeit und Kapazitäten eine genaue Routenplanung, so dass eine ideale Route zu allen Kunden und wieder zurück zum Fuhrpark gewährleistet ist. Die Optimierung solcher Problematik ist in der Literatur unter dem Begriff *Traveling Salesman-Problem (TSP)* beschrieben und wurde durch verschiedene Ansätze gelöst. Befinden sich aber mehrere Transporter für ein zu optimierendes Gebiet im Fuhrpark, so ist eine Lösung der Routenplanung mit den bekannten Ansätzen nicht möglich. Bei einer *geodätischen Messung* beispielsweise sind die einzelnen Messungen von dem Standort der Messstation und dem zugehörigen Reflektor abhängig. Dabei wird bei der Ablaufplanung versucht, die Geräte so durch das Gebiet zu bewegen, dass alle Messpunkte so oft eingemessen werden, dass eine Genauigkeit im Millimeterbereich garantiert werden kann. Bewegen sich in dem Gebiet mehrere Messstationen und/oder Reflektoren, so ist es wesentlich komplizierter, eine optimale Messabfolge zu bestimmen.

1.2 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist der Entwurf und die Implementierung eines Modells zur Optimierung von geometrisch abhängigen Prozessabläufen am Beispiel einer geodätischen Vermessung. Dabei soll über die Kopplung von genetischen Algorithmen mit Methoden zur Berechnung der kürzesten Wege der Prozessablauf optimiert werden.

2 Geodätische Messung

„Terristische geodätische Messungen legen Punkte an der Erdoberfläche durch direkte Bestimmung geometrischer Größen in ihrer gegenseitigen räumlichen Lage fest. Die Beobachtungen orientieren sich dabei fast ausschließlich an der örtlichen Lotrichtung, finden also in lokalen (. . .) Systemen statt. Durch die Messung von Horizontal- und Zenitwinkeln sowie Strecke wird eine relative Positionsbestimmung möglich, wobei meist Kombinationsgeräte (Totalstationen) eingesetzt werden“ (aus Torge [2]).

Für die Bearbeitung einer solchen Messung werden im Vorhinein eine Menge sinnvoller Messpunkte festgelegt, welche die Charakteristik des einzumessenden Gebiets sinnvoll beschreiben. Sind diese Messpunkte eingemessen, bilden sie ein Netz in einem lokalen Koordinatensystem. Bei einer geodätischen Messung werden so viele Messungen

durchgeführt, bis die Genauigkeit über die Lage aller Messpunkte den Anforderungen (meist $< 1\text{mm}$) entspricht. Für die Optimierung einer Vermessung müssen zwei Elemente betrachtet werden:

- Beschreibung der Geometrie und die Berechnung der Wege von einem geodätischen Messpunkt zu einem anderen
- Beschreibung der Prozesse, um den idealen Ablauf bestimmen zu können

2.1 Beschreibung der Geometrie

Die Geometrie eines Gebietes wird mit Hilfe eines schlichten Graphen beschrieben. Schlichte Graphen sind Tupel bestehend aus einer Menge von Knoten (V) und einer Menge von Relationen ($R \subset V \times V$, auch als Kanten bezeichnet).

Grundsätzlich existiert eine Kante von einem Knoten zu allen anderen, wenn entweder eine Messung zwischen den Punkten möglich ist oder ein Weg zwischen diesen Knoten besteht. Diese Kanten werden mit zwei Werten gewichtet. Ist ein Weg zwischen beiden Knoten vorhanden, so beträgt ein Gewicht die fußläufige Entfernung dieser beiden Punkte. Wenn dies nicht der Fall ist, so wird das Gewicht auf einen ungültigen Wert gesetzt. Das zweite Gewicht beschreibt die mögliche Genauigkeit einer Messung dieser beiden Punkte. Sind zwei Knoten dicht beieinander, so ist der Messfehler bei einer Messung wahrscheinlich geringer als bei Messungen von Knoten größerer Distanz. Abb. 1 zeigt beispielhaft ein kleines Netz aus Messpunkten und ihre zugehörigen Verbindungen. Wie zu erkennen ist, sind die Kanten ungerichtet. Die gestrichelten Kanten zeigen an, dass diese Kante zwar vermessen werden kann, aber kein direkter Weg zwischen beiden Knoten besteht. Weiterhin ist festzustellen, dass zwischen den Knoten 2 und 6, bzw. 3 und 5 keine Kante existiert. Dies bedeutet, dass sowohl eine Messung als auch ein direkter Weg zwischen den Knoten nicht möglich ist. Generell kann es auch vorkommen, dass eine Messung zwischen zwei Knoten nicht möglich ist, aber ein Weg zwischen diesen Knoten besteht (Kuppe zwischen zwei Messpunkten).

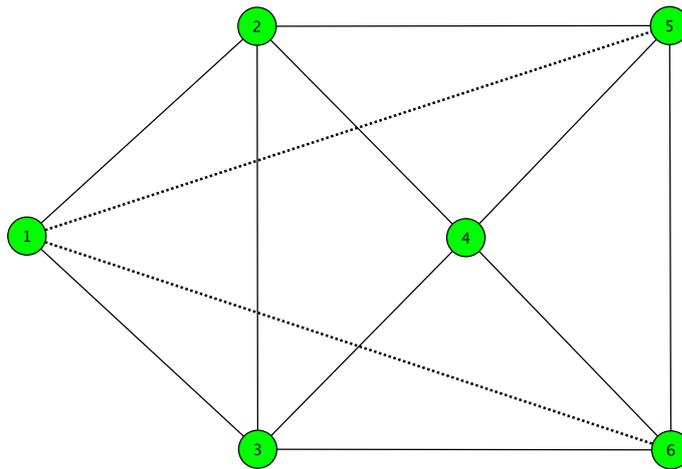


Abb. 1: Beispielnetz

2.1.1 Messabweichungen

Die Genauigkeit einer Messung hängt im Allgemeinen von drei Faktoren ab:

1. Messabweichungen aufgrund der Messstation (Herstellungsfehler),
2. Messabweichungen aufgrund von Messfehlern des Bedieners
3. und Messabweichungen aufgrund der Distanz zwischen den Messpunkten.

Da die beiden ersten Messabweichungen im Vergleich zur dritten einen sehr geringen Einfluß für die Optimierung besitzen, werden sie im weiteren Verlauf vernachlässigt. Es sind mehrere Messungen pro Punkt erforderlich, weil eine einzelne Messung in der Regel keine Sicherheit über die genaue Position des Messpunktes gewährleistet. Wenn ein Punkt durch mehrere Messungen erhoben wurde, so spielt auch der Winkel zwischen den einzelnen Messungen eine Rolle. Wurde ein Punkt bei einem Messablauf zweimal eingemessen und die einzelnen Vektoren besitzen einen Winkel von etwa 180° zueinander, so kann, aufgrund der Beschaffenheit eines Reflektorprismas (sog. *Tripel-Prismen* oder *Tripel-Spiegel*), keine Verbesserung der Messabweichung garantiert werden. Durch die Messabweichung kann die Position eines Messpunktes nicht exakt ermittelt werden, so dass die Position in Form einer (*Fehler-*) Ellipse beschrieben wird.

2.1.2 Wegwahl

Für die Berechnung der Zeit, die das Messpersonal für den Weg von einem Messpunkt zum anderen benötigt, kann vereinfacht ein „kürzester Pfad“-Algorithmus benutzt werden.

Ein bekannter Algorithmus zur Bestimmung des kürzesten Pfades in Graphen ist der A*-Algorithmus. Dabei werden durch Heuristiken (Schätzungen) zielgerichtet Knoten gewählt, welche wahrscheinlich die bessere Verbindung zum Zielknoten darstellen.

2.2 Beschreibung der Prozesse

Prozesse im Bauwesen sind -abstrakt beschrieben- steuerbare Systeme. Alle Prozesse in einem Bauablauf stellen Elemente dar, welche nacheinander oder auch parallel ausgeführt werden können. Die Abhängigkeiten dieser Prozesse untereinander erfordern die Steuerung der Prozesse. Für das Abbilden von Arbeitsabläufen existieren viele Modelle, welche sich hinsichtlich der Anforderungen und der Genauigkeit unterscheiden. Ein weit verbreitetes Modell zur Beschreibung von mehrläufigen Systemen ist das Petri-Netz. Ein Petri-Netz ist ein 4-Tupel $N = (S, T, F, M_0)$ mit:

1. einer Stellenmenge $S = \{s_1, s_2, \dots, s_s\}$
2. einer Transitionsmenge $T = \{t_1, t_2, \dots, t_t\}$
3. einer Kantenmenge (Flussrelation) $F \subseteq S \times T \cup T \times S$
4. einer Anfangsmarkierung $M_0 : S \rightarrow N$.

Stellen beschreiben Zustände, in welchen sich ein im System vorhandenes Objekt befindet, weshalb sie auch häufig als Objektbehälter bezeichnet werden (s. [1]). Diese Objekte und ihre Attribute werden durch Marken beschrieben. Wenn ein Objekt während eines Prozessablaufes seinen Zustand verändert (z. B. von „in Bereitschaft“ zu „in Bearbeitung“) wird die zugehörige Marke auf die entsprechende Stelle gesetzt. *Farbige* Marken erlauben zu dem die Beschreibung verschiedener Objekte mit unterschiedlichen Eigenschaften. Der Übergang von einem Zustand zu einem anderen wird über Transitionen (Aktivitäten) beschrieben. Wenn die Vorraussetzungen für eine Aktivität gegeben sind, d. h. alle benötigten Objekte vorhanden sind, verändern die an der Aktivität beteiligten Objekte ihren Zustand. Durch die Einführung zeitbehafteter Transitionen kann die

Dauer der Aktivität eingespeichert werden, so dass die globale Bestimmung der Bearbeitungszeit eines Arbeitsablaufs möglich ist. Abb. 2 zeigt das Modell eines einfachen Prozessablaufes als zeitbehaftetes und farbiges Petri-Netz.

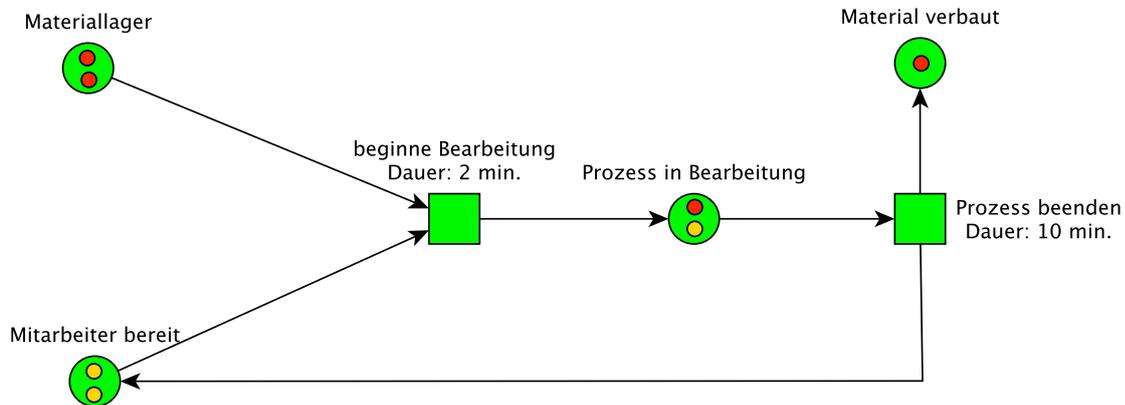


Abb. 2: Petri-Netz eines simplen Prozesses

Um den Arbeitsablauf einer geodätischen Messung sinnvoll abzubilden, wird zusätzlich zu den beschriebenen Objekten auch eine Marke *Messung* definiert. Dies hat den Vorteil, dass ein Petri-Netz gebildet werden kann, welches den Messablauf einer Messung stellvertretend für alle Messungen beschreibt. Somit wird das Petri-Netz übersichtlicher und die Optimierung kann durch Variation der Messabfolge vereinfacht werden.

In Abb. 3 ist der Prozessablauf einer geodätischen Messung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Petri-Netz einen sich wiederholenden Ablauf beinhaltet. Sobald ein Messapparat bereit ist und keinen Auftrag erhalten hat, wird ihm die nächste Messung zugewiesen und er kann die Arbeitsschritte bis zur Stelle („... messbereit“) bearbeiten. Wenn der zweite Messapparat „messbereit“ ist, wird die Transition „Messen“ aktiviert. Somit kann das Petri-Netz einen Messablauf mit beliebig vielen Messapparaten durchführen, solange die Voraussetzungen zum Durchführen einer Messung gegeben sind. Stehen beispielsweise 2 Reflektoren und eine Totalstation zur Verfügung, so bekommen die Reflektoren auch ihre Aufträge zugewiesen, obwohl die Totalstation noch eine andere Messung vornimmt. Der Reflektor kann sich währenddessen aufbauen und auf die Bereitschaft der Totalstation warten.

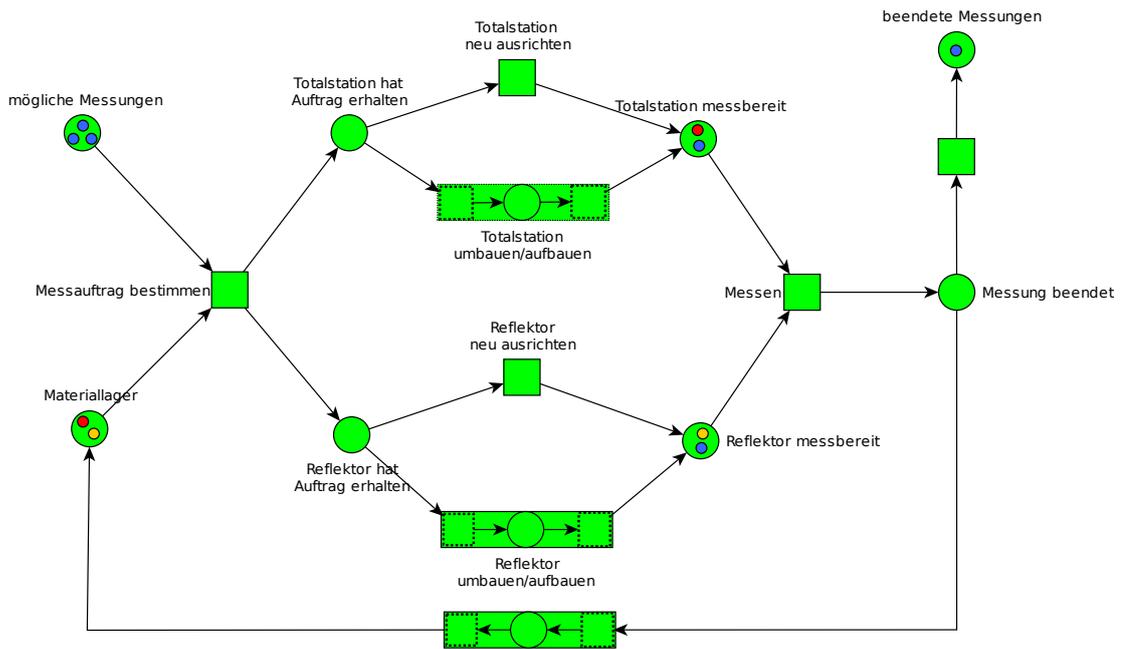


Abb. 3: Petri-Netz einer geodätischen Messung

2.3 Kopplung

Die Beschreibung der Prozesse einer geodätischen Messung erfordert eine Schnittstelle zwischen der Geometrie- und der Prozessbeschreibung. Dadurch, dass, wie in Abb. 3 zu erkennen ist, ein genereller Ablauf stellvertretend für alle Messungen definiert wurde, kann keine statische Schaltdauer für die Transitionen, in welchen geometrisch abhängige Prozesse stattfinden, zugewiesen werden. Durch das Einführen von dynamischen Transitionen können unterschiedliche Prozessdauern realisiert werden. Beim Übergang von einer Messung zu einer weiteren muss ein Reflektor oder eine Messstation häufig zu einem anderen Messpunkt gebracht werden. Um die dafür benötigte Zeit zu bestimmen, kann eine Transition über eine Schnittstelle den zurückzulegenden Weg aus der Wegesuche des schlichten Graphen berechnen.

3 Optimierung

Kapitel 2.2 hat gezeigt, wie der Arbeitsablauf einer geodätischen Messung modelliert und simuliert werden kann. Die Optimierung der geodätischen Messung wird durch die Anwendung genetischer Algorithmen realisiert.

3.1 Genetischer Algorithmus

Ein genetischer Algorithmus ist eine spezielle Form der evolutionären Optimierung. Angelehnt an die biologische, individuelle Anordnung von DNA-Strängen bei Lebewesen ist die Grundidee, die Kandidatenmenge (*Individuen*) mittels Genen zu kodieren und durch Rekombination und Mutation dieser Individuen eine optimale Lösung zu erhalten.

Grundlage der Bewertung einer Lösung ist das von Darwin in seiner Evolutionstheorie eingeführte Prinzip von *Survival of the Fittest*, welches das Überleben der bestangepassten Individuen beschreibt. Für die Selektion der Individuen aus einer Population werden daher nur die Individuen, welche am besten der Umgebung angepasst sind („die beste *Fitness* besitzen“), kombiniert (*natürliche Selektion*).

3.1.1 Kodierung

Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, kann theoretisch eine Messung zwischen zwei beliebigen Knotenpunkten des Graphen bestehen. Da vorher nicht sichergestellt werden kann, wie viele Messungen getätigt werden müssen, um die in Abschnitt 2.1.1 beschriebene Genauigkeit zu erreichen, beinhaltet ein Kandidat des genetischen Algorithmus alle möglichen Messungen, die ihrer Abfolge entsprechend abgespeichert werden. Bei der Simulation eines Kandidaten im Petri-Netz wird dann der Messvorgang so lange wiederholt, bis die geforderte Genauigkeit in allen Punkten erreicht ist.

3.1.2 Mutation und Rekombination

Bei der Rekombination werden zwei Individuen aus einer Generation ausgewählt und ihre Eigenschaften kombiniert, so dass ein neues Individuum entsteht. Die Rekombination von Permutationen kann durch ein Tauschen von Chromosomen umgesetzt werden. Dabei ist zu beachten, dass doppelt vorkommende Gene auftreten können, so dass eine Reparatur des Chromosoms notwendig ist.

Die Mutation von Individuen, welche als Permutation kodiert sind, kann auf viele Arten erfolgen. Die bekanntesten sind die vertauschende und die verschiebende Mutation (siehe Weicker [3]). Durch eine Mutation können Lösungen entstehen, die durch Rekombination nicht möglich sind.

3.1.3 Fitnessfunktion

Die Bewertung der Qualität eines Individuums wird, wie oben beschrieben, durch einen Fitnesswert ausgedrückt. Bei der geodätischen Messung gilt als Qualitätsmerkmal eines Individuums die Bearbeitungszeit. Das Individuum, welches die kürzeste Bearbeitungszeit besitzt, erhält auch den besten Fitnesswert.

Benefit

Weiterhin ist es möglich, Aktivitäten in der Simulation des Petri-Netzes positiv oder negativ zu bewerten. Dies wird durch die Bewertung von Transitionen realisiert. Wenn ein Individuum während der Simulation eine Transition ausführt, die eine positive oder negative Bewertung besitzt, wird die Bewertung der Fitness des Individuums hinzuaddiert. Messabfolgen, in welchen sich die Messapparate häufig nur neu ausrichten müssen anstatt sich komplett abzubauen und an einem neuen Punkt wieder aufzubauen, erreichen in der Regel bessere Ergebnisse. Durch die zusätzlichen Boni können die Transitionen zum Ausrichten und Abbau der Messapparate *belohnt* bzw. *bestraft* werden.

3.2 Initialisierung

Um das Konvergieren der Lösung zum globalen Optimum zu verbessern, kann bei der Wahl der Messabfolge eine intelligente Vorauswahl getroffen werden. Da der Auf- und Abbau einer Totalstation im Vergleich zum Reflektor zeitaufwändiger ist, kann durch eine geeignete Wahl der Messabfolge eine Verbesserung der Fitness eines Individuums erreicht werden. Durch eine (*Delaunay*-)Triangulation kann festgestellt werden, wie viele direkte Nachbarn ein Messpunkt besitzt, so dass die Initialisierung der Messabfolge gezielt optimiert werden kann. Wenn eine Totalstation alle seine direkten Nachbarn nacheinander einmisst, so werden die möglichen Messabweichungen minimiert. Gleichzeitig wird das entsprechende Individuum eine bessere Fitness erhalten, da alle Messungen hintereinander ausgeführt werden können und dadurch kein zwischenzeitlicher Abbau der Totalstation nötig ist.

3.3 Schematischer Ablauf

Fasst man die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Elemente zusammen, ergibt sich folgendes Schema für die Bestimmung der optimalen Messabfolge:

1. Bestimme Populationsgröße I und maximale Generationsanzahl G .
2. Initialisiere Population $P_{l,g=0}$.
 - a) Bestimme Anzahl verfügbarer Totalstationen und Reflektoren.
 - b) Erzeuge I Individuen i mit Vorauswahl nach 3.2 und füge sie P hinzu.
3. Initialisiere Petri-Netz nach Abb. 3 mit Benefit nach 3.1.3.
4. Solange $g \leq G$
 - a) Bestimme Fitness F_{pop} der Population über Simulation nach 2.2.
 - b) Solange Anzahl der Individuen i aus der Nachfolgegeneration $g+1 < I$
 - i. Selektiere 2 Individuen aus der Population.
 - ii. Rekombiniere diese beiden Individuen.
 - iii. Mutiere zufällig das erzeugte Individuum.
 - iv. Füge das erzeugte Individuum der neuen Generation $g+1$ hinzu.

Abb. 4: Schematischer Ablauf des Optimierungsalgorithmus.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Kopplung der Modellierung von Prozessen mit geometrischen Informationen erarbeitet und die Umsetzung anhand der geodätischen Messung aufgezeigt. Mit Hilfe genetischer Algorithmen wurde anschließend der Prozessablauf hinsichtlich der Bearbeitungszeit optimiert. Weiterhin wurden Methoden aus der Geometrie (*Triangulierung*) und der Prozessebene (*Benefit*) zur besseren Konvergenz des Algorithmus erläutert.

Für die Zukunft ist geplant, den Prozess der geodätischen Messung in den gesamten Bauablauf einzugliedern. Da ein Grundlagennetz in der Regel während der Bauphase vermessen wird, kann es vorkommen, dass Messstrecken temporär nicht zur Verfügung stehen.

Wenn vorab bekannt ist, dass Messstrecken temporär nicht verfügbar sind, können die Vermesser den Messablauf dementsprechend planen. Dann wird schon während der Initialisierung der Messabfolge sichergestellt, dass Messungen dieser Strecken in dem Zeit-

raum der Verfügbarkeit getätigt werden. Ist vorher nicht bekannt, dass eine Messstrecke temporär nicht verfügbar ist, hat dies zur Folge, dass Messpunkte durch Hilfspunkte, welche kurzfristig hinzugefügt werden, eingemessen werden müssen. Um dies zu berücksichtigen, muss bei der Simulation des Messablaufs in Abb. 2 eine Erweiterung des Petri-Netzes vorgenommen werden. Durch Schalten von zusätzlichen Transitionen kann dann die Verfügbarkeit überprüft werden und ein weiterer Zweig erzeugt werden, der das Bestimmen und Setzen der Hilfspunkte modelliert.

Literaturverzeichnis

- [1] A. Oberweis. *Modellierung und Ausführung von Workflows mit Petri-Netzen*. 1996.
- [2] W. Torge. *Geodäsie*. 2002.
- [3] K. Weicker. *Evolutionäre Algorithmen*. 2007.

Grundwasserstandsprognosen mit Support Vector Regression

Ein Werkzeug zur Bewertbarkeit von Bewirtschaftungsstrategien

Peter Göbel

Technische Universität Darmstadt, Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, 64287 Darmstadt, Deutschland, E-mail: goebel@iib.tu-darmstadt.de, Telefon: +49(0)6151/166676

Kurzfassung

Grundwasser stellt in Deutschland die bedeutendste Quelle für die Trinkwasserversorgung dar. Die Trinkwasserversorgung aus Grundwasser findet aufgrund der intensiven Landnutzung auf engstem Raum und mit konkurrierenden Interessen in einem ausgeprägten Spannungsfeld statt. Nutzungskonflikte bestehen zwischen Trinkwasserversorgung, Naturschutz, Forst, Siedlungsschutz und Landwirtschaft. Um eine Übernutzung der Grundwasservorräte zu vermeiden, werden in gefährdeten Gebieten systematisch die maßgeblichen Grundwasserparameter erfasst und überwacht, um auf deren Basis in die anthropogenen Einflüsse steuernd einzugreifen mit dem Ziel, einen gewünschten Richtgrundwasserstand zu erreichen und zu halten. Damit die langfristigen Folgen verschiedener Bewirtschaftungsstrategien auf den Grundwasserspiegel bewertbar sind, müssen Grundwasserstandsprognosen für die möglichen Szenarien erstellt werden. Klassischerweise werden zu diesem Zweck numerische Grundwassermodelle eingesetzt. In einigen Fällen jedoch ist ihre praktische Umsetzung eingeschränkt oder nicht möglich. In dieser Arbeit wird der Ansatz verfolgt und beschrieben, Grundwasserprognosemodelle mit einem Satz von Methoden des *Maschinellen Lernens (ML)* den sogenannten *Support Vector Machines (SVM)* zu bilden.

Stichworte

Grundwasserstandsprognosen, Maschinelles Lernen, Support Vector Machines, Support Vector Regression, Kernel-Methoden

1 Einleitung

Schon seit frühester Zeit nutzen die Menschen das Grundwasser. So wurden bereits etwa 3000 v. Chr. Brunnen mit hölzernen Maschinen gebohrt [1]. Wenngleich die technische Nutzung schon sehr früh fortgeschritten war, wurde mit den Folgen der anthropogenen Eingriffe in den natürlichen Wasserhaushalt weit weniger sorgsam umgegangen: Ziele einer nachhaltigen Grundwasserbewirtschaftung wurden erst viel später verfolgt und sind auch heute noch in vielen Regionen der Erde Fremdwörter. Auch hielten sich die antiken Vorstellungen der alten Griechen über den Wasserkreislauf bis in die Renaissance, wonach das Grundwasser aus dem Meer durch unterirdische Kanäle unter Bergen hindurch in das Land strömt, so dass eine korrekte Einschätzung der Folgen der menschlichen Eingriffe schlicht aus mangelndem theoretischem Verständnis verhindert wurde. Das Grundwasser selbst fand auch lange nicht die Beachtung, die es seiner Stellung nach verdient hätte und das aus einfachem Grund: Wenngleich die Auswirkungen extremer Grundwasserspiegelhöhen in den komplexen Wechselbeziehungen zu Flora, Fauna und Habitat nicht zu übersehen sind, wie z. B. in Überschwemmungen, Erosion oder Austrocknung, so bleibt das Grundwasser doch stets unsichtbar in den Aquiferen verborgen.

Heute wird das Grundwasser als wichtiger Bestandteil des hydrosphärischen Kreislaufs (Wasserkreislauf) verstanden und ist eine wichtige Ressource für Industrie (u.a. Kühl- und Prozesswasser, Rohstoff für die Produktion) und Landwirtschaft (Bewässerung). Grundwasser ist der weltweit meistgenutzte Rohstoff und hat größte Bedeutung für die Trinkwasserversorgung¹. Grundwasserentnahmen bedeuten aber gleichwohl Veränderungen in dem natürlichen Wasserhaushalt und somit in Flora, Fauna und der generellen Nutzbarkeit der Flächen. Das mit den gegensätzlichen Funktionen des Grundwassers grundsätzlich verbundene Konfliktpotential zwischen Trinkwasserversorgung und sonstigen Ansprüchen soll möglichst gering gehalten oder – wenn möglich – vermieden werden. Eine Minimierung der Nutzungskonflikte in gefährdeten Gebieten wird erreicht, wenn bestimmte Grundwasserstände erlangt oder gehalten werden, die als Richtgrundwasserstände bezeichnet werden. In der praktischen Umsetzung werden dazu die maßgeblichen Grundwasserparameter erfasst und überwacht, um auf deren Basis steuernd in die anthropogenen Einflüsse einzugreifen. Anthropogene Einflüsse sind die Entnahme von Grundwasser (Rohwasser) zur Trinkwasserversorgung und die gezielte künstliche Grundwasseranreicherung durch Infiltration von gereinigtem

¹ Trinkwassergewinnung aus Grundwasser in Europa zu 65% [2], Deutschland zu mehr als 70% [3] und Hessen zu 95,2% [4].

Flusswasser. Eine Grundwassersteuerung, welche lediglich auf (maximal aktuelle) Messwerte reagiert, ist jedoch nicht effektiv, da sich die Einflüsse auf den Grundwasserstand sehr langsam auswirken. Das bedeutet beispielsweise, dass sich eine erhöhte Infiltrationsrate erst in einigen Monaten spürbar auf den Grundwasserhaushalt auswirkt. Daher sind Grundwasserstandsprognosen ein wichtiges Instrumentarium als Entscheidungsgrundlage für die Maßnahmenbestimmung zur aktiven Grundwassersteuerung.

2 Numerische Grundwassermodelle

Die klassische Herangehensweise an Grundwasserstandsprognosen ist die Erstellung eines physikalischen numerischen Modells, indem man den Grundwasserleiter schematisiert und diskretisiert. Für jede Diskretisierung werden Gleichungen aufgestellt, die im Wesentlichen auf den Massen- und Impulserhaltungssätzen beruhen. Diese Gleichungen werden schließlich zu einem linearen algebraischen Gleichungssystem zusammengeführt. Da diese Gleichungen die tatsächlichen physikalischen Zusammenhänge beinhalten, müssen die physikalischen Bodenkennwerte sowie die Anfangs- und Randbedingungen in die entsprechenden Parameter der Gleichung über Raum und Zeit an das Gebiet angepasst werden. Die Eigenschaften eines Aquifers sind typischerweise inhomogen und viele Bodenkennwerte, wie der Durchlässigkeitsbeiwert, ändern sich maßgeblich über den Raum verteilt. Andere Parameter, wie die Grundwassererneuerungsrate, variieren stark über Raum und Zeit verteilt. Um diese Parameter bestimmen zu können, werden in den Gebieten Probemessungen angestellt. Aufgrund des finanziellen und personellen Aufwandes ist die Anzahl dieser Messungen limitiert. Daher versucht man mit Interpolationstechniken die Aussagen der Einzelmessungen auf das gesamte Raum-Zeit-Modell anzupassen. Die Anpassung der Parameter des Modells basiert letztlich nur auf wenigen Proben. Zudem müssen mathematische und physikalische Vereinfachungen und Annahmen getroffen werden, um das hochkomplexe System berechenbar und bestimmbar zu machen. Der Fehler, der aufgrund dieser Vereinfachungen und Annahmen zwischen dem mit diesem Modell simulierten und realen Grundwasserstand entsteht, wird durch Kalibrierung des Modells, dem aufwendigen nachträglichen Justieren der Parameter entgegengewirkt. Letztlich repräsentiert das kalibrierte Modell mit seiner beschränkten Anzahl an Parametern eine unendliche Anzahl an Parametern der realen Welt und projiziert die Komplexität der realen Welt auf ein limitiertes, endlich-dimensionales, vereinfachtes System. Ein solches System bleibt eine hoch idealisierte Repräsentation des realen Systems, welche die

inhomogenen, instationären und nichtlinearen Zusammenhänge des tatsächlichen Grundwasserleiters nicht immer zufriedenstellend oder oft nur mit sehr großem Aufwand beschreiben kann. In dieser Arbeit soll eine alternative Herangehensweise an Grundwasserstandsprognosen mit einem Satz von Methoden des *Maschinellen Lernens* (ML), den sogenannten *Support Vector Machines*² (SVM) beschrieben werden.

3 Maschinelles Lernen und Support Vector Machines

Maschinelles Lernen (ML) bezeichnet eine Untergruppe der künstlichen Intelligenz, in der alle Methoden subsummiert werden, in denen Computer (Maschinen) aus Beispielen selbstständig Gesetzmäßigkeiten und Muster ableiten (*induktiv lernen*) (vgl. Abb. 1.) [5]. Bekannteste Vertreter des ML sind *Künstliche Neuronale Netze* (KNN). SVM sind nicht so alt und bekannt wie KNN und umfassen einen Satz von *Methoden des Maschinellen (überwachten) Lernens*, welche nichtlineare Funktionen in eine hochdimensionale Hyperebene abbilden (engl. „mappen“), in der sie dann als lineares Problem behandelt werden können (*Kernel-Trick*). Wenn SVM für Regressionsprobleme verwendet werden, so spricht man auch von *Support Vector Regression* (SVR).

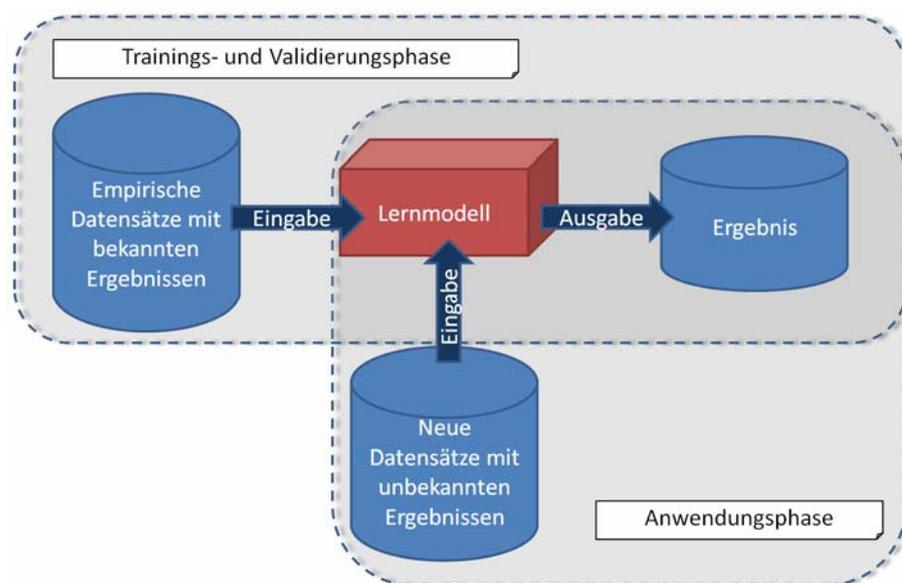


Abb. 1: Beispielhafte Darstellung eines Maschinellen Lernmodells (in Anlehnung an Kecman [6]).

² *Support Vector Machine* ist die englische Bezeichnung. Die deutsche Bezeichnung „Stützvektormaschine“ oder „Stützvektormethode“ ist nicht gebräuchlich.

Namensgeber der SVM sind die Stützvektoren (engl. *Support Vectors*). Die SVM sind Lernverfahren, die zumeist zur Klassifikation angewendet werden und sich an einem einfachen Klassifikationsbeispiel am besten veranschaulichen lassen. In Abb. 2 sind Beispiele zweier Klassen (Kreise und Quadrate) abgebildet, welche (linear) durch eine Hyperebene separiert werden können. Die SVM findet dabei nicht eine beliebige mögliche Hyperebene, sondern die „optimale Hyperebene“ [7]. Die optimale Hyperebene ist dadurch gekennzeichnet, dass sie die unterschiedlichen Klassen mit maximalem Abstand δ trennt. Die am nächsten an der trennenden Hyperebene liegenden Beispiele (mit genau dem Abstand δ) werden Support Vektoren genannt. Die vier *Support Vektoren* in Abb. 2 sind durch eine Umrahmung hervorgehoben.

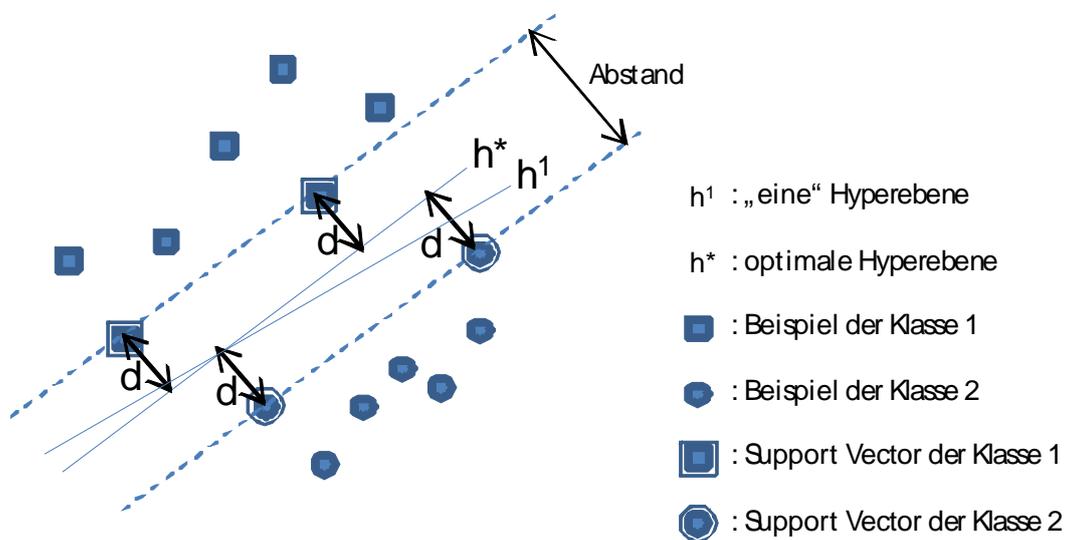


Abb. 2: Binäres Klassifikationsproblem mit zwei Merkmalen.

Werden SVM auf Regressionsprobleme angewendet, so hat die Hyperebene die Aufgabe, nicht wie im Klassifikationsproblem, die Beispiele zu trennen, sondern zu einer Röhre (engl. *tube*) mit möglichst geringem Abstand zu fassen. In realen Fällen sind derartige Klassifikations- wie auch Regressionsprobleme meist nicht linear lösbar. Um diese Fälle dennoch linear lösen zu können, verwenden die *Support Vector Machines* den so genannten *Kernel-Trick*. Die Idee hinter dem Kernel-Trick ist, den Vektorraum des Ursprungsproblems in einen höher dimensionalen Raum (sog. *feature space*) zu überführen, in der das Problem linear lösbar wird (siehe Abb. 3).

Durch die Verwendung von geeigneten Kernel-Funktionen lassen sich die Lösungen im hochdimensionalen Raum auf den ursprünglichen niedrig dimensionalen Raum anwenden [8].

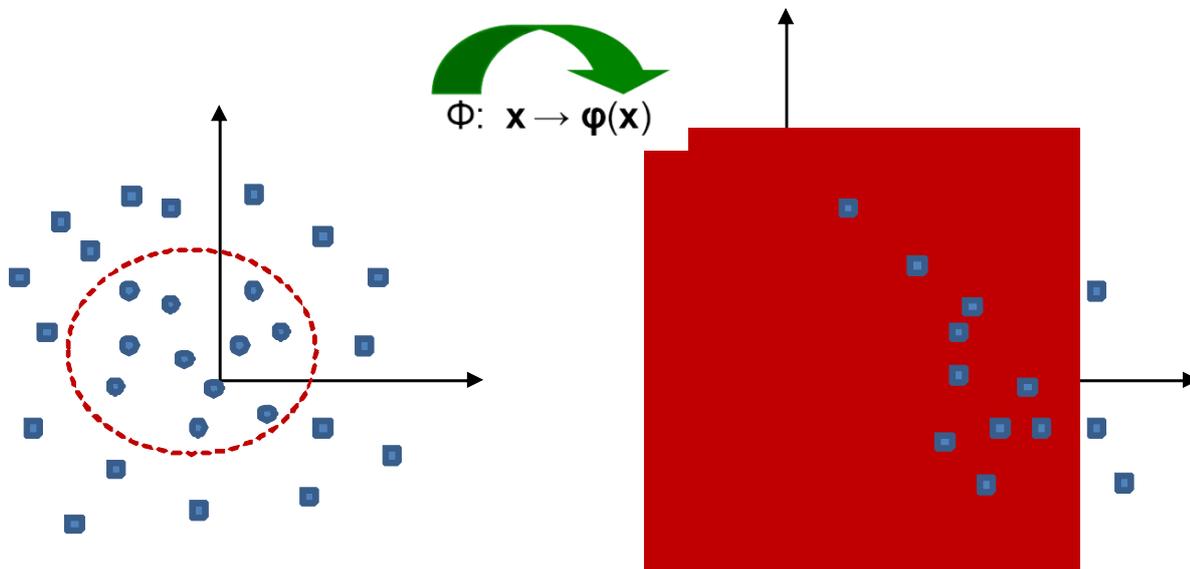


Abb. 3: Überführung (*Mapping*) eines Klassifikationsproblems in höher dimensionalen Raum (*Feature Space*) (in Anlehnung an Schölkopf und Smola [8]).

4 Modellierung eines SVR-Modells für Grundwasserstandsprognosen

Damit in dieser Arbeit die Anpassung von SVR-Modellen gezeigt und hinsichtlich ihrer generellen Eignung für Grundwasserstandsprognosen beurteilt werden kann, wurde zuerst ein Projektgebiet ausgewählt und alle relevanten Informationen innerhalb des Gebietes wurden zusammenzutragen. Das ausgewählte Projektgebiet erstreckt sich auf etwa 30 km² und liegt im Hessischen Ried. Aufgrund der langjährigen Bemühungen um die angespannte Grundwassersituation im Hessischen Ried [9], sind Informationen aus dem Grundwasser-Monitoring in großer Anzahl vorhanden [10], welche die relevanten Größen des Grundwasserhaushaltes des Projektgebietes in ausreichender räumlicher und zeitlicher Dichte seit etwa 1969 beschreiben. Anders als in der numerischen Modellierung sind für die Modellierung mit SVM lediglich solche Daten von Interesse, welche einen direkten Einfluss auf den Grundwasserstand ausüben und deren Wert sich über die Zeit signifikant ändert. Unveränderliche Eigenschaftswerte des Untergrunds, wie z.B. der kf-Wert, fließen nicht direkt in die Modellbildung ein, sondern sind implizit in den Trainingsdaten enthalten. Berücksichtigt wurden die Parameter *Grundwasserstand*, *Absickerung*, *Niederschlag*, *Temperatur*, *Fließgewässerpegel*, *Entnahme* und *Infiltration*.

Vor dem Einsatz in der Modellbildung wurden die Daten vorbehandelt, um die Qualität durch Verifizierung sicherzustellen und um Lücken zu schließen. Dies geschah zum Teil unter Zuhilfenahme anderer, beispielsweise korrelierender Datenquellen oder – falls nicht vorhanden – anhand verschiedener, zum Beispiel statistischer, Methoden [11]. Auf diese Weise entstand eine Datengrundlage in engmaschiger, korrekter und lückenloser Form in Monatswerten für den Zeitraum von 1969 bis 2006. In Abb. 4 ist zu erkennen, dass in dem Projektgebiet die Infiltrationsorgane erst zwischen 1996 und 1999 installiert und in Betrieb genommen wurden, wohingegen die meisten Brunnen bereits ab 1969 fördern.

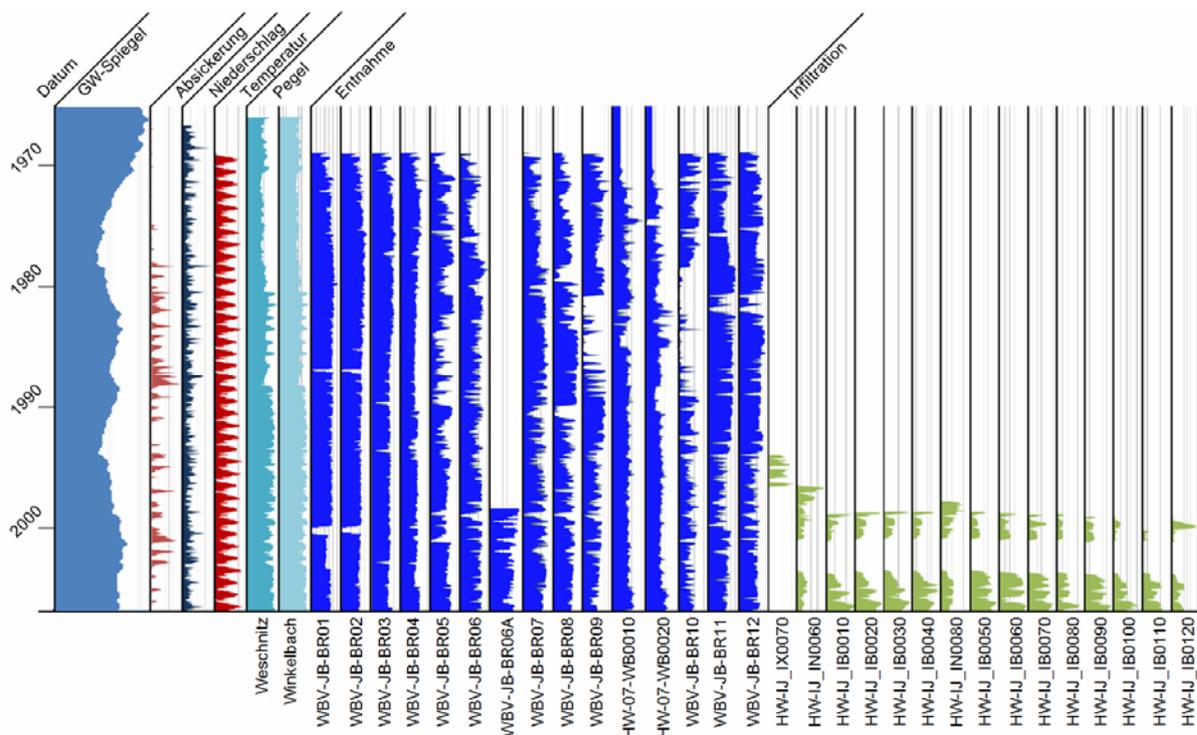


Abb. 4: verfügbare Datengrundlage Projektgebiet.

Um die Eignung der SVR für Grundwasserstandsprognosen zu testen, wurden zahlreiche SVR Modelle gebildet. Die Implementierung erfolgte mit der freien Programmiersprache und Statistik-Software des GNU Projekts „R“ und den *add on-Paketen* „kernlab“ und „e1071“ [12]. Während der Experimente zeigte der Gauss-Kernel *rbfdot* des Pakets „kernlab“ die besten Ergebnisse. Die zugehörigen Kernelparameter bestimmen grundsätzliche Verhaltensweisen während des Trainings und der Prognose:

Der Parameter C erlaubt Fehlentscheidungen, bestraft diese aber gleichzeitig. C ist also ein Parameter, welcher eine weiche Trennung (engl. „soft margin“) der Separationsbereiche erlaubt und so ein Abwägen zwischen Separationsweite und Fehler ermöglicht. Der Parameter σ bestimmt ebenfalls die Separationsweite und die benötigte Anzahl an Stützvektoren über die Weite der *Gaußschen Glocken-Koeffizienten* im Polynom und damit, wie glatt die Hyperebene verlaufen soll. Mit dem Parameter $cross$ lässt sich bestimmen, ob Kreuzvalidierung (engl. „cross validation“) durchgeführt werden soll und wie viele Teilmengen (k -fache Kreuzvalidierung) benutzt werden sollen [13].

Die Werte dieser Parameter wurden jeweils mit Schleifen iterativ bestimmt, wobei die geringste Differenz zwischen prognostiziertem Wert und realem Grundwasserstand als Bewertungsmaßstab herangezogen wurde.

Bei der Ausführung der im folgenden vorgestellten Experimente wurden SVR-Modelle mit Daten ab dem Jahr 1999 trainiert, zur Validierung des trainierten Modells wurden anschließend Daten aus dem Jahr 2006 herangezogen. Aufgrund der Tatsache, dass SVR-Modelle auch mit relativ wenigen Datensätzen gut zu trainieren und alle Infiltrationsanlagen spätestens ab 1999 in Betrieb genommen wurden, wurden die besten Resultate erzielt mit Trainingsdatensätzen, die im Jahr 1999 beginnen.

Monat	Real	Test 1		Test 2		Test 3	
		Prognose	Diff.	Prognose	Diff.	Vorhersage	Diff.
1	86,66	86,6458	0,0142	86,66365	0,00365	86,68582	0,02582
2	86,64	86,59313	0,04687	86,56953	0,07047	86,57693	0,06307
3	86,63	86,63969	0,00969	86,67023	0,04023	86,66578	0,03578
4	86,74	86,73908	0,00092	86,73673	0,00327	86,6658	0,0742
5	86,81	86,78136	0,02864	86,77023	0,03977	86,80575	0,00425
6	86,83	86,82474	0,00526	86,83451	0,00451	86,85425	0,02425
7	86,83	86,82821	0,00179	86,79744	0,03256	86,83421	0,00421
8	86,78	86,73292	0,04708	86,74293	0,03707	86,83174	0,05174
9	86,77	86,78484	0,01484	86,77364	0,00364	86,8842	-0,1142
10	86,74	86,65526	0,08474	86,6508	0,0892	86,74429	0,00429
11	86,73	86,75437	0,02437	86,7401	-0,0101	86,86567	0,13567
12	86,78	NA	NA	NA	NA	86,75968	0,02032
mittl. Abw. [m]		0,025		0,03		0,029	

Tab. 1: Testergebnisse.

In einem ersten Testlauf (Test 1, Tab. 1) mit SVR wurde ein Modell mit allen 35 Attributen des Projektgebietes in Monatswerten des Zeitraums 1999-2006 trainiert. Anschließend wurde eine Prognose für das Jahr 2006 erzeugt. Als Eingangsparameter wurden die gemessenen Werte aus 2006 verwendet. Aufgrund der Tatsache, dass mit den Daten aus 2006 bereits trainiert wurde, ist die Prognose für das Jahr 2006 nicht als tatsächliche Vorhersage anzusehen, sondern kann nur einen ersten Aufschluss darüber geben, ob das SVR-Modell grundsätzlich in der Lage ist, die internen Interaktionen des realen Systems (auswendig) zu lernen. Der erste Test bestätigte dies mit einer mittleren Abweichung von 0,025 m.

In einem zweiten Testlauf (Test 2, Tab. 1) wurde ein SVR-Modell auf die gleiche Art wie im ersten Testlauf trainiert, lediglich die Werte der Eingangsdaten für die Prognose wurden geändert. Da in der realen Grundwasserbewirtschaftung die Werte der Grundwasserentnahme und der Infiltration unter Kontrolle der Grundwasser-Ingenieure der Wasserversorger stehen, können diese Werte für die Zukunft vorgeben werden. Die Grundwasserstandsprognosen lassen sich somit unter verschiedenen Management-

Szenarien durchführen. Werte, auf die der Grundwasser-Ingenieur nicht steuernd zugreifen kann und die ebenfalls in die Eingabedaten einfließen, müssen geschätzt werden. Daher werden für die Attribute Absickerung, Niederschlag, Temperatur und Pegel (im Weiteren als *Umweltdaten* bezeichnet) als erste einfache Schätzung die Werte des Vorjahres angenommen. Mit dieser Annahme wurde eine Prognose für den Grundwasserstand für 2006 erstellt mit den echten gemessenen Werten für Infiltration und Entnahme aus 2006, sowie den Umweltdaten der gemessenen Werte für 2005. Die mittlere Abweichung des zweiten Tests von 0,03 m deutet darauf hin, dass das SVR-Modell in der Lage ist zu generalisieren. Doch auch dieser Test kann nicht als tatsächliche Vorhersage angesehen werden, da mit Daten des Prognosehorizontes 2006 bereits trainiert wurde.

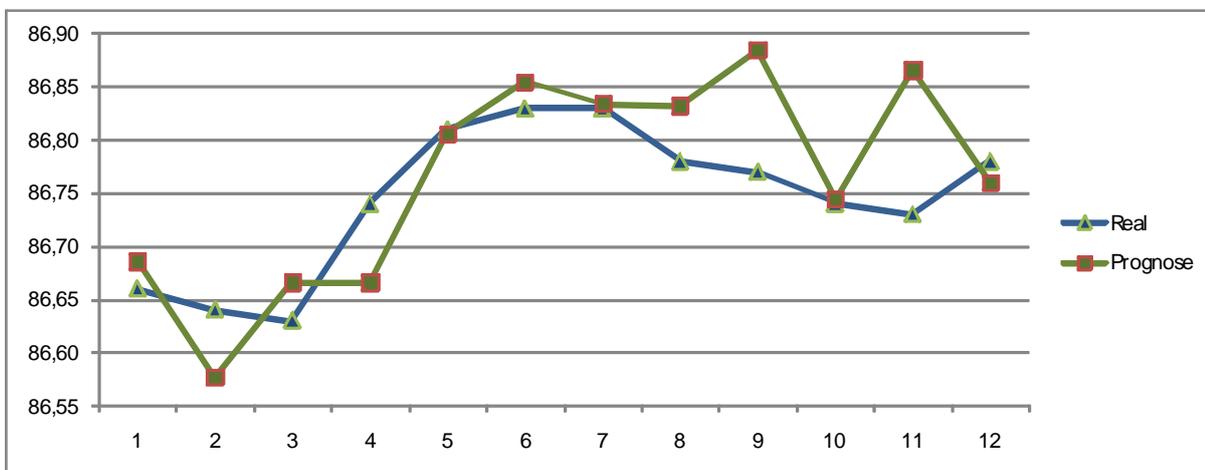


Abb. 5: Reale und prognostizierte Grundwasserganglinie für 2006.

In einem dritten Testlauf (Test 3) wurde ein SVR-Modell auf die gleiche Art trainiert wie in den ersten beiden Testläufen, mit der Ausnahme, den Zeitraum der Trainingsdaten auf 1999 bis 2005 zu begrenzen. Als Eingangsdatensatz für die Prognose kam anschließend der gleiche Datensatz wie für die Prognose im zweiten Testlauf zum Einsatz. Da sowohl für Training als auch Prognose keine Werte für 2006 verwendet wurden, die nicht bereits vor 2006 bekannt sein können, kann der dritte Testlauf als eine tatsächliche Vorhersage gewertet werden. Mit einer mittleren Abweichung von 0,29 m ist die Vorhersagequalität als gut einzustufen. In Abb. 5 wird das Ergebnis der Prognose des dritten Testlaufes der tatsächlichen Grundwasserganglinie des Jahres 2006 in einem Diagramm gegenübergestellt.

5 Ergebnis und Ausblick

Methoden des ML wie KNN und SVM sind in vielen Fällen eine Alternative zur traditionellen numerischen Modellierung. Für bestimmte Problemtypen können ML-Methoden den numerischen Ansätzen überlegen sein – insbesondere dann, wenn die physikalisch basierten Methoden Systemparameter aus der realen Welt verlangen, die schwer zu messen sind oder welche sich erheblich über Raum bzw. Raum und Zeit verändern. Diese Systemparameter sind für die Methoden der ML nicht erforderlich und werden implizit aus den Paaren der Eingangs- und Ausgangsdatensätze erlernt. Für Problemstellungen, für die beispielsweise durch ein Monitoring bereits über einen langen Zeitraum historische Datensätze in guter Qualität zur Verfügung stehen, ist ein Einsatz besonders interessant.

Die vorgestellten Versuche zeigen, dass SVR-Modelle grundsätzlich trainiert werden können, um akkurate Prognosen über Grundwasserentwicklungen in komplizierten Grundwassersystemen abzugeben. Verschiedene Bewirtschaftungs- und Klimaszenarien können mit ihrer Hilfe auf Auswirkungen auf den Grundwasserspiegel getestet und bewertet werden und letztlich zu einer effizienten Verwaltung der kostbaren Grundwasserressourcen beitragen. In künftigen Arbeiten soll die Einführung einer Ensemble-Technik getestet werden. Der Idee hinter der Ensemble-Technik besteht darin, dass eine Vielzahl von Vorhersagen gleichzeitig durchgeführt werden (z.B. mit verschiedenen Modellen oder Anfangsbedingungen, wie unterschiedlichen Annahmen zu Umweltdaten) und die Entwicklung des Ensembles als stellvertretend für die Wahrscheinlichkeitsdichte betrachtet werden kann. Über die Varianz des Ensembles lassen sich Aussagen über die Unsicherheit der Vorhersage bilden, über den Mittelwert kann die Genauigkeit und Zuverlässigkeit erhöht werden.

Literaturverzeichnis

- [1] B. Hölting. *Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie*. 1996.
- [2] Europäische Kommission. *Wasser ist Leben: Wasserrahmenrichtlinie*.
http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/pdf/waterislife_de.pdf
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hg.): *Grundwasser in Deutschland*. 2008.
- [4] Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. *Grundwasser*.
http://www.hlug.de/medien/wasser/grundwasser/gw_index.htm
- [5] G. Görz, C.-R. Rollinger, und J. Schneeberger (Hg.). *Handbuch der Künstlichen Intelligenz*. 2003.
- [6] V. Kecman. *Basics of Machine Learning by Support Vector Machines*. In: *Real World Applications of Computational Intelligence. Studies in Fuzziness and Soft Computing Vol. 179*. 2005.
- [7] V. Vapnik. *Statistical Learning Theory*. 1998.
- [8] B. Schölkopf, A. J. Smola. *Learning with Kernels: Support Vector Machines, Regularization, Optimization, and Beyond*. 2002.
- [9] Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz (Hg.): *Das Hessische Ried. Zwischen Vernässung und Trockenheit*. 2005.
- [10] Projekt Grundwasser-Online. <http://www.grundwasser-online.de>
- [11] U. Rüppel, P. Göbel. *Pretreatment of Environmental Data for Forecasting Purposes*. In: *EnviroInfo 2008: Environmental Informatics and Industrial Ecology*. 2008.
- [12] R Development Core Team. *The R Project for Statistical Computing*. <http://www.r-project.org>.
- [13] A. Karatzoglou, A. Smola, and K. Hornik: *The Kernlab Package*.
<http://cran.mirroring.de/doc/packages/kernlab.pdf>

Mobile Web Service-based Performance Information Model for Real-time Multi-Site Construction Project Management

Quang Le Hanh

*Universität Darmstadt, Institut für Numerische Methoden und Informatik im
Bauwesen, 64287 Darmstadt, Deutschland, Email: hanh@iib.tu-darmstadt.de,
Phone: +49(0)6151/163644*

Abstract

To effectively solve unanticipated problems and to efficiently make decisions about the process of construction at construction sites, responsible managers require the availability of large amount of information ranging from project drawings to the project specification. However, due to construction projects being often deployed far from the head/local offices, the distance between head/local offices and construction sites is a communication barrier concerning real-time and accurate information transfer. In order to overcome this situation, this paper initially describes and ranks project performance information following a mobile model. Then based on this proposed information model together with the integration of the Mobile Web Service technology and Smartphones, this paper proposes a *Mobile Performance Information System (MPINS) framework* which supports the required information exchange of contractor's site managers at three managerial levels – strategy, tactical and operative level – in as-demanded and real-time manner. To demonstrate this proposed framework, a prototype is implemented and presented.

Keywords

Web service, mobile web services, mobile devices, information model.

1 Introduction

Construction contractors usually perform multiple projects simultaneously in different places which may be hundreds or thousand kilometres away from the head office. This means a contractor has to execute the diverse projects corresponding with different requirements (e.g. qualification and progression). Therefore, communication among

construction sites and management head office is a key factor concerning the success of a construction contractor. The project performance information must be timely and exactly transferred and reported to the corporate levels in order to determine the proper strategies for best benefits and to satisfy the different requirements.

Construction projects are often deployed in an open executing environment and therefore, they highly depend on external factors such as weather conditions, geographical and geological conditions during the execution. Based on such unpredictable circumstances as well as the inherent complex characteristics of the construction projects, the construction industry is subject to higher risk and uncertainty than many other industries. For daily risk solving, the site managers rely heavily on various information sources such as project specifications, current project statements, past productivity estimates, materials specifications or the opinions of other team members. Incomplete information on the project variables as well as the ambiguity in project parameters at worksites lead to inadequate background knowledge upon which decisions are made.

Mobile technologies and wireless communication advanced quickly over the course of the last decade. Advantages of using mobile computing are in the ability to share data remotely in real-time, reducing rework and paperwork as well as being able to solve unpredicted problems on the worksites. In order to apply the potential of emerging mobile communication technologies, many recent researches focused on applying these technologies in the construction industry [1, 2, 3, 4].

Nevertheless, most commercial mobile applications for the construction industry are primarily designed to deliver pre-programmed functionality without any consideration of the user context [5]. This often shows the contrast of what an application can deliver and what the data requirements of a site manager really are. In practice, the functions of site managers are often different at construction sites, hence their requirements regarding information are different, too [6]. As a result, an effective information system must accommodate to the functions and responsibilities of each construction manager at each managerial level as well as linking the managers' functions and their information requirements.

In this paper, a mobile model of the project performance information is firstly constructed and developed in order to satisfy the various information requirements which relate to solving the unpredictable events of different site managers at worksites. Based on this proposed model together with the integration of mobile web service technology and Smartphones, this paper then proposes a Mobile Performance Information System

(MPINS) framework which offers the required information exchange between contractor's site managers and head/local offices at three managerial levels – strategy, tactical and operative level - in as-demanded and real time manner.

2 Mobile Web Services

Web service technology features a standard mechanism for communication between various types of applications [7]. Such standardisation is independent from the implementation of applications, platforms and operation systems under which they are employed. Furthermore, it does not depend on a particular communication protocol which may be used by the application. Web services are software components which can be described, searched and integrated by any web application. Therefore, web applications can communicate with as many data sources as possible regardless of the platform or computing environment in which they are hosted.

Mobile Web services are designed from the perspective of the Web services consumer to enable lightweight devices to share the computing capability and database with the server. Therefore, mobile web services also provide the ability to dynamically discover and invoke services regardless of operating system or programming languages.

Additionally – with respect to mobile Web services technology – it does not require data to be stored locally on the device during working processes and therefore eliminates losing collected data if the device is damaged or - in the case of mobile devices – runs out of battery power. As a result, the data handling processes will not influence the secondary storage of mobile devices which is often small. This is our basis upon which we construct a mobile as-demanded information supporting framework. By integrating the mobile web service technology with mobile devices, site managers can synchronise all newly generated information with the central database at the worksites in as-demanded and real time manner, which ensures that all responsible participants get updated quickly and can start working on tasks immediately.

3 Mobile Project Performance Information Model

Project performance information is typically represented by drawings, specifications and bills of quantity or schedules of construction works. In order to systematise it, the mobile project performance information set is hierarchically composed out of *project profile*, *cost*, *activity* and *external information*. *Construction activity information* is subsequently

introduced by information about *activity profile*, *construction technology*, *required resources* and *external conditions*. *Required resources information* is often represented by *material*, *equipment*, *cost* and *labour information* (see fig. 1).

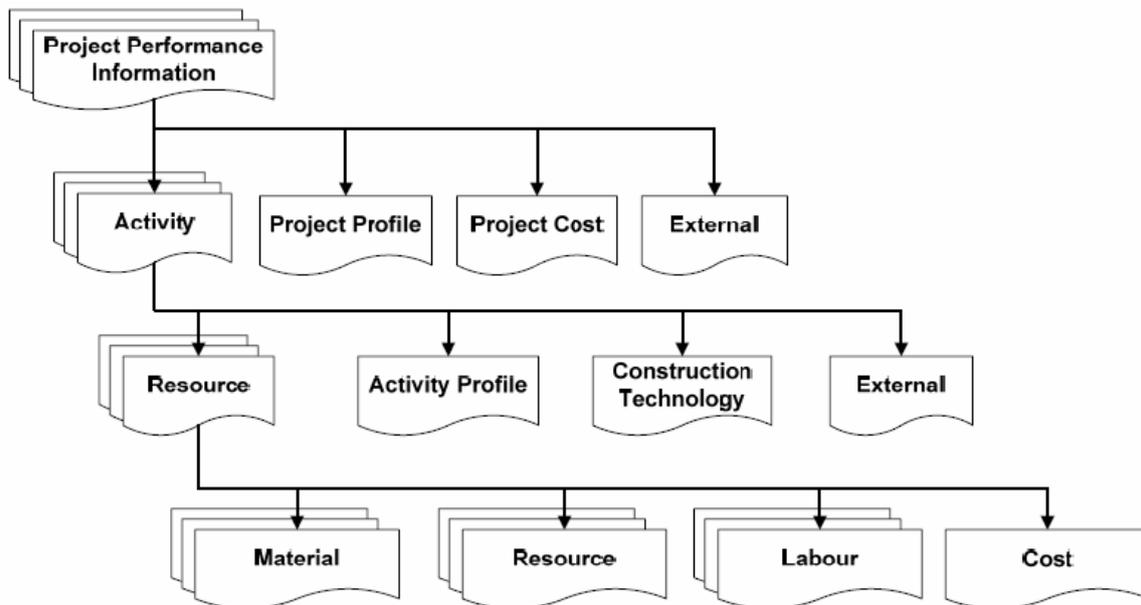


Fig. 1: A model of project performance information.

The single components are defined as follows:

- The *Project Profile* contains associated information which is used to basically describe a construction project such as the crucial identifications of project objectives, expected outcomes or scope, constraints and specifications. In addition, the project profile information also contains the data about the client number, contract number, timeframe, contract type and price.
- *Project Cost Information*: This part holds all information about the project costs. The project cost information is divided into several categories to reflect the actual project cost status. The divided costs include the material costs, labour costs, equipment costs and other costs which represent the project budget such as estimated costs, actual costs and the variance.

- The *External Information* table stores the information about the owner, consultant companies and subcontractors that are the organisations existing in the business relation list of the contractor. This data provides the information about the unit number, telephone number, responsible person, address and e-mail address which the contractor concerned.
- *Activity Information* is characterised by activity profile, resources, construction technology and external information.
- *Activity Profile* will store the general information about the construction activity such as activity name, duration, start and finish date and the activity relationships like successor and predecessor activities.
- *Resource Information* contains the data of manpower, machinery, materials and other data concerning the resources to be used for the construction activity.
- *Equipment information*: This part has a table containing all information about machines and construction tools which are deployed to realise construction activity.
- *Material information* is the data that supplies the knowledge about type, origin, quantity and quality of material which used in the activity execution.
- *Labour information*: A part that holds information about the workers who are required to execute the activity (e.g. type skill level and quantity). Besides, this information also includes the source of the required workers such as if the workers are owned by contractor or engaged from local region.
- *Construction technology*: The information in this part is presented as an abstract of construction technology that is applied to execute the construction activity as well as all of the construction specifications that are to be applied. Besides, the quantity of individual construction activity is also stored in this data table.
- *External Information* contains the information about the environment conditions which directly affect construction activities such as the weather condition, the geological and geographical conditions.

Additionally, in order to know immediately the effects of unexpected events to the single project progress or multi-projects progress for the global situation of the contractor, this paper refers to three tools of project monitoring methods:

- *Trend Analysis Diagram (TAD)* method which is based on the state of critical activities chain of an individual project or multiple projects [8]. This method

informs the manager what progress has been made, what progress should have been made and to what extent a program must be “crashed” to pull the project back in line with the program (see fig. 2)

- *Expenditure Information Diagram (EID)* method is generally used to monitor the expenditure of project costs. The EID indicates the expenditures associated with specific projects and to indicate the expenditures in particular items throughout an organisation (see fig. 3)
- *Project safety-time diagram (PSD)* method which is based on the contingent reserved time of a single project as well as of multi-projects [9]. Based on the continuous update of the safety time consumption caused by the unexpected problems, this method will support site managers to detect immediately the influence of this delay to the whole multi-projects system (see fig. 4).

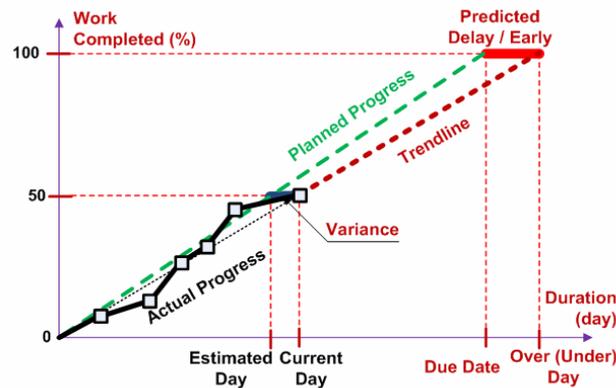


Fig. 2: Trend Analysis Diagram.

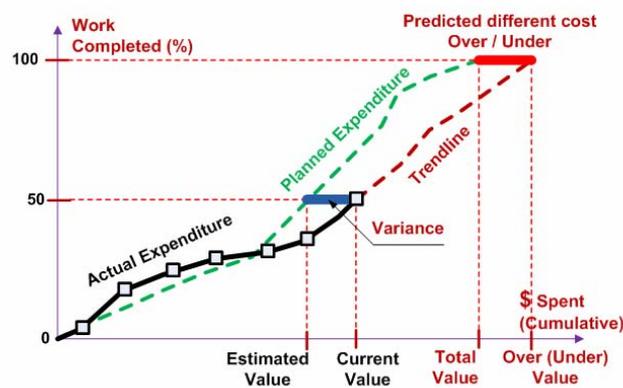


Fig. 3: Expenditure Information Diagram.

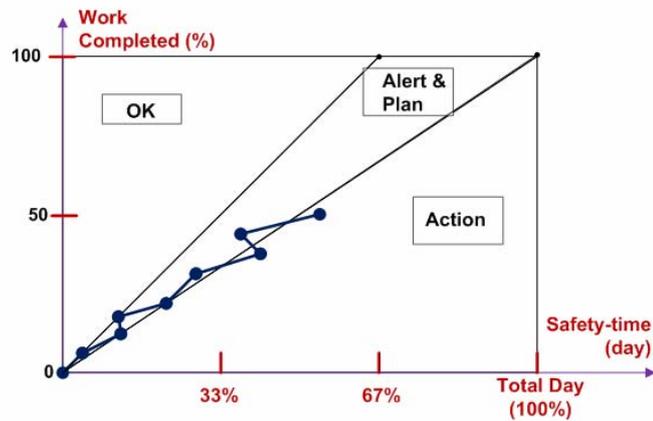


Fig. 4: Project Safety-Time Diagram.

4 Mobile Performance Information System – MPINS

4.1 MPINS-Layout

The architecture of the proposed Mobile Performance Information System (MPINS) framework consists of three logical components (see fig. 5) [10]:

- *Web server*: Hardware provides the accesses to a network. Generating HTTP requests to retrieve different length file according to a particular distribution. The web server contains web services which are remotely called from the mobile users (site managers) to retrieve the required information from the data repository.
- *Data repository*: It is responsible for storing all the information of multiple projects of the construction company. This is a central database that is placed in the head office.
- *Smartphones (SMs)*: Smartphones with windows mobile operation system for every site managers at construction sites. Each Smartphone has a MPINS application installed. This application performs requests and receives project information from multi-site project database web services.

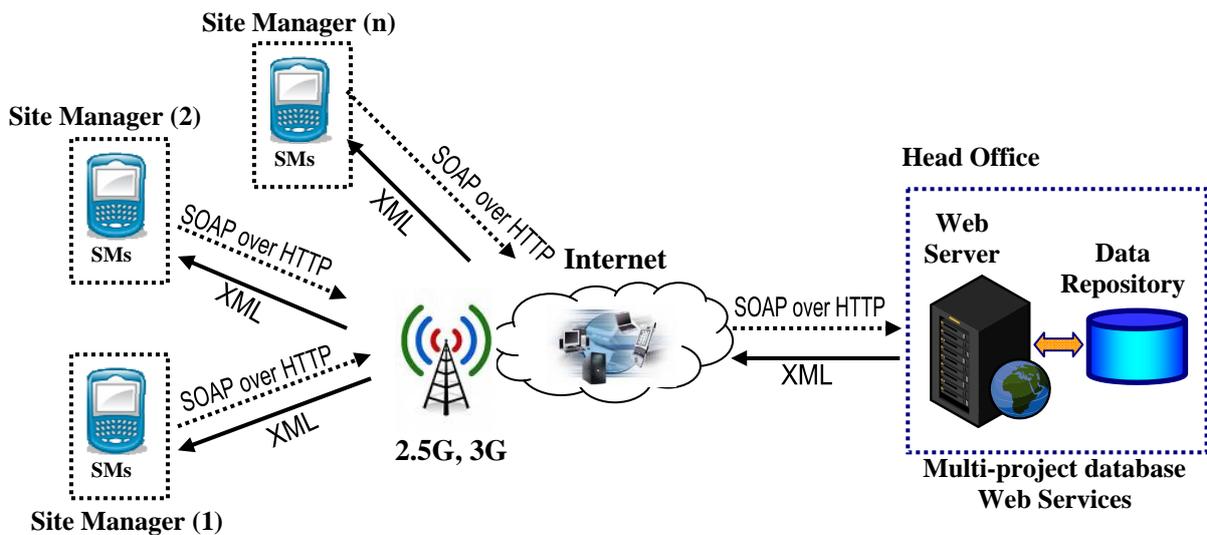
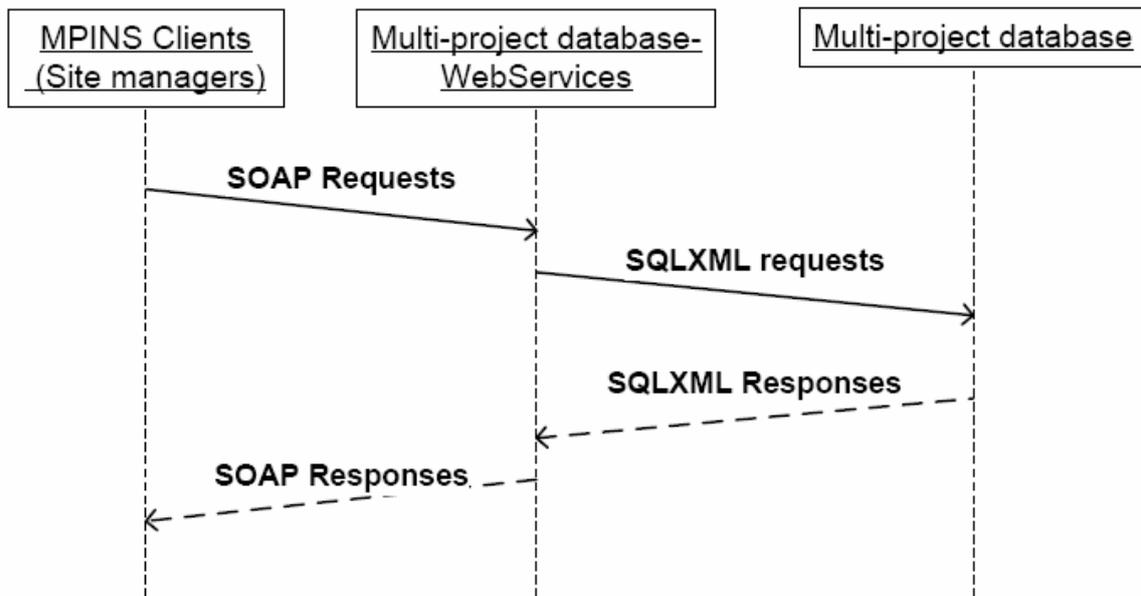


Fig. 5: MPINS – Network System.

The prototype web services used in this paper are multi-site project database web services. Based on the information requirements at construction site, the services are defined into two main categories: *Data services* and *process services*.

Data services are defined as services that can search and retrieve a specific set of information from the database server. An example of a data service would be a service that uploads construction specifications of an individual activity at construction site based on its *activity ID* or *activity name*. Processing services are defined as services that do computations on behalf of the user. These services allow the user to perform quick processing calculations, though the architecture does not place any restrictions of the type of calculations produced by the services. The example of these services can be progress controlling diagrams which are based on the real-time update new construction data. These two main web services offer the ability to search and handle the data repository at construction site.

Fig. 6 shows how MPINS performs under authorised identification when a client (site manager) requests information. The site manager accesses his MPINS application on his Smartphone and goes to the specific section such as the project information window and selects details of the required information. Then the MPINS connects to the web server through the mobile network and uses a Web service proxy to access a Web service in the web server. The web proxy maps available web services to the user application. The web



proxy handles all the underlying communications using a variety of standards such as SOAP and XML over HTTP.

Fig. 6: Usage pattern of MPINS.

The request message is sent to the server via the lower network protocol (HTTP) after the client has encapsulated it with XML using SOAP (Simple Object Access Protocol). The web server - Internet Information Services (IIS) - will then send SQLXML requests to the database. The web service server receives SQLXML responses from the database and then sends the responses in a SOAP message to the MPINS client. Essentially, the standard SOAP request and SOAP response is the key in information sharing between Mobi_PERINS components. The bodies of SOAP request and SOAP response contain XML contents that are generated according to the MPINS schema. The MPINS schema specifies the format of project information.

4.2 Prototype of MPINS

In order to materialise the proposed information system, this section presents a prototype of MPINS. As earlier discussed, MPINS is a tool to synthetically collect and manage the information generated from the construction site based on the as-demanded and real time manner. That means, based on the individual requirements of various site managers which relate to the their particular functions at each construction project, they can access to proper information folders in MPINS to retrieve the right information and to handle as

well as to update information to the central multi-site project database through wireless communication networks from construction site.

The prototype in this paper is not a completely organized web service application but an explanatory tool to demonstrate the necessity and applicability of MPINS. It is typically explained by six pictures which are presented in fig. 8 and 9. As shown in fig. 8, the operation manager or supervisor can access to the project activity folder in MPINS, thereafter, they can handle and update the new activity information of a construction project at worksite. And in fig. 9, the site managers can immediately check the progress, expenditure and safety-time remains of current project or relating projects.

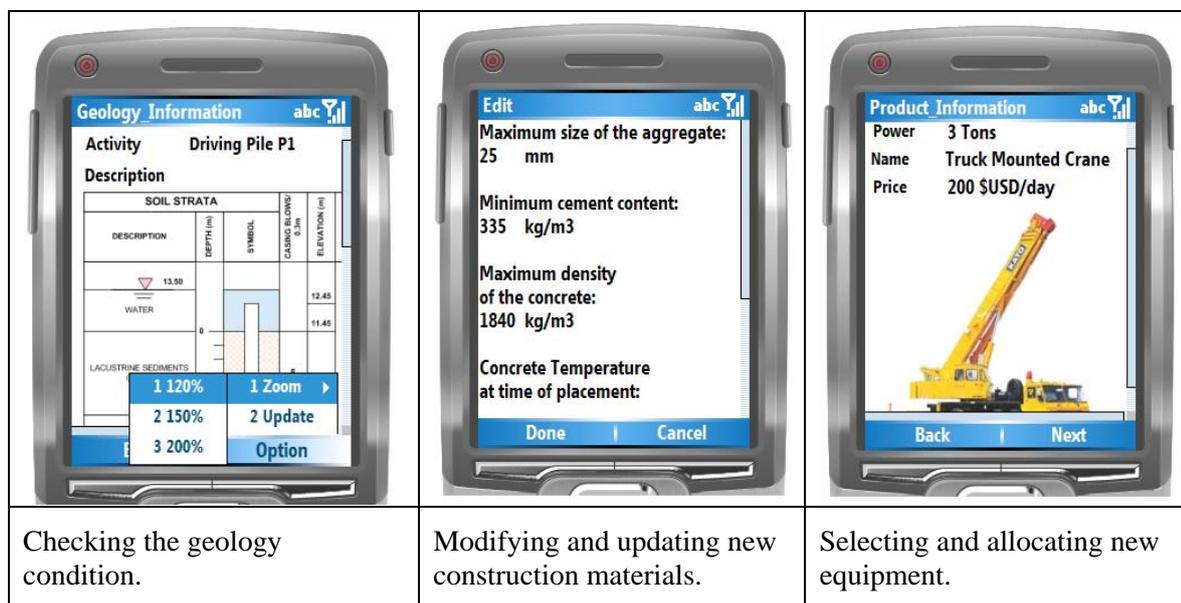


Fig. 8: Prototype of MPINS for assisting decision generation at worksites.

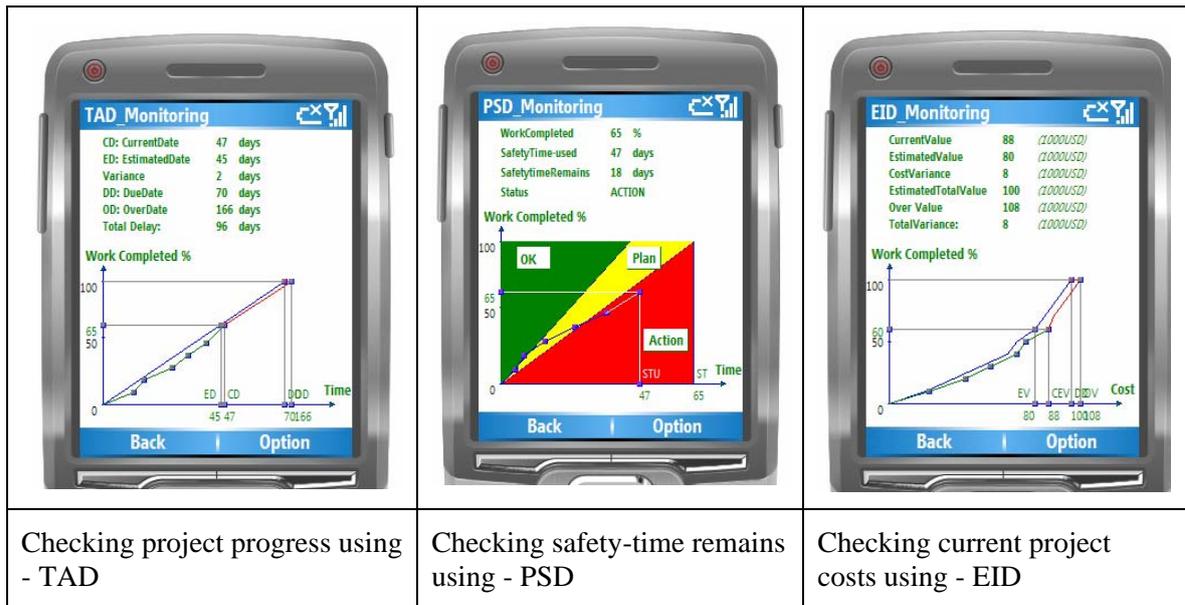


Fig. 9: Monitoring and controlling at worksites using MPINS.

5 Conclusions

The main contribution of this paper is twofold. Firstly, this paper constructed and developed a mobile model of the project performance information. Secondly, this paper proposed a mobile performance information system (MPINS) framework which based on the systematic model of project performance information and the integration between mobile web service technology and Smartphones. These can be used to improve the efficiency and effectiveness of on site data acquisition and information sharing among responsible participants under as demanded and real time manner. These can be effectively applied in controlling and monitoring multi-site projects.

Supported by MPINS, based on the information requirements according to their functions and contexts, various site managers can choose the corresponding information folder and handle or retrieve the proper information ranging from general information to detail information which can support their decision making processes at worksites.

The further development should focus on extending the proposed MPINS with the higher level of cooperation such as among construction firms and the owner as well as the government organisation. Additionally, the future research steps should also focus on the implementation and benefit evaluation of the proposed MPINS in real construction projects.

Bibliography

- [1] O. Koseoglu, D. Bouchlaghem, and D. Kerr. *Collaborative Mobile Visualisation in Construction (MOBIVISCON) Framework Development and Validation. Bringing ITC Knowledge to Work. 24th W78 Conference, Maribor. 2007.*
- [2] Y. Nakagawa. *Real Time Performance Information System Using Mobile Phone. 14th Annual Conference of the International Group for Lean Construction - IGLC-14, Santiago, Chile. 2006.*
- [3] L. Wang, Y. Lin, and P. Lin. *Mobile Construction RFID-Based Supply Chain Management Portal System. 11th International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering, Montreal, Canada. 2006.*
- [4] S. Cox, J. Perdomo, and J. Thabet. *Construction Field Data Inspection Using Pocket PC Technology. International Council for Research and Innovation in Building and Construction. CIB W78 Conference. 2002.*
- [5] Z. Aziz, C. Anumba, and K. Law. *Using Context-Awareness and Web-Services to enhance Construction Collaboration. 11th International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering, Montreal, Canada. 2006.*
- [6] A. K. Tenah. *Construction Personnel Role and Information Needs. In: Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 112, No. 1. 1986.*
- [7] F. L. Cabrera, C. Kurt, and D. Box. *An Introduction to the Web Services Architecture and its Specification. In: Web Services Technical Articles. MSDN Library. 2004.*
- [8] D. Walker, and A. Kumar. *Project Management in Highway Construction. In: The Handbook of Highway Engineering. 2006.*
- [9] Q. L. Hanh, and U. Rüppel. *Robust Process-Based Multi-Project Scheduling for Infrastructure Construction Projects in Vietnam. 7th European Conference on Product and Process Modelling (ECPPM), e-Business and e-work in Architecture, Engineering and Construction, Sophia Antipolis, France. 2008.*
- [10] Q. L. Hanh. *Mobile Performance Information System for Multi-Site Construction Projects. In: R. Windisch, G. Faschingbauer, and P. Katranuschof (Hrsg.): Forum Bauinformatik 2008 - Junge Wissenschaftler forschen. 2008.*

Prozessgesteuertes Ressourcenmanagement mit webGIS-Technologien für den operativen Hochwasserschutz

Armin Wagenknecht

Technische Universität Darmstadt, Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, 64287 Darmstadt, Deutschland, E-mail: wagenknecht@iib.tu-darmstadt.de, Telefon: +49(0)6151/163744

Kurzfassung

Extremhochwasserereignisse sind in Deutschland die bedeutendste Art von Naturkatastrophen, wie die Jahrhunderthochwasser an Rhein und Elbe gezeigt haben. Das Management von Ressourcen (z.B. Fahrzeugen, Geräten, Hilfs- und Verbrauchsmittel) während der Hochwasserbewältigung stellt eine große Herausforderung dar. Räumlich verteilte Ressourcen unterschiedlicher Organisationen müssen abgestimmt und zielgerichtet eingesetzt werden. Erfahrungsberichte vergangener Hochwasserereignisse haben Defizite im Ressourcenmanagement aufgezeigt. Aufgrund fehlender Informationen sowie unklarer Abläufe bei Ressourcenanforderung und -vergabe kam es zu ineffizienten Ressourceneinsätzen. Dies kann dazu führen, dass entscheidende Hochwasserbekämpfungsmaßnahmen unzureichend oder gar nicht durchgeführt werden können. In diesem Beitrag soll ein Ansatz vorgestellt werden, der die Ressourcenauswahl mittels *webGIS-Technologien* unterstützen soll – integriert in ein prozessgesteuertes Ressourcenmanagement soll eine koordinierte Ressourcenanforderung und –vergabe unterstützt werden.

Stichworte

Prozessmanagementsysteme, Prozessmodellierung, GIS, Hochwassermanagement

1 Einleitung

Durch das Auftreten extremer Naturereignisse und deren Einwirken auf den Menschen können Naturkatastrophen hervorgerufen werden, die die Gesundheit und das Leben der betroffenen Bevölkerung sowie deren Sachgüter in hohem Maße und in erheblichem Umfang gefährden können. Eine Naturkatastrophe zu verhindern bzw. deren Ausmaß zu

mindern stellt eine enorme Herausforderung dar, der sich die Gesellschaft permanent stellen muss. In Deutschland bergen extreme Hochwasserereignisse große Gefahr, Auslöser für Katastrophen zu sein. Die verheerenden Hochwasser an Oder (1998) und Elbe (2002) haben dies deutlich gezeigt. Zudem gehen Forscher davon aus, dass sich das Auftreten vergleichbarer Extremereignisse in der Zukunft aufgrund des Klimawandels noch verstärken wird [1]. Das Augusthochwasser 2002 an Mulde und Elbe forderte 21 Menschenleben und verursachte allein in Deutschland einen Sachschaden von rund 8,9 Mrd. Euro. In Sachsen wurden 45.000 Menschen evakuiert und trotz des Verbaus von über 30 Millionen Sandsäcken gab es 14 Deichbrüche an der Elbe und 125 an der Mulde. In die Maßnahmen der Katastrophenabwehr waren verschiedenste Organisationen (Katastrophenschutzbehörden, Feuerwehr, Technisches Hilfswerk, Hilfsorganisationen, Bundeswehr, Polizei [2]) involviert, die neben den Einsatzkräften auch Ressourcen (Fahrzeuge, Material und Geräte) zur Verfügung stellten. Eine der großen Herausforderungen der Katastrophenabwehr stellt die koordinierte Anfrage, Zuteilung und der Einsatz dieser Ressourcen dar. Auf das Management der Ressourcen im operativen Hochwasserschutz geht der folgende Abschnitt genauer ein.

2 Ressourcenmanagement im operativen Hochwasserschutz

Der operative Hochwasserschutz umfasst die gesamte Organisation der Abwehr von Hochwassergefahren (u. a. die Verteidigung von hochwassergefährdeten Ingenieurbauwerken) von den Führungsstrukturen über die Organisationsebenen bis hin zur Ausführung erforderlicher Maßnahmen/Handlungen. Zeitlich gesehen beginnt der Hochwasserschutz ab den ersten Maßnahmen, die zur Abwehr des herannahenden Hochwasserereignisses ergriffen werden und endet mit dem Abklingen des Hochwassers. Nicht jedes Hochwasser nimmt Ausmaße an, die Leben und Gesundheit zahlreicher Menschen gefährdet oder Sachwerte erheblich schädigt, so dass ein Zusammenwirken aller Behörden, Stellen und Organisationen notwendig ist. Ist dies aber der Fall, müssen Katastrophenabwehrmaßnahmen wie die Sicherung von Deichen oder die Evakuierung von Bewohnern aus einem gefährdeten Gebiet stattfinden. Zu Koordination und Führung der Katastrophenabwehr werden auf unterschiedlichen Verwaltungsebenen (bundes-landabhängig) Katastrophenschutzstäbe eingerichtet. Aufgrund der Nähe zu den Einsatzorten übernehmen meist die Katastrophenschutzstäbe der unteren Katastrophenschutzbehörden (Kreise, kreisfreie Städte) die Leitung. Das Ressourcenmanagement der Fahrzeuge, Geräte und Materialien, die bei den zugehörigen Kommunen des Kreises vorliegen, geschieht über den Katastrophenschutzstab des Kreises. Ressourcen anderer Kreise oder kreisfreier Städ-

te müssen entsprechend über höhere Ebenen (Regierungsbezirke, Landesministerium) angefragt werden. Das gleiche gilt für Ressourcen, die vom Land selbst, beispielsweise in einem Zentrallager, vorgehalten werden. Außerdem stellen bundesweit die Bundeswehr und das Technische Hilfswerk neben Einsatzkräften ebenso Fahrzeuge, Geräte und Materialien zur Verfügung. Diese können im Katastrophenfall über das Land angefordert werden.

Erfahrungsberichte des Elbehochwassers 2002 haben u. a. große Defizite im Ressourcenmanagement aufgedeckt [3]. Es wird erwähnt, dass keine ausreichenden Informationen über Verfügbarkeit, Standort und Art der Ressourcen existierte. Außerdem waren die Abläufe der Ressourcenanfrage und -zuteilung unklar. Das führte dazu, dass einige vorhandenen Ressourcen überhaupt nicht oder wenig zielgerichtet eingesetzt wurden, was möglicherweise verursacht, dass Katastrophenabwehrmaßnahmen zu spät, unzureichend oder überhaupt nicht durchgeführt werden können.

Die Effizienz des Ressourcenmanagements hängt in starkem Maße von zwei Faktoren ab: Zum einen von Informationen über die Ressourcen, darüber hinaus von klar definierten und einzuhaltenden Abläufe der Anfrage und Zuteilung der Ressourcen und die damit verbundenen Zuständigkeiten. Informationen über Ressourcen beinhalten u. a. Beschreibungen, Mengenangaben, Verfügbarkeiten, Lagerorte (Depots) und Kontaktdaten. Für einen vorausschauenden Einsatz sind auch Lageinformationen notwendig, beispielsweise Prognoseinformationen über zukünftige potentiell überflutete Straßen. Ein Teil dieser Informationen ist statisch in den von Kommunen und Kreisen ausgearbeiteten Alarm- und Einsatzplänen und Katastrophenschutzplänen aufgeführt. Außerdem gibt es erste Schritte von Bundesländern, diese Informationen in einer zentralen Datenbank vorhalten [4]. In Forschung und Praxis werden zurzeit Methoden und Softwarewerkzeuge zur Verbesserung des Ressourcenmanagements im operativen Hochwasserschutz im Rahmen von Hochwassermanagementsystemen entwickelt [5].

In diesem Beitrag soll ein kombinierter Ansatz vorgestellt werden, der darauf ausgerichtet ist, die Versorgung mit notwendigen, ressourcenbezogenen Informationen und die Abläufe im Ressourcenmanagement mittels prozessbasierter IT-Methoden und webGIS-Technologien zu unterstützen. Dies findet im Rahmen des DFG-Projektes *Prozessoptimiertes kooperatives Notfallmanagement für Wasserinfrastrukturen* statt. In diesem Projekt soll eine prozessgesteuerte Vorbereitung und Koordinierung komplexer Maßnahmen in der Katastrophenabwehr für extreme Hochwasserereignisse erforscht werden.

3 Computergestütztes prozessbasiertes Katastrophenmanagement bei extremen Hochwasserereignissen

Das übergeordnete Ziel des Projektes ist es, die Katastrophenschutzstäbe in den vorbereitenden und koordinierenden Tätigkeiten während der Katastrophenabwehr zu unterstützen. Dazu werden Abläufe, benötigte Informationen und Zuständigkeiten für Abwehrmaßnahmen und das damit verbundene Ressourcenmanagement analysiert und – soweit möglich – als Prozessmodelle abgebildet. Die Prozessmodelle können über ein Prozessmanagementsystem als Prozesse ausgeführt werden, wodurch eine zielgerichtete, geordnete Verteilung von Aufgaben und damit verknüpften Informationen ermöglicht wird (vgl. Abb. 1). Die an den Prozessen beteiligten Akteure können über ein Web-Interface an den ihnen zugeordneten Prozessaufgaben arbeiten.

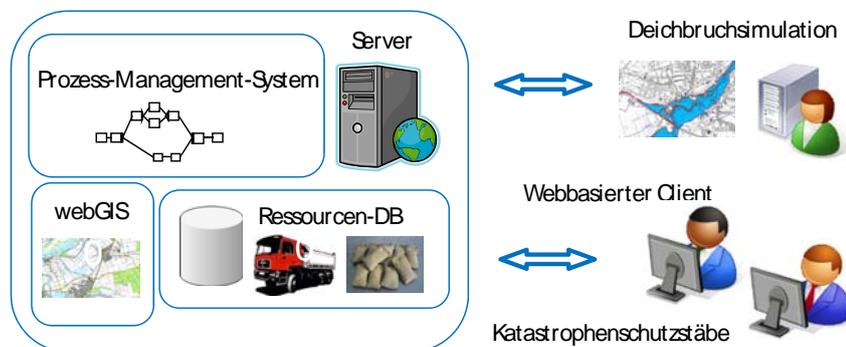


Abb.1: Prozessbasiertes Managementsystem für den operativen Hochwasserschutz.

Das System besitzt Schnittstellen, um Lageinformationen (aktuelle Wasserstände, prognostizierte Überflutungsflächen aus Deichbruchsimulationen) in die Prozesse zu integrieren. Zur Verwaltung der Ressourcendaten existiert eine objektrelationale Ressourcen-datenbank. In dieser sind sachliche und geographische Informationen zu den Ressourcen abgelegt. Zur Beschreibung der Ressourcen (Geräte, Fahrzeuge, Hilfsmittel, Ausrüstung, Verbrauchsmittel) wurde eine Typisierung entwickelt. Außerdem ist ein webGIS integriert um Prozessaufgaben mit geografischem Bezug darstellen und bearbeiten zu können. Da der Schwerpunkt dieses Beitrags auf der Unterstützung des Ressourcenmanagements liegt, soll in den nachfolgenden Abschnitten auf zwei Bereiche eingegangen werden. Zum einen wird ein entwickeltes webGIS zur Ressourcensuche und -auswahl beschrieben. Zum anderen wird ein prozessgesteuertes Ressourcenmanagement erläutert in welches das *webGIS* eingebunden ist.

4 Entscheidungsunterstützung in der Ressourcenauswahl mit webGIS-Technologien

Um den Katastrophenstabsmitarbeiter in der Suche und Auswahl geeigneter Ressourcen für eine Abwehrmaßnahme zu unterstützen, wurde ein webGIS entwickelt. Ein webGIS ist ein Informationssystem mit einer Client-Server-Architektur das webbasiert GIS-Funktionalitäten zur Verfügung stellt. Das entwickelte webGIS ist eine PHP-Applikation welche auf dem *UMN-Mapserver* aufbaut. Es stellt die notwendigen Sach- und Geoinformationen in Abhängigkeit der aktuellen Katastrophenlage zur Verfügung und zeigt Vorschläge zur Ressourcenauswahl an. Als Auswahlkriterien der Ressourcensuche werden folgende Informationen ausgewertet:

- Verfügbarkeit der Ressourcenart und –menge für den angeforderten Zeitraum
- Anlieferungszeit bezogen auf die Entfernung zum Einsatzort unter Berücksichtigung zukünftig überfluteter Straßen

Die prognostizierten Überflutungsflächen werden über das Deichbruchsimulationsprogramm „FloodArea“ [6] berechnet, das auch mit einem Computercluster verwendet werden kann und somit schnelle Simulationen von Deichbruchszenarien auch für den operationellen Einsatz ermöglicht.

The screenshot displays a webGIS interface with a main map, a legend, a layers panel, and a resource information table. The map shows a network of routes connecting various depots to an incident site. Flooded areas are indicated by grey shading. The legend identifies symbols for incident sites, depots (all available, partial available, and at risk), and flooded areas. The layers panel shows that both the topographic map and the flooded areas are active. The resource information table provides details for a specific resource, including its ID, location, and available quantity.

ID	Y(RE)	X(HO)	DIENSTSTELLE	ADRESSE	TELEFON	VERFÜGBARE RESSOURCEN
4	3457031	5502054	Kieslager	Am Wachturm 14	06121 12344	7000 10000 Stk Sandsäcke Jute gefüllt

Abb.2: Screenshot des webGIS mit Erläuterungen.

Die Ergebnisse werden über Geo-Services in das webGIS integriert. Für die Routenberechnung von Ressourcendepots zu potentiellen Einsatzorten der Hochwasserabwehrmaßnahmen wird der standardisierte *OpenLS Route Service* der Universität Bonn [7] eingesetzt. Dieser ermöglicht ein Routing unter Angabe von Flächen die nicht passiert werden können. Das webGIS besitzt hauptsächlich folgende Funktionalitäten (vgl. hierzu auch Abb. 2):

- Visualisierung von Depots, Maßnahmenorten, prognostizierten Überflutungsgebieten, Anfahrtswege
- Anlegen und Ändern von Maßnahmenorten auf der Karte
- Anzeige der Depots die über gesuchte Ressourcen verfügen
- Anzeige von Ressourceninformationen (Eigenschaften, Menge etc.)
- Depot und Ressourcenauswahl über die Karte
- Anzeige der Entfernung und Transportdauer von jedem möglichen Depot mit verfügbaren Ressourcen zum Maßnahmenort unter Berücksichtigung potentiell überfluteter Straßen

Um das webGIS einzelnen Prozessaufgaben in Prozessmodelle des im nächsten Abschnitt aufgeführten Prozess-Management-Systems (PMS) zuordnen zu können, wurden entsprechende Implementierungen vorgenommen und Schnittstellen geschaffen.

5 Prozessgesteuertes Ressourcenmanagement

Um die Abläufe der Ressourcensuche, -auswahl und -zuteilung und die mit den einzelnen Schritten verbundenen Zuständigkeiten abzubilden, werden Prozessmodelle erstellt, die über ein Prozess-Management-System als Prozesse instanziiert werden können und somit das Ressourcenmanagement steuern. Zum Verständnis soll zuerst auf Prozessmodelle und Prozess-Management-System eingegangen werden, bevor das prozessgesteuerte Ressourcenmanagement vorgestellt wird.

5.1 Prozessmodelle und Prozess-Management-Systeme (PMS)

Prozessmodelle ermöglichen die Abbildung von Abläufen in denen von einander unabhängige Aufgaben in einer logischen Reihenfolge von unterschiedlichen Stellen bzw. Organisationen durchgeführt werden und in denen aufgabenbezogene Informationen zwischen den Akteuren weitergeleitet werden müssen. Die Prozessmodelle bestehen aus Aktivitäten die logisch als Sequenz oder parallel angeordnet sind und einen Startpunkt und

einen Endpunkt besitzen. Jeder Aktivität ist ein Bearbeiter zugeordnet, wobei dieser Bearbeiter eine bestimmte Person, aber auch eine Position innerhalb einer Organisation sein kann (zum Beispiel ein Katastrophenschutzstabsmitarbeiter eines Kreises).

Computerverarbeitbare Prozessmodelle benötigen eine formale Notation, um diese Prozessmodelle in einem Prozess-Management-System speichern, ausführen und überwachen zu können. Die Prozessmodelle stellen Vorlagen dar, aus denen Prozessinstanzen vom PMS generiert und gestartet werden können. Über webbasierte Prozessclients können die Bearbeiter die ihnen zugeordneten Aktivitäten bearbeiten. Wird ein Prozessmodell gestartet (also ein Prozess instanziiert), werden die Aktivitäten und zugeordneten Informationen in der definierten Abfolge den zugeordneten Bearbeitern über den Prozessclient zugeleitet. Nachdem eine Aktivität bearbeitet wurde, werden die eingegebenen Informationen im Prozess weitergeleitet bzw. verarbeitet.

Einer Aktivität kann prinzipiell jegliche Programmlogik enthalten mit der diese Aktivität durch den Bearbeiter „durchgeführt“ werden kann. Außerdem existieren automatische Aktivitäten die keine Nutzerinteraktion erfordern (z.B. Abfrage einer Datenbanktabelle oder eines Webservices). Beispiele für Bearbeiteraktivitäten sind das Ausfüllen eines Webformulars, das Bestätigen einer Textnachricht, aber auch das Auswählen eines Objektes aus einer digitalen Karte. Für Aktivitäten welche die gleiche Bearbeitungsfläche benötigen, gleiche Programmlogikkomponenten enthalten oder die gleichen Applikationen aufrufen, können Vorlagen entwickelt und bereitgestellt werden die sich wieder verwenden lassen.

Für das prozessgesteuerte Ressourcenmanagement wird das Prozess-Management-System „Aristaflow“ [8] eingesetzt und auf die spezifischen Bedürfnisse des Anwendungsgebietes angepasst.

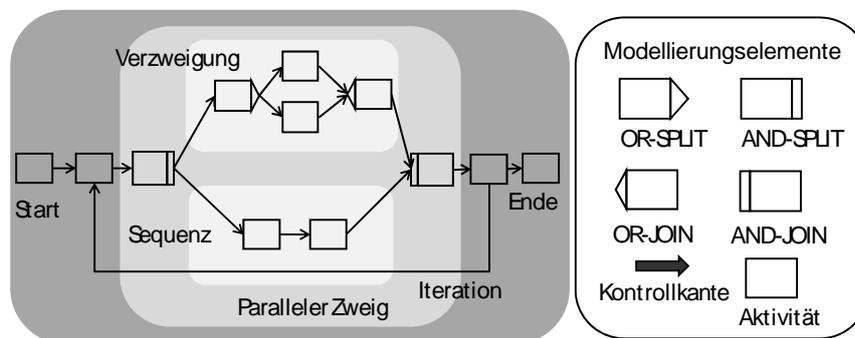


Abb.3: Modellierungselemente von „Aristaflow“.

Aristaflow wurde u. a. ausgewählt, weil eine Prüfung der formalen Korrektheit schon bei der Erstellung der Prozessmodelle stattfindet und es die Anpassung vorhandener sowie die Entwicklung neuer Aktivitätsvorlagen unterstützt. Auf die Notation der Prozessmodellelemente von Aristaflow soll hier kurz eingegangen werden, da sie im nächsten Abschnitt zur Darstellung des Prozessmodells genutzt wird (siehe Abb. 3). Die Aktivitäten werden über Kontrollkanten miteinander verknüpft. Mittels Verzweigungs- und Vereinigungselementen (OR, AND) können neben Sequenzen auch parallele und alternative Abfolgen modelliert werden. Für bedingte Verzweigungen und Iterationen müssen Bedingungen erstellt werden, auf Basis derer das PMS für den laufenden Prozess über die Wahl des Verzweigungsastes oder das Durchführen der Iteration entscheidet.

5.2 Prozessgesteuertes Ressourcenmanagement

Mit dem Ziel das Ressourcenmanagement für die Katastrophenabwehr effizienter, zielgerichteter und transparenter zu machen, wurden die Zuständigkeiten, Aufgaben und Kommunikationswege analysiert und Abläufe der Ressourcensuche, -anfrage und -zuteilung als Prozessmodell im Prozess-Management-System Aristaflow modelliert (Abb. 4).

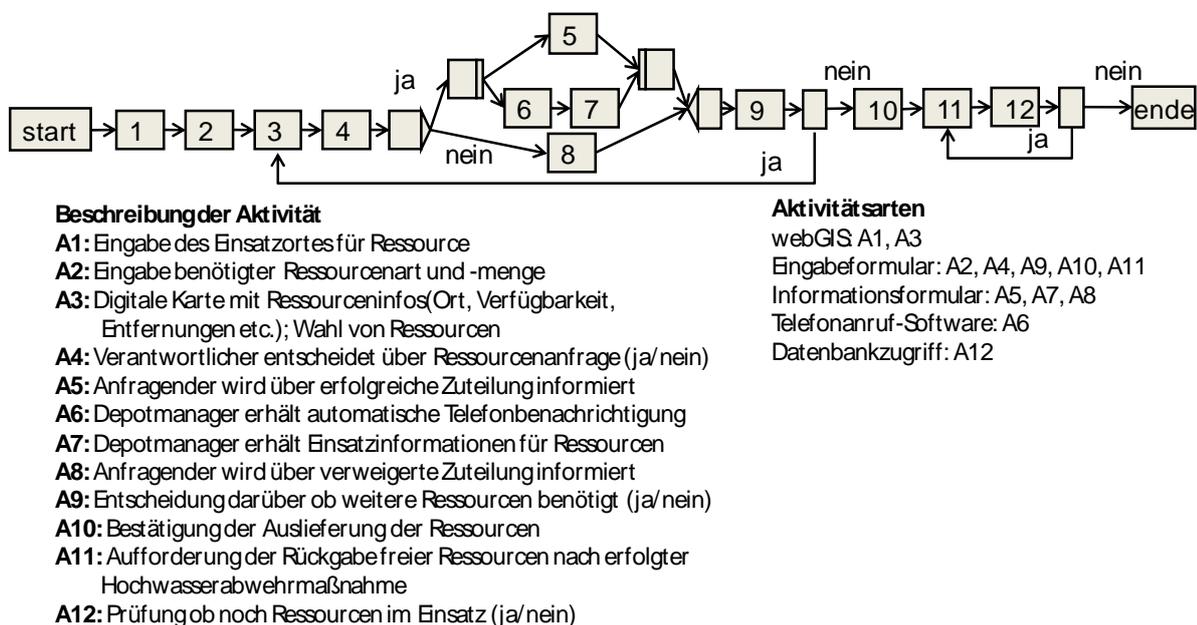


Abb.4: Prozessmodell für das Ressourcenmanagement.

Neben der Nutzung und Erweiterung vorhandener Aktivitätsvorlagen wurden auch eigene implementiert. Die Organisationsstrukturen des hessischen Katastrophenschutzes (be-

hördliche Ebenen, Katastrophenschutzstabszusammensetzungen etc.) wurden in einem Organisationsmodell des PMS angelegt. Die Zuordnung der Zuständigkeiten für die einzelnen Aktivitäten in dem Prozessmodell erfolgt über das konzipierte Organisationsmodell.

Eine Prozessinstanz des Modells kann für jede Ressourcenanfrage von dem zuständigen Katastrophenstabsmitglied eines Landkreises gestartet werden. Über *Aktivität 1* wird die webGIS-Oberfläche in dem Prozessclient des Katastrophenstabmitarbeiters aufgerufen und er hat die Möglichkeit einen Einsatzort auszuwählen oder anzulegen. In *Aktivität 2* können über ein Auswahlformular Ressourcentypen, benötigte Mengen und die Zeit eingegeben werden (Abb. 5 zeigt ein Beispiel für eine Sandsackanforderung).

The screenshot shows the ARISTAFLOW web client interface in a Mozilla Firefox browser. The browser address bar shows 'http://localhost:8080/client'. The user is logged in as 'EOC_member'. The interface features a navigation menu on the left with options like 'Workspace', 'Pending Tasks (24)', 'Instantiable Templates', 'Completed Tasks', and 'Open'. The main content area displays a form for selecting resources. It is divided into two sections: 'Fahrzeuge' (Vehicles) and 'Ausrüstungen' (Equipment). Under 'Fahrzeuge', there is a table with columns for 'Bezeichnung' (Designation) and 'bestellen' (order), with 'Motorboot' listed. Under 'Ausrüstungen', there is a table with columns for 'Bezeichnung' and 'bestellen', with 'Hammer' listed. To the right of these sections, there are input fields for 'Sandsack' (7000) and 'Motorenöl'. Below the equipment section, there is a table for 'Geräte' (Equipment) with columns for 'Bezeichnung' and 'bestellen', with 'Notstromaggregat' listed. At the bottom of the form, there are two buttons: 'Ressourcen anfordern' (Request resources) and 'Abbrechen' (Cancel).

Abb.5: Auswahlformular im Prozess-Client.

Die eingegebenen Informationen werden an *Aktivität 3* weitergeleitet, über die der Bearbeiter eine Entscheidungsunterstützung bei der Ressourcenwahl durch das webGIS erhält (näheres dazu in Abschnitt 4). Er kann nun die benötigten Ressourcen über die digitale Karte auswählen, woraufhin die konkrete Anfrage in Abhängigkeit der Zuständigkeiten in *Aktivität 4* von der jeweiligen Stelle akzeptiert oder abgelehnt wird. Bei einer Ablehnung bekommt der Anfragende eine Nachricht (*Aktivität 8*) und kann wenn gewünscht eine neue Anfrage über das webGIS tätigen (*Aktivität 9, 3*). Wird der Ressourcenanfrage zugestimmt wird der Bearbeiter auch entsprechend benachrichtigt (*Aktivität 5*) und der Verwalter des betroffenen Ressourcendepots wird über eine vom System generierte Tonnachricht per Telefon alarmiert (*Aktivität 6*) um sich daraufhin über das System benötigte Auslieferungsinformationen (generiertes pdf-Dokument) zu besorgen. Um die Ressourceninformationen während der Katastrophenabwehr aktuell zu halten muss die Auslieferung

der Ressourcen vom Depotverwalter bestätigt werden (*Aktivität 10*). Außerdem müssen Ressourcen die wieder eingesetzt werden können (keine Verbrauchsmittel wie Sandsäcke) nach der Nutzung wieder freigegeben werden (*Aktivitäten 10, 11, 12*).

Die in Abb. 4 aufgeführten Aktivitätsarten sollen verdeutlichen, mit welcher Bearbeitungsoberfläche die Aktivitäten im Prozessclient von der zuständigen Person durchgeführt werden, bzw. auf welche Programme in den einzelnen Aktivitäten zugegriffen wird. Um die Steuerung des modellierten Prozesses über das PMS und die Sicht des Bearbeiters der einzelnen Aktivität aufzuzeigen ist in Abbildung 6 eine laufende Prozessinstanz abgebildet. Sie zeigt beispielhaft bereits erledigte Aktivitäten (1, 2, 3, 4, 5), nicht durchlaufene Aktivitäten (8) und die Bearbeitersicht einer Aktivität (1, 4, 5).

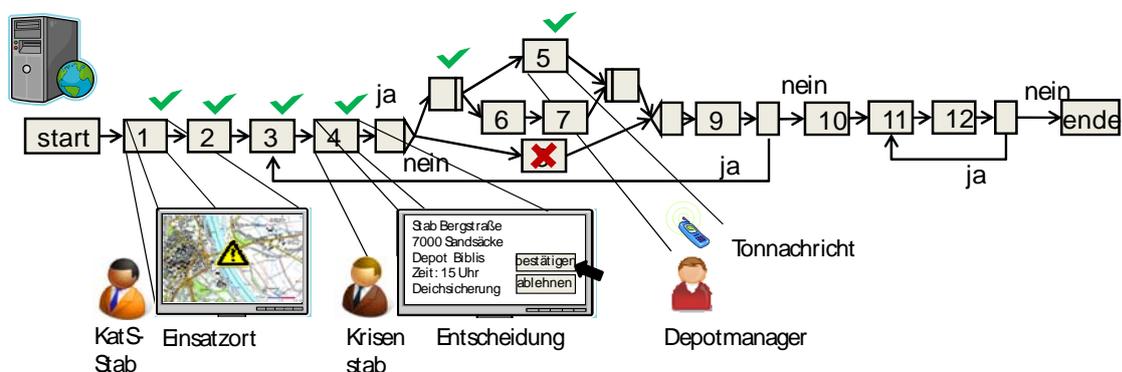


Abb.6: Beispiel für eine Prozessinstanz.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Extreme Hochwasserereignisse der vergangenen Jahre haben gezeigt, dass das Ressourcenmanagement während der Hochwasserbekämpfung nicht zufrieden stellend erfolgt ist. Es fehlte an Informationen über Ressourcen, deren Verfügbarkeit und deren Standorte. Außerdem waren die Abläufe der Ressourcenwahl, -anforderung und -vergabe unklar. Hierdurch kann die erfolgreiche Durchführung von Katastrophenabwehrmaßnahmen gefährdet werden. Um diese Situation zu verbessern, wurde ein computergestütztes Ressourcenmanagement konzipiert. Der Ablauf der Ressourcenwahl, -anforderung und -vergabe wird in diesem Ansatz auf Basis formaler Prozesse über ein erweitertes Prozessmanagementsystem gesteuert. Zur Entscheidungsunterstützung für die Ressourcensuche wird ein webGIS in die Prozesse integriert, das dem Katastrophenstab auf Basis von Lage- und Prognoseinformationen Ressourcenvorschläge liefert. Dieser Ansatz ermöglicht

eine transparentere, zielgerichtete Ressourcenauswahl und -zuteilung sowie einen koordinierten Informationsfluss zwischen den Beteiligten.

Zukünftig sollen die erarbeiteten Ergebnisse und die prototypische Implementierung mit der am DFG-Projekt beteiligten Katastrophenschutzbehörde im Rahmen von Expertengesprächen diskutiert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] C.-D. Schönwiese. *Klimawandel in Hessen. In: Klimawandel. Anpassungsstrategien in Deutschland und Europa. Schriftenreihe WAR 183. Inst. WAR. 2007.*
- [2] Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (Hrsg.). *Dokumentation des Hochwassers vom August 2002 im Einzugsgebiet der Elbe. 2004.*
- [3] H.-P. von Kirchbach, et al.: *Bericht der Unabhängigen Kommission der Sächsischen Staatsregierung Flutkatastrophe. 2002.* <http://www.schlaudi.de/hw/Kirchbachbericht.pdf>
- [4] U. Natke, M. Benstein, A. Neumann: *Das Informationssystem Gefahrenabwehr Nordrhein-Westfalen. LDVZ-Nachrichten. 2006. pp. 27–31.*
- [5] C. de Gooijer, L. R. Wentholt, and E. J. Langkamp. *FLIWAS. Flood Information and Warning System. In: Proceedings of the 5th Annual Mekong Flood Forum, Ho Chi Minh City, Vietnam. 2007.*
- [6] Geomer GmbH. *FloodArea – ArcGIS-Erweiterung zur Berechnung von Überschwemmungsbereichen. Anwender-Handbuch. 2008.* http://www.geomer.de/fileadmin/templates/main/res/downloads/floodarea_manual_dt_9.pdf
- [7] P. Neis, A. Schilling, A. Zipf. *3D Emergency Route Service (3D-ERS) based on OpenLS Specifications. GI4DM 2007. 3rd International Symposium on Geoinformation for Disaster Management, Toronto, Canada. 2007.*
- [8] P. Dadam, M. Reichert, S. Rinderle-Ma, K. Göser, U. Kreher, und M. Jurisch. *Von ADEPT zur AristaFlow BPM Suite - Eine Vision wird Realität: "Correctness by Construction" und flexible, robuste Ausführung von Unternehmensprozessen. In: Ulmer Informatik-Berichte, Nr. 2009-02. 2009.*

Neue Wege bei der Navigation in Gebäuden

Thomas Wießflecker

Universität Graz, Institut für Bauinformatik, 8010 Graz, Österreich,
E-mail: thomas.wiessflecker@tugraz.at, Telefon: +43(0)316/8734346

Kurzfassung

Lückenlose Navigation – auch in Gebäuden – wird immer wichtiger. Bestehende Technologien lassen sich in bebautem Gebiet jedoch nicht zur Anwendung bringen. Daher ist es notwendig, neue Wege zu beschreiten, um die computergestützte Navigation in Gebäuden zu ermöglichen. Die vorgeschlagenen Verfahren basieren auf der Positionsermittlung mit Hilfe von Beschleunigungssensoren und dem Abgleich mit Gebäudemodellen. Die Bewegungskurve der Person vor Ort wird analysiert und an die Geometrie des Gebäudes angepasst. Dazu werden neue Methoden des *Indoor-Map-Matchings* vorgestellt. Der Verzicht auf im Gebäude installierte technische Hilfsmittel und die Verfügbarkeit von Gebäudemodellen versprechen die einfache und rasche Einsetzbarkeit des Systems in großen Gebäuden. Messresultate mit dem Prototypen des entwickelten *Computer Aided Disaster Management Systems (CADMS)* zeigen die Leistungsfähigkeit des vorgeschlagenen Ansatzes.

Stichworte

Innenraumpositionierung, Lokalisierung, Gebäudemodelle, Map Matching, Kartenabgleich, Katastrophenmanagement, CADMS

1 Einleitung

Das computergestützte Nachverfolgen von Fahrzeugen auf Straßen in freiem Gebiet ist dank der GPS-Technik mittlerweile ein gelöstes Problem. Nähert man sich jedoch den Häuserschluchten der großen Städte, werden die vom Satelliten stammenden Mikrowellen oft von Strukturen aus Stahl und Beton gedämpft, was eine Nutzung des Services erschwert [1, 2].

Die Positionsbestimmung für Fußgänger in bebautem Gebiet stellt noch weitaus höhere Anforderungen als das Nachverfolgen von Fahrzeugen. Sollen GPS-basierte Verfahren zum Einsatz gebracht werden, ist die Navigation nur in Bereichen möglich, die eine di-

rekte Sichtverbindung zum Satelliten bieten. Damit scheiden viele Areale rund um Gebäude bereits aus. Die Positionierung innerhalb von Gebäuden oder in unterirdischen Strukturen ist nicht möglich. Andere Verfahren basieren auf fest installierten technischen Hilfsmitteln, die in das Gebäude oder dessen Umgebung eingebracht werden müssen. Dazu zählen die Verwendung von *WLAN*- und *GSM-Sendern* oder *RFID-Tags* [3]. Diese Lösungsansätze sind jedoch kostenintensiv, ungenau und wenig flexibel. Sie erlauben keine unabhängige Positionsbestimmung in Gebäuden.

Trotzdem wird die Navigation in Gebäuden immer stärker nachgefragt. Navigationslösungen, die ursprünglich für die Verwendung im Auto vorgesehen waren, sollen nahtlos auch für mobile Anwendungen wie das Durchqueren von Städten und Gebäuden benutzt werden können. Dies führt zum leichteren Auffinden von Gebäudeteilen und Räumen in großen, weit verzweigten Liegenschaften, zur Verkürzung der zurückgelegten Wege in Gebäuden und zur Vermeidung unnötigen Umherirrens. Dadurch können Zeitaufwand und Personalkosten reduziert werden. Rettungskräfte können mit dem Wissen um ihren aktuellen Aufenthaltsort zielgerichtet und effizient von einer zentralen Stelle geleitet werden, was im Ernstfall wiederum Einsatzzeit und entstandenen Sachschaden minimiert und gegebenenfalls sogar zur Rettung von Menschenleben führen kann. Auch das Auffinden vermisster Personen wird erleichtert. Dadurch hat die Ermöglichung der computergestützten Navigation in Gebäuden nicht nur kommerzielle Bedeutung, sondern auch wesentlichen Einfluss auf die Sicherheit in Städten und Infrastrukturen, was dem stetig steigenden Sicherheitsbedürfnis gerecht wird.

Am Institut für Bauinformatik an der Technischen Universität Graz wird ein System entwickelt, das die lückenlose, autonome Navigation in Gebäuden ermöglicht. Dieses System bietet den großen Vorteil der Unabhängigkeit von im Gebäude installierten technischen Hilfsmitteln. Der primäre Anwendungszweck liegt in der Führung von Rettungskräften zur Erleichterung des Katastrophenmanagements [4]. Die physikalische Positionsbestimmung wird mit Hilfe von Inertialsensoren durchgeführt. Ihre Daten werden nach zweimaliger numerischer Integration über die Zeit aufgrund der großen Ungenauigkeit und dem Auftreten von Drift mit einem Gebäudemodell der entsprechenden Liegenschaft abgeglichen [5]. Dieser Abgleich basiert auf der neuartigen, intelligenten Nutzung der Daten im Gebäudemodell sowie der Anwendung speziell entwickelter, geometrischer Algorithmen und führt zu einer stark verbesserten Genauigkeit der Positionierung. Einige Methoden dieses Kartenabgleichs sollen in diesem Dokument beschrieben werden und stellen gleichzeitig seinen Schwerpunkt dar. Die aktuelle Position im Gebäude wird dem Anwender auf einem digitalen Grundrissplan auf einem kleinen mobilen Endgerät, z.B.

einem Smartphone, in Echtzeit angezeigt. Sie kann über drahtlose Funknetzwerke an andere Dienstteilnehmer oder an eine zentrale Leitstelle weitergegeben werden.

Nach Motivation und Einleitung zeigt das zweite Kapitel bisher existierende Techniken zum Kartenabgleich und erklärt, warum diese nicht für die Navigation in Innenräumen verwendet werden können. Der dritte Teil gibt einen Überblick über die entwickelten Methoden des Kartenabgleichs in Gebäuden, während das vierte Kapitel Messergebnisse, die mit einem Prototypen generiert wurden, qualitativ analysiert und die Funktionsfähigkeit der vorgeschlagenen Algorithmen untermauert. Das fünfte Kapitel beschließt den Beitrag mit einem Resümee und einem Ausblick auf weitere Entwicklungen.

2 Kartenabgleich für die Anwendung im Verkehrswesen

Die Methoden des Kartenabgleichs (bzw. des *Map Matchings*) haben das Ziel, einen – meist mittels GPS ermittelten – Positionspunkt möglichst wirklichkeitsnah in das Kartenmodell einzupassen. Dabei spielen Ungenauigkeiten bei der physikalischen Positionsmessung und der Erstellung des digitalen Kartenmaterials eine Rolle. Für den Straßenverkehr wird die Straße auf ihre Mitte beschränkt. Dadurch kann das Kartenmodell auf ein Netzwerk, bestehend aus Knoten und Kanten, reduziert werden. Die Knoten repräsentieren die Kreuzungen, die Kanten stellen die verbindenden Straßensegmente dar.

Bei der einfachsten Art des Map Matchings wird die *Euklidische Distanz* zwischen dem Messpunkt und den Knoten des Modells berechnet. Als Ergebnis wird jener Knoten zurückgeliefert, der die geringste Distanz zum Messpunkt aufweist. Dieses Verfahren wird als *Point-to-Point-Matching* bezeichnet und birgt Unzulänglichkeiten u. a. in Bezug auf die Plausibilität der Positionierungsergebnisse, da ausschließlich geographische, nicht jedoch topologische Informationen verwendet werden [6]. Das *Point-to-Curve-* und das *Curve-to-Curve-Matching* stellen anspruchsvollere Methoden des Kartenabgleichs mit spezifischen Vor- und Nachteilen dar [7]. Zahlreiche Anwendungen des Map Matchings basieren auf Weiterentwicklungen und Verfeinerungen der drei erwähnten Techniken [8, 9].

Der Quotient aus Breite und Länge ist für Räume in aller Regel weitaus größer als für Straßensegmente, da nur die wenigsten Räume eine übermäßig große Länge im Verhältnis zu ihrer Breite aufweisen. Dazu kommt, dass sich Fahrzeuge auf Straßen nahezu geradlinig parallel zur Straßenmitte bewegen, während die Bewegungskurven von Fußgängern in Gebäuden – abhängig von der Intention zum Betreten eines Raumes – nicht vorhersagbare Ausformungen annehmen. Der Grund für das Bewegen auf Straßen ist haupt-

sächlich der Verkehr, während es in Gebäuden und Räumen auch der Verbleib sein kann. Aus u. a. diesen Gründen reicht es nicht, Gebäude als simplen Graphen zu modellieren und die gemessenen Positionspunkte auf die Knoten oder die Kanten einzupassen.

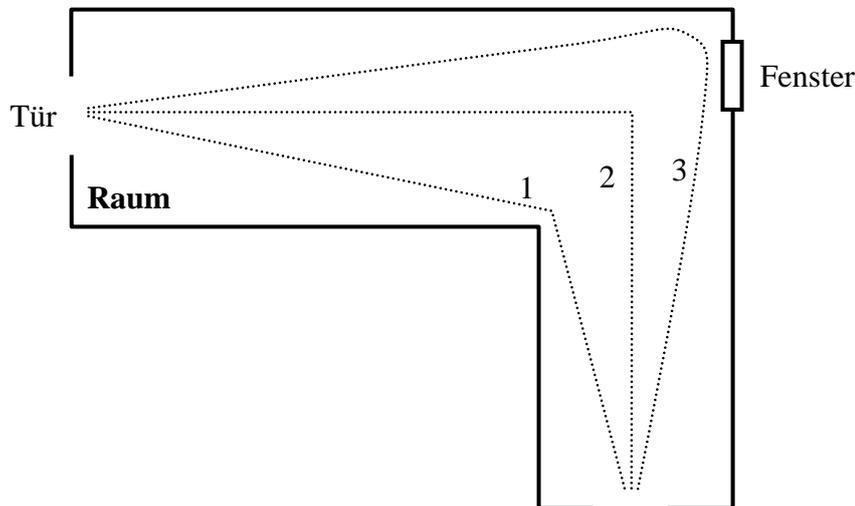


Abb. 1: Raum mit drei möglichen Referenzstrecken.

Dieses Dilemma zeigt sich in Abb. 1: Für einen einzigen Raum existieren unendlich viele Möglichkeiten der Modellierung durch Linienzüge. Ein Fußgänger kann den Raum beispielsweise auf der kürzest möglichen Strecke durchqueren (1), während sich eine andere Person annähernd an die Geometrie des Raumes hält und sich in der Mitte des Ganges bewegt (2). Eine dritte Person könnte etwa das Fenster ansteuern und am gleichen Weg wieder zur Tür zurückkehren, oder den Raum durch die andere Tür verlassen (3). Keine mögliche Modellierung des Raumes durch einen mathematischen Graphen kann alle geschilderten Bewegungskurven repräsentieren. Dies trifft in verstärktem Maße auf Gebäudeteile und ganze Liegenschaften zu.

Um Innenraumpositionierung betreiben zu können, ist es jedoch notwendig, die von Inertialsensoren stammenden Messdaten an einem digitalen Modell des Gebäudes abzugleichen. Daher verwendet das CADMS Gebäudemodelle als Grundlage für die grafische Darstellung und den Kartenabgleich. Räume und Flächen werden nicht durch Strecken, sondern durch die umschließenden Polygone repräsentiert. Diese sind durch spezielle Übergangsobjekte verbunden. Dadurch entsteht eine dreidimensionale Struktur [10], wie sie auch mit Hilfe der IFC modelliert werden kann [11]. Darauf lassen sich jedoch wiederum die herkömmlichen, aus dem Straßenverkehr stammenden Methoden des Kartenabgleichs nicht anwenden. Es ist daher notwendig, neue Formen des Map Mat-

chings zu entwickeln, die speziell auf die Anforderungen der Navigation in Gebäuden abzielen.

3 Neue Methoden des Kartenabgleichs

Für das CADMS wurden entsprechende Algorithmen entworfen und implementiert. Ihr Ziel ist es, die Ungenauigkeit der von Inertialsensoren stammenden Bewegungsdaten zu reduzieren und damit die unabhängige Innenraumpositionierung zu ermöglichen. Abb. 2 zeigt dazu den prinzipiellen Ablauf des Indoor-Map-Matchings.

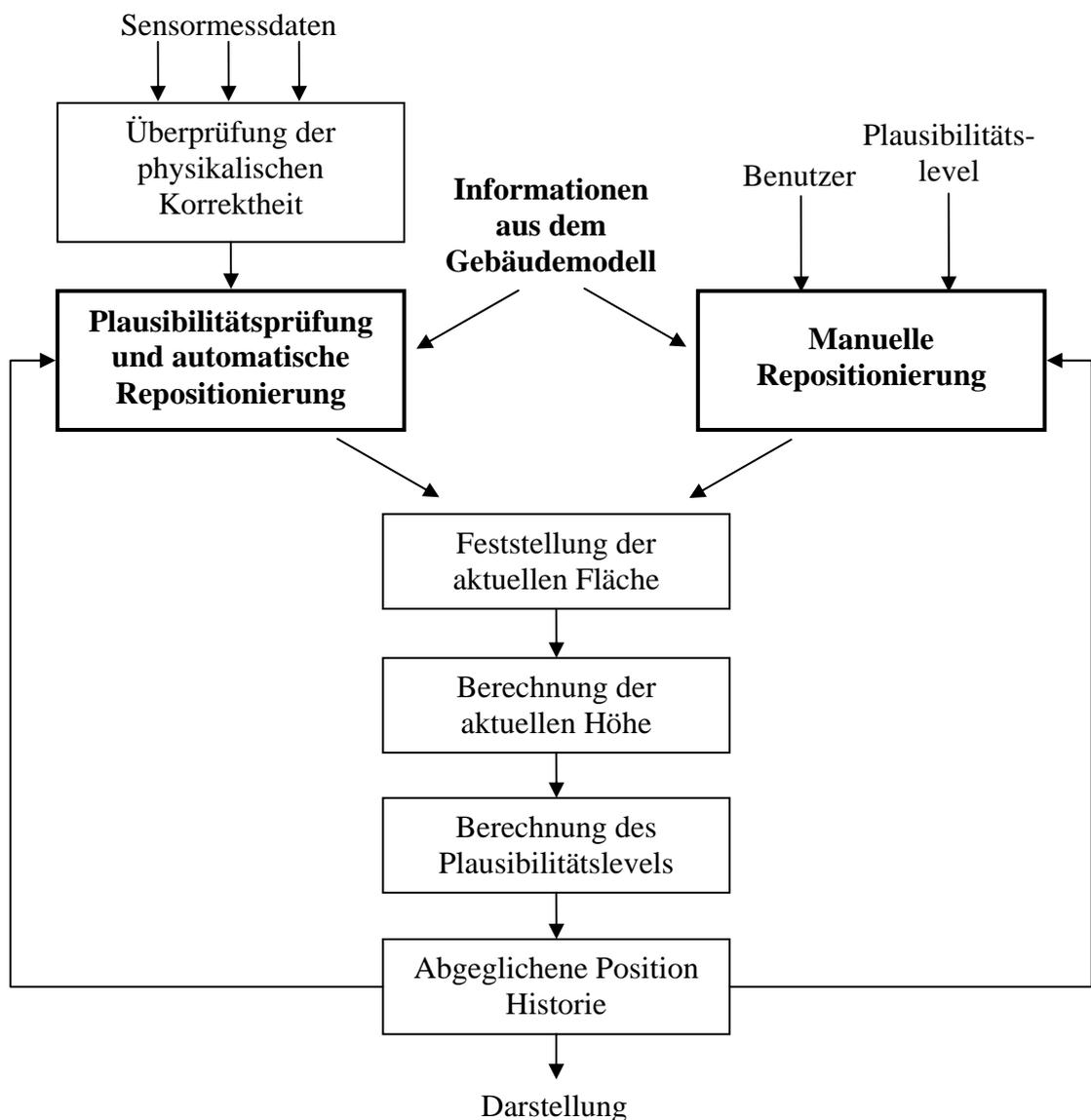


Abb. 2: Ablauf des Indoor-Map-Matchings.

Es werden periodisch Sensormessdaten, die Beschleunigungs- und Winkelmesswerte enthalten, erhoben. Diese werden zu Paketen zusammengefasst, für die jeweils eine doppelte numerische Integration über die Zeit durchgeführt wird. Daraus ergeben sich regelmäßig eintreffende neue Positionspunkte, die im weiteren Verlauf kontrolliert und gegebenenfalls korrigiert werden müssen.

Im ersten Schritt erfolgt die prinzipielle Überprüfung der physikalischen Korrektheit. Dabei wird beispielsweise miteinbezogen, dass sich die Geschwindigkeit von Personen in Gebäuden nur innerhalb eines definierten Bereiches bewegen kann. Physikalisch unmögliche Messwerte werden von der weiteren Verarbeitung ausgeschlossen.

Die Plausibilitätsüberprüfung und die daraufhin erfolgende automatische Repositionierung stellen die Kernkomponente des im CADMS implementierten Indoor-Map-Matchings dar. Jeder neu eintreffende Positionspunkt wird mit dem Gebäudemodell abgeglichen. Dabei kann es zu einer Veränderung seiner Koordinaten kommen. Das Wissen über die Struktur des Gebäudes stammt aus dem Gebäudemodell und wird für die Positionskorrektur verwendet. Je nach Beschaffenheit der Umgebung des aktuell bearbeiteten Positionspunktes können unterschiedliche Arten der automatischen Korrektur zur Anwendung kommen. So sieht das CAMDS u.a. explizit die Korrektur an Wänden und Außenwänden sowie an Türen und Treppen vor. Die automatische Korrektur erfolgt ohne Benutzerinteraktion. Dies hat den großen Vorteil, dass der Anwender in keinsten Weise von seinen eigentlichen Tätigkeiten abgelenkt wird und im Idealfall nichts von den Unzulänglichkeiten der physikalischen Sensormessdaten bemerkt.

Danach wird jedem Positionspunkt logisch eine Fläche zugeordnet. Dies ist nicht einfach, da auch die Höhenkoordinate beachtet werden muss und es möglich ist, dass sich in einem Gebäude mehrere Flächen – auch geneigte Flächen, z.B. Stiegen – übereinander befinden. Die Feststellung der aktuellen Fläche ist unabdingbar, um einen logischen Bezug zur aktuellen Position im Gebäude herzustellen. So kann es – je nach Einsatzszenario – beispielsweise sinnvoll sein, Informationen zur aktuell betretenen Fläche anzuzeigen.

Es folgt die Berechnung der momentanen, relativen Höhe im Gebäude. Übereinander liegende Flächen und geneigte Flächen schaffen Sonderfälle. Der Plausibilitätslevel repräsentiert einen Schätzwert für die Genauigkeit der Position im Gebäude, die dem Benutzer angezeigt wird. Müssen mehrmals hintereinander bestimmte automatische Korrekturmechanismen ausgeführt werden, deutet dies darauf hin, dass die zugrunde liegenden Sensormesswerte eine erhöhte Ungenauigkeit aufweisen. Dies kann den Plausibilitätslevel verringern.

Anschließend wird die auf diese Weise abgeglichene Position in eine Datenstruktur zur Speicherung des Verlaufs (*Historie*) eingefügt. Der Positionspunkt wird an (in Abb.2 nicht dargestellte) Module des CAMDS weitergegeben, die die Anzeige im grafischen Benutzerinterface veranlassen.

Während die automatische Repositionierung mit dem Einlangen neuer Sensormesswerte periodisch ausgeführt wird, löst sich die manuelle Repositionierung durch einen Eingriff des Benutzers oder das Fallen des Plausibilitätslevels unter einen definierten Schwellwert aus. In diesem Fall gibt der Benutzer dem CADMS Hinweise auf seinen aktuellen Aufenthaltsort. Dies geschieht möglichst anwenderfreundlich durch die Verwendung von Spracherkennung. Nichtsdestotrotz stellt diese Art der Repositionierung nur die zweite Wahl dar und wird nur dann verwendet, wenn die Sensormesswerte nicht mit den Mitteln der automatischen Korrektur verbessert werden können.

Das in Abb. 2 gezeigte Modul zur Plausibilitätsüberprüfung und automatischen Korrektur der physikalischen Sensormesswerte beinhaltet viele verschiedene Arten der Handhabung eintreffender Positionspunkte. Sie verwirklichen den lokalen Ansatz der Positionskorrektur ohne globales Wissen über die gesamte, gemessene Trajektorie. Auf Grund der Koordinaten des unkorrigierten Positionspunktes wird algorithmisch entschieden, welche Verfahren zur Positionskorrektur zur Anwendung kommen sollen.

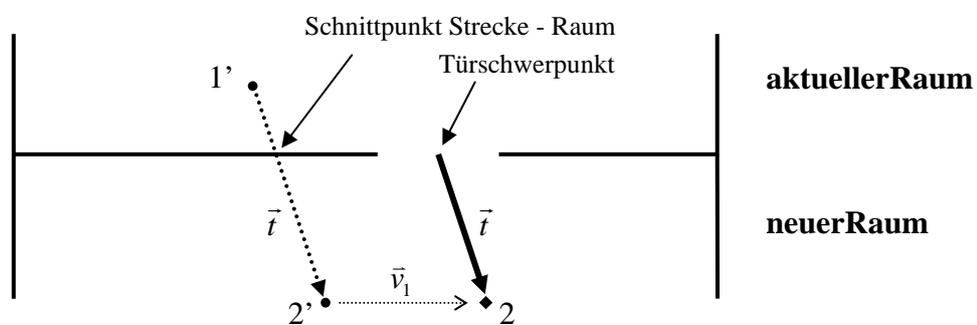


Abb. 3: Korrektur an Türen.

Abb. 3 zeigt ein Beispiel für ein automatisches Korrekturverfahren. Es kommt zur Anwendung, wenn die Bewegungskurve in der Nähe einer Tür eine Wand schneidet. Die maximale Distanz, ab der die Türkorrektur nicht mehr durchgeführt wird, ist definierbar. Ist die Distanz zu groß, werden andere Korrekturverfahren verwendet. Da die dargestellte gemessene Kurve nicht mit der Topologie des Gebäudes vereinbar ist und der aktuellste Messwert 2' daher keinen physikalisch möglichen Positionspunkt darstellt, werden die

Koordinaten von 2' geändert. Es wird versucht, den jüngsten Teil der Bewegungskurve in Richtung der betreffenden Tür zu verschieben. Dazu muss u.a. die Tür mit der geringsten Distanz zum Schnittpunkt gesucht werden. Weiters muss festgestellt werden, ob die Tür die Räume, die den Positionen 1' und 2' zugeordnet sind, verbindet. Andernfalls kann diese Tür nicht für die Türkorrektur herangezogen werden, was die Suche nach dem Türübergang mit der zweitgeringsten Distanz nach sich zieht.

\vec{t} stellt den Vektor vom Schnittpunkt Bewegungskurve – Wand zum neuesten Messpunkt 2' dar. Im Zuge der Türkorrektur wird dieser Vektor so verschoben, dass er am Schwerpunkt des zuvor ermittelten Türpolygons ansetzt. Seine Spitze markiert den Positionspunkt 2, der dem Benutzer angezeigt wird. Im skizzierten Beispiel kommt es somit durch die Durchführung der Türkorrektur zu einer Verschiebung der physikalisch ermittelten Position um den Vektor \vec{v}_1 .

Diese Art der automatischen Positionskorrektur ist vor allem für Türen mit nicht zu großer Breite effektiv. Diese werden von Fußgängern im Allgemeinen in der Nähe des Schwerpunktes des Türgrundrisses, also der „Türmitte“, passiert. Weiters müssen für die Türkorrektur noch einige Begleitumstände analysiert werden. So muss etwa \vec{t} in den neuen Raum passen, ohne andere Wände zu schneiden.

4 Qualitative Evaluierung

Dieses Kapitel soll die prinzipielle Funktionsfähigkeit des entworfenen Gebäudemodells und der entwickelten Algorithmen zum Indoor-Map-Matching zeigen. Dies geschieht anhand einer qualitativen Analyse eines Rundganges durch ein Gebäude, da sich der Ablauf der vorgenommenen automatischen Korrekturen daran am besten darstellen lässt.

Abb. 4 (links) zeigt den Grundrissplan des betreffenden Gebäudetraktes. Die darüber gelegten Punkte beruhen auf der doppelten Integration der Beschleunigungen sowie der Analyse des Winkels und repräsentieren die zurückgelegte Strecke des Fußgängers im Gebäude. Der Inertialsensor war am Fuß befestigt. Die Route führt über zwei Geschosse und wurde der Kürze wegen in einen einzigen Grundrissplan projiziert. Wie zu erkennen ist, weisen die Positionspunkte eine erhebliche Ungenauigkeit auf und folgen nicht dem Verlauf von Gängen, Stiegen etc. Betrachtet ein Mensch diese Kurve, kann der ungefähre Verlauf des Gebäuderundganges optisch annähernd nachvollzogen werden. Die computergestützte Auswertung dieser unkorrigierten Sensordaten ist jedoch nicht möglich, da die Positionspunkte oftmals – wenn nicht sogar zu einem Großteil – nicht den korrekten Räumen zugeordnet werden. Wird für die Innenraumpositionierung nicht unbedingt eine

Genauigkeit auf wenige Zentimeter gefordert, so muss doch der korrekte Raum, in dem sich der Benutzer gerade befindet, angezeigt werden können. Dies ist z.B. für das Finden von Vermissten im Einsatzfall besonders wichtig. Ohne Abgleich mit der Gebäudegeometrie ist dies nicht möglich.

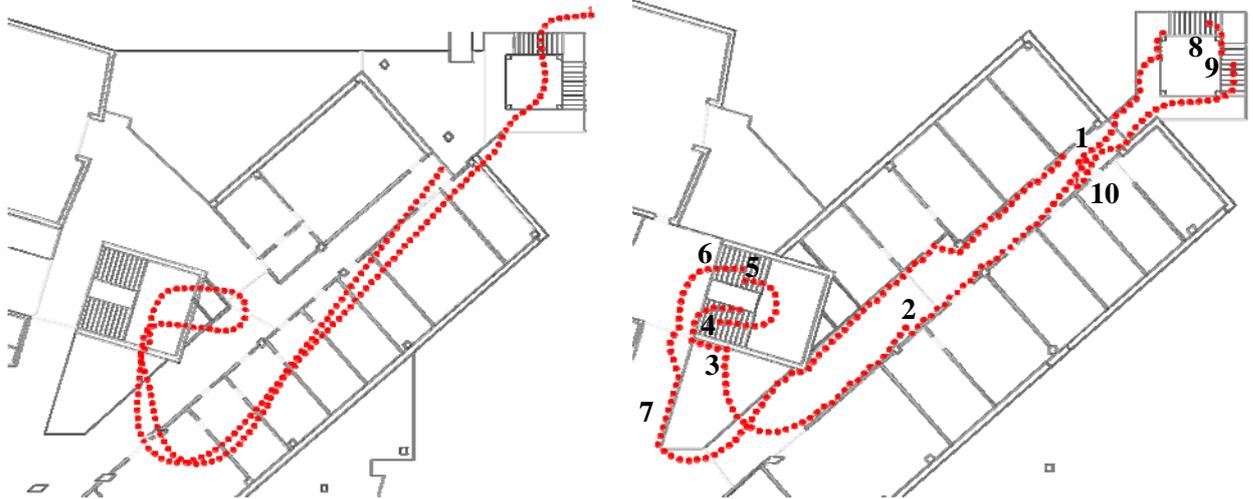


Abb. 4: Unkorrigierte Sensordaten und Ergebnis nach Anwendung des Indoor-Map-Matchings.

Wendet man hingegen das Indoor-Map-Matching an, können die Sensordaten deutlich verbessert werden. Abb. 4 (rechts) zeigt einen Screenshot aus dem CADMS, der die dem Benutzer präsentierten Positionspunkte enthält. Diese beruhen auf den gleichen physikalischen Daten wie im linken Teil der Abbildung.

Der Punkt 1 kennzeichnet den Startpunkt des Gebäuderundganges. Im Bereich von 2 weisen die Messwerte einen signifikanten Winkelfehler auf, wodurch die Bewegungskurve immer wieder die Wand schneidet. Dies kann durch die Wandkorrektur automatisch korrigiert werden, sodass die angezeigten Positionen dem Verlauf des Ganges folgen. Bei 3 nähert sich die Kurve von der falschen Seite dem Treppenhaus und wird an der Wand entlanggeführt. An den Stellen 4 und 5 werden Informationen über die aktuelle relative Höhe des Fußgängers und über die Struktur der Treppen dynamisch miteinander verknüpft. Als Resultat kann die Position auf der Stiege besser abgeschätzt werden. Dies geschieht durch Anwendung der Treppenkorrektur.

Bei 6 wird auf Grund der Höhenkoordinate und der Gebäudegeometrie ein Stockwerkswechsel erkannt. Das CADMS präsentiert dem Benutzer ohne weiteres Zutun den Stockwerksplan des darüber liegenden Geschosses. Die Messwerte werden im oberen

Geschoss durch Anwendung der Wandkorrektur am Geländer entlanggeführt (7). Bei 8 und 9 verbessert wiederum die Treppenkorrektur die Genauigkeit der Positionierungsergebnisse, während der Fußgänger wieder in das untere Stockwerk zurückkehrt. Schließlich endet der vom CADMS angezeigte Weg durch das Gebäude wunschgemäß in der Nähe des Startpunktes (10).

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die präsentierten Evaluierungsergebnisse zeigen, dass die Kombination statischer, alphanumerischer Gebäudedaten (Gebäudemodell) und dynamischer Sensordaten (Inertialsensoren) wesentlich zur Verbesserung der Genauigkeit der Innenraumpositionierung beitragen kann. Dazu bedarf es intelligenter Algorithmen zum Indoor-Map-Matching, die die Messwerte an die Geometrie des Gebäudes anpassen. Diese Algorithmen sind unabhängig von der Gebäudegeometrie, sowie von der Art des verwendeten Sensor-Subsystems und der Befestigung des Inertialsensors am Körper.

Die Ergebnisse zeigen, dass autonome, unterbrechungsfreie Navigation in Innenräumen prinzipiell möglich ist. Angesichts der stark beeinträchtigten, von Inertialsensoren stammenden Messwerte ist dies nicht selbstverständlich.

Als wesentlich für die Verbesserung der Positionierungsgenauigkeit erweist sich das Vorhandensein adäquater Gebäudemodelle. Die Struktur und der Informationsgehalt dieser Datenstrukturen sind genau definiert. Dies ist notwendig, um den korrekten Import in das CADMS sicherstellen zu können. Für die Erstellung dieser Daten bieten sich mehrere Möglichkeiten, z.B. Export aus CAFM-Applikationen oder Verwendung standardisierter IFC-Modelle. Nichtsdestotrotz muss ein Kompromiss zwischen dem Aufwand für das Einpflegen bzw. Bereitstellen der Gebäudedaten und einer erhöhten Positionierungsgenauigkeit eingegangen werden.

Die weitere Entwicklungsarbeit am CADMS betrifft die Verbesserung der Genauigkeit und der Benutzerschnittstelle. Dazu werden Tests mit Einsatzkräften durchgeführt.

Danksagung

Die Forschung und Entwicklung am Gebiet der Innenraumpositionierung wurde von den folgenden Unternehmen aus der Schweiz unterstützt: armasuisse, RUAG Electronics AG, Securitron AG, MIGROS und Gebäudeversicherung Bern. Weiters ist die Speedikon Facility Management AG aus Deutschland zu nennen.

Literaturverzeichnis

- [1] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins. *Global Positioning System (GPS). Theory and Practice*. 2001.
- [2] A. Wieser. *High-Sensitivity GNSS: The Trade-Off between Availability and Accuracy*. 3rd IAG/12th FIG Symposium, Baden. 2006.
- [3] H. Wang, H. Lenz, A. Szabo, J. Bamberger, and U. D. Hanebeck. *WLAN-Based Pedestrian Tracking Using Particle Filters and Low-cost MEMS Sensors*. 4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication WPNC'07. 2007. pp. 1–7.
- [4] T. Wießflecker. *Computer Aided Disaster Management. Ein Positionierungssystem für Innenräume*. Forum Bauinformatik 2007. pp. 283–292.
- [5] T. Wießflecker. *Kontext-sensitive Gebäudemodelle für das Katastrophenmanagement*. Forum Bauinformatik 2008. pp. 245–255.
- [6] D. Bernstein, and A. Kornhauser. *An Introduction to Map Matching for Personal Navigation Assistants*. New Jersey TIDE Center. 1996.
- [7] C. E. White, D. Bernstein, L. Alain, and A. Kornhauser. *Some Map Matching Algorithms for Personal Navigation Assistants*. Transportation Research Part C 8. 2008.
- [8] I. Konstantoulas, and P. Prastacos. *A Map Matching Algorithm for Car Navigation Systems with GPS Input*. Proceedings of the 10th International Conference on Geographic Information Science, Aalborg, Denmark. 2007.
- [9] M. Koichi, T. Tsutomu, and N. Shojiro. *A Map Matching Algorithm for Car Navigation Systems that Predict User Destination*. Proceedings of the 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications, Okinawa, Japan. 2008.
- [10] T. Wießflecker, T. Bernoulli, G. Glanzer, R. Schütz, and U. Walder. *Context-Adaptive Building Information for Disaster Management*. European Conference on Product and Process Modelling, Sophia Antipolis, France. 2008. pp. 351–361.
- [11] T. Liebich. *IFC 2x Edition 3 Documentation*.

Wartung und Instandhaltung im anlagentechnischen Brandschutz mittels Indoor-Navigation

Kai Marcus Stübbe

Technische Universität Darmstadt, Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, Petersenstraße 13, 64287 Darmstadt, Deutschland, E-mail: stuebbe@iib.tu-darmstadt.de, Telefon: +49(0)6151/166675

Kurzfassung

Komplexe Gebäude und Infrastruktureinrichtungen verfügen über zahlreiche technische Anlagen zur energetischen und stofflichen Versorgung. Darüber hinaus existieren Anlagen, welche dem Schutz des Gebäudes und seiner Nutzer dienen. Um die ordnungsgemäße Funktionsfähigkeit dieser Anlagen sicherzustellen, ist eine regelmäßige Prüfung unerlässlich. Im Bereich des anlagentechnischen Brandschutzes existieren verschiedene gesetzliche und normative Regelungen, welche Umfang und Häufigkeit der Prüfungen festlegen. Die Erfüllung dieser Vorgaben und deren Nachweis durch eine kontinuierliche Dokumentation liegen im Verantwortungsbereich des Betreibers. Das Aufsuchen der einzelnen Brandschutztechnischen Anlagen, die überall im Gebäude verteilt sind, ist jedoch sehr schwierig und zeitintensiv. Dies trifft insbesondere auf Mitarbeiter von externen Firmen zu, die die Gebäude nicht kennen.

Ziel der im Paper vorgestellten Arbeit ist die Entwicklung eines Ortungs- und Navigationssystems, welches die Orientierung von Einsatzkräften der Feuerwehr in komplexen Gebäuden verbessert und für Instandhaltungsaufgaben eingesetzt werden kann. Die Orientierung im Gebäude soll durch eine mobile Anwendung erleichtert werden, welche digitale Gebäudepläne bereitstellt und den Nutzer durch das Gebäude führt. Die Führungsfunktion wird durch die Darstellung möglicher Wege innerhalb des Gebäudes realisiert. Zur Positionsbestimmung werden verschiedene Technologien kombiniert und mit Hilfe einer neu entwickelten *Indoor-Navigations-Integrationsplattform (INI)* bereitgestellt. Die Berechnung der kürzesten Wartungsrouten wird mittels *Dijkstra-Algorithmus* und heuristischen Verfahren zur Lösung des *Traveling-Salesman-Problems* realisiert.

Stichworte

Wartung, Instandhaltung, Indoor-Navigation, Routenberechnung

1 Einleitung

Zur automatischen Branderkennung werden in großen Gebäudekomplexen hochsensible Brandmeldeanlagen (BMA) eingesetzt, doch obwohl die Rate der Fehlalarme dieser Sensoren sinkt, steigt die absolute Anzahl der Alarme stetig. Dies ist darauf zurück zu führen, dass die Anzahl der installierten Brandmelder zunimmt. Ein Großteil der Kapazitäten von Feuerwehren wird daher beansprucht, um ausgelöste Brandmelder aufzusuchen und nach der Brandursache zu forschen. Beispielsweise handelt es sich bei ca. 95% der etwa 5000 Feuerwehreinsätze pro Jahr auf dem Frankfurter Flughafen um Fehlalarme [1]. Ausgelöste Brandmelder müssen aufwendig anhand von Papierplänen aufgesucht werden. Dies erfordert viel Zeit, die im Ernstfall Menschenleben kosten kann. Im Falle eines Alarms müssen in sehr kurzer Zeit Gebäude geräumt und Einsatzkräfte koordiniert werden. Aus diesem Grund kommt der Wartung von Brandmeldeanlagen und der Führung von Einsatzkräften im Gebäude eine hohe Bedeutung zu.

Um Kosten einzusparen und Risiken auszulagern, werden zunehmend externe Dienstleister mit der Prüfung brandschutztechnischer Einrichtungen beauftragt. Gerade in komplexen Gebäuden, deren Geometrie durch Umbau und Erweiterungen häufig verändert wird, treten Orientierungsschwierigkeiten auf. Dies ist einerseits auf die fehlende Ortskenntnis der externen Mitarbeiter und andererseits auf die mangelnde Aktualität bereitgestellter Pläne zurückzuführen.

Eine am Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen entwickelte Indoor-Navigations-Integrationsplattform (INI) ermöglicht, verschiedene Techniken der Indoor-Navigation zu kombinieren, aus einem Building Information Model (BIM) navigationstaugliche Gebäudepläne zu generieren und auf mobilen Endgeräten darzustellen. Darüber hinaus können verschiedene Funktionalitäten der Plattform die Instandhaltung im anlagentechnischen Brandschutz sinnvoll ergänzen.

Am Beispiel des Flughafens Frankfurt ist eine Anwendung zum Prüfen technischer Brandschutzeinrichtungen entwickelt worden. Dazu wurden zunächst die bestehenden Prozesse sowie die gesetzlichen und normativen Regelungen analysiert. Um die Orientierung im Gebäude mithilfe digitaler Pläne zu unterstützen, wurde ein Routenvorschlag zur Durchführung der Prüfungen generiert und dargestellt.

In diesem Paper werden die Indoor-Navigations-Integrationsplattform, das Wartungsleitsystem und Verfahren zur Berechnung der kürzesten Wartungsrouten vorgestellt.

2 Indoor-Ortungstechniken

Ortungs- und Navigationssysteme sind im Outdoor-Bereich inzwischen weit verbreitet. Diese basieren in der Regel auf der Positionsbestimmung mittels *Global Positioning System* (GPS). Das Anwendungsszenario beinhaltet in diesem Fall die Ortung innerhalb von Gebäuden, in denen GPS-Signale nicht oder lediglich schlecht empfangbar sind. Gerade bei Betonwänden und besonders in Tiefgaragen ist selbst eine raumgenaue GPS-Ortung mit derzeit verfügbaren Empfängern nicht möglich [2].

Für die Indoor-Ortung wurden in den vergangenen Jahren zahlreiche Techniken entwickelt, die sich aufgrund ihrer spezifischen Ausrichtung nur für bestimmte Raumgrößen und Umgebungen eignen. Bisher ist keine mit GPS vergleichbare Technik entwickelt worden, die als Universalsystem im Indoor-Bereich eingesetzt werden kann.

In [3] und [4] werden die verschiedenen Ortungstechniken und deren Genauigkeiten analysiert und drei, für jeweils unterschiedliche Umgebungsbedingungen geeignete, Techniken ausgewählt.

Die Indoor-Navigations-Integrationsplattform (INI) ist am Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen entwickelt worden, um verschiedene Indoor-Ortungsmethoden unter weitgehender Nutzung der bereits vorhandenen technischen Gebäude-Infrastruktur in eine zentrale Navigationsplattform zu integrieren. Zudem ermöglicht diese das in der jeweiligen räumlichen Umgebung geeignete Verfahren bereitzustellen. In diesem Zusammenhang wurden die drei Ortungstechniken *WLAN*, *Ultra-Wide-Band (UWB)* und *RFID* exemplarisch ausgewählt (siehe Abb. 1).

Die INI ist darüber hinaus in der Lage auch die Instandhaltungs- und Wartungsprozesse von technischen Anlagen und Brandschutzeinrichtungen zu unterstützen und ist daher um ein Wartungsleitsystem erweitert worden. Dies wird im nächsten Kapitel dargestellt.

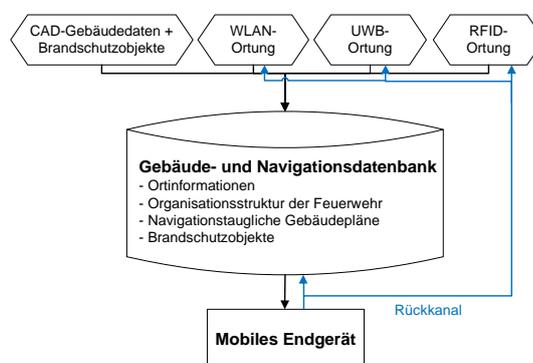


Abb. 1: Indoor-Navigations-Integrationsplattform.

3 Wartungsleitsystem

Der Instandhaltung von Brandmeldeanlagen kommt eine hohe Bedeutung zu. Instandhaltung ist nach DIN EN 13306 die Kombination aller technischer und administrativer Maßnahmen sowie das Management während des Lebenszyklus einer Betrachtungseinheit zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes oder der Rückführung in diesen, so dass die geforderte Funktion erfüllt werden kann.

Die Instandhaltung gliedert sich gemäß DIN 1051 in die Grundmaßnahmen Inspektion, Wartung, Instandsetzung und Verbesserung (siehe Abb. 2).

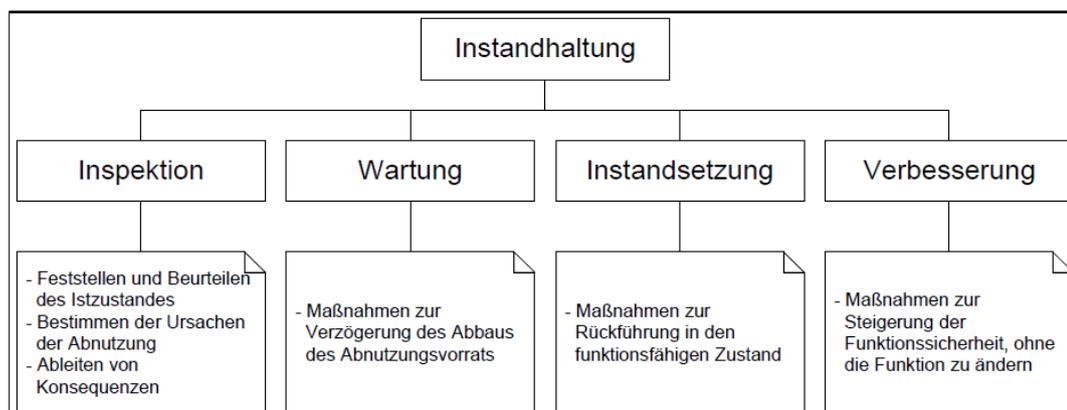


Abb. 2: Instandhaltung.

Nach DIN VDE 0833-1 sind viermal jährlich in etwa gleichen zeitlichen Abständen Inspektionen durchzuführen. Hierbei ist z. B. die Funktionsfähigkeit von Brandmeldern und der Brandmeldezentrale umfangreich zu prüfen. Die genauen Prüfvorgaben sind aus [5] zu entnehmen. Zusätzlich sind Prüfungen nach Technischer Prüfverordnung des Landes Hessen (TPrüfVO) zu den nachfolgenden Zeitpunkten durchführen zu lassen:

- Vor der ersten Inbetriebnahme der Anlage
- Unverzüglich nach einer wesentlichen Änderung der technischen Anlage
- In Abständen von maximal drei Jahren

Eine Überwachung der Inspektionen ist notwendig, da der Betreiber eines Gebäudes für die Durchführung der Prüfung verantwortlich ist, diese jedoch aus personellen Gründen meist nicht wahrnehmen kann. Stattdessen werden oft externe Dienstleister hiermit beauftragt. Mittels RFID-Technik ist es möglich, die tatsächliche Anwesenheit von

Personen, die die Inspektionen durchführen, am Wartungsobjekt zu überprüfen. Zur Durchführung der Inspektionsaufgaben müssen Servicemitarbeiter die einzelnen Brandschutzobjekte im Gebäude aufsuchen und die Inspektionsaufgaben durchführen. Gerade in komplexen Gebäuden wie Flughäfen, ist dies jedoch sehr zeitaufwändig, da vor allem Mitarbeiter externer Dienstleister nicht mit den örtlichen Gegebenheiten vertraut sind. Papierpläne, die derzeit zur Orientierung verwendet werden, stellen nur ein unzureichendes Hilfsmittel dar. Daher sind die Führung der Mitarbeiter und die Berechnung der kürzesten Inspektionsroute durch das Gebäude von entscheidender Bedeutung.

4 Traveling Salesman-Problem und Lösungsansätze

Ein Inspektionsauftrag umfasst die Prüfung von mehreren Instandhaltungsobjekten, die sich innerhalb eines Gebäudes befinden. Der Servicetechniker einer Fachfirma betritt das Gebäude über den Eingang, der normalerweise zugleich Start- und Endpunkt seines Rundgangs ist. Er muss die Bearbeitung in möglichst kurzer Zeit durchführen und benötigt daher einen Weg durch das Gebäude, der in seiner Gesamtlänge möglichst klein (kurz) ist. Dieses Optimierungsproblem kann auf das Traveling Salesman-Problem zurückgeführt werden.

Das Traveling Salesman-Problem gehört zu einem der am häufigsten untersuchten Probleme in der kombinatorischen Optimierung. Ein Handlungsreisender besucht auf seiner Rundreise n Städte und kehrt anschließend zum Ausgangspunkt seiner Reise zurück. In diesem Fall besteht das Optimierungsproblem darin, eine Rundreise zu finden, deren Gesamtlänge minimal ist (siehe Abb. 3).

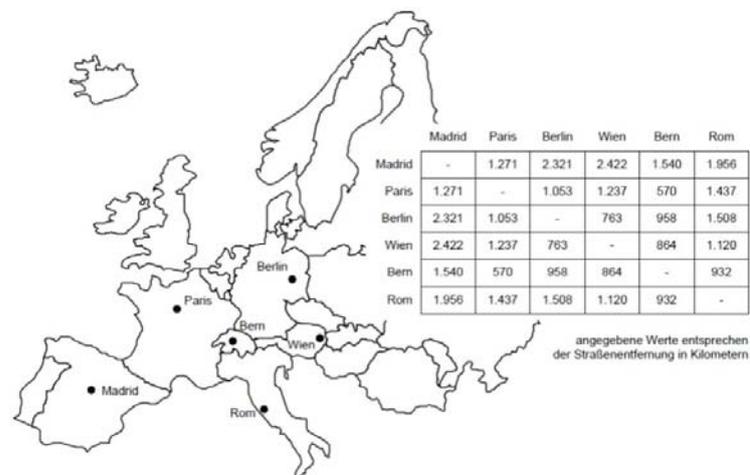


Abb. 3: Traveling Salesman-Problem [8].

Schon bei einer geringen Problemgröße ist die exakte Lösung des *Traveling Salesman-Problem*s mit hohem Rechenaufwand verbunden. Beispielsweise sind bei 16 Städten 653.837.184.000 Rundreisen möglich, was einer Rechenzeit eines handelsüblichen PCs von ca. 20 Jahren entspricht. Daher gibt es verschiedene Ansätze:

Exakte Verfahren: Bei exakten Verfahren sind der *Brute Force-Ansatz* (Ermittlung aller möglichen Rundreisen und Ermittlung ihrer Gesamtlänge) und das *Branch and Bound-Verfahren* (Zerlegung in Teilprobleme und Lösung dieser, anschließend Kombination der Lösungen der Teilprobleme, bis Gesamtlösung gefunden ist) zu nennen. Eine exakte Lösung ist jedoch aufgrund der Komplexität des Problems nicht möglich, besonders für Berechnungen auf mobilen Endgeräten, wie z. B. PDAs.

Heuristiken: Heuristiken werden eingesetzt, um in annehmbarer Rechenzeit eine akzeptable Lösung des Problems zu finden. Über die Qualität dieser Lösung kann jedoch bestenfalls eine Abschätzung erfolgen, da Heuristiken auch lokale Extrema beibehalten, wenn weitere Lösungen in der Umgebung als schlechter bewertet werden.

Heuristische Verfahren sind u. a. die *Nearest Neighbor-Heuristik* (in jedem Schritt wird jeweils der nächstgelegene Knoten gewählt, bis alle Knoten und der Ausgangsknoten wieder erreicht sind) und die *Nearest Insertion-Heuristik* (ausgehend von einer optimalen Tour einer Teilmenge, werden Knoten gesucht, die noch nicht besucht worden sind und der bestehenden Tour am nächsten sind).

Metaheuristiken: Metaheuristiken liefern in kurzer Zeit zuverlässig Lösungen und lassen im Gegensatz zu heuristischen Verfahren entsprechend festgelegter Regeln auch schlechtere Lösungen während der Laufzeit der Heuristik zu. Daher können lokale Extrema auch wieder verlassen werden. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass globale Extremum (die optimale Lösung) zu finden.

Zu den Metaheuristiken gehören *Genetische Algorithmen*, die *Tabu-Suche*, *Simulated Annealing* und *Ameisenalgorithmen*.

Genetische Algorithmen ahmen die Vererbung in der biologischen Evolution nach. Ausgehend von einer Anfangspopulation, welche eine Menge möglicher Lösungen repräsentiert, werden durch Kreuzung von je zwei Individuen Nachkommen erzeugt, die Eigenschaften beider Eltern enthalten. Durch Mutation entstehen zufällige Veränderungen der Eigenschaften. Schlecht an die Umgebung angepasste Individuen werden durch die natürliche Selektion aussortiert. Dieser Prozess wird solange wiederholt, bis ein definiertes Abbruchkriterium erfüllt ist oder eine feste Anzahl an Generationen erzeugt wurde.

Die *Tabu-Suche* berücksichtigt Verbesserungen aber auch geringe Verschlechterungen bei der Suche einer möglichst optimalen Lösung. Hierbei werden bereits betrachtete Lösungskandidaten nicht erneut betrachtet, dies wird durch Mitführen einer Running-Liste sowie einer *Tabu-Liste* ermöglicht [6].

Simulated Annealing ist stark an den Erhitzungsvorgang und kontrollierten Abkühlungsprozess in der Metallurgie angelehnt. Hierbei sollen Kristalle vergrößert und Defekte reduziert werden. Das Erhitzen bewegt die Atome dazu, ihre ursprüngliche Position zu verlassen und zufällig Ebenen höherer Energie aufzusuchen [7]. Das langsame Abkühlen kann neben der ursprünglichen Konfiguration auch zu neuen Anordnungen führen, die möglicherweise mit einer geringeren inneren Energie verbunden sind. Bei *Simulated Annealing* kann mittels einer Bewertungsfunktion über jedes Element eine Aussage darüber gemacht werden, wie gut die Lösung ist. Ziel ist es, das System von einem beliebigen Ausgangszustand in einen Zustand minimaler innerer Energie zu überführen. Hierbei wird bei jedem Schritt die Umgebung des aktuellen Lösungsvorschlags betrachtet und dabei geprüft, ob in der Umgebung ein anderer geeigneter Vorschlag ist, der ausgetauscht werden könnte. Hierbei ist die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Vorschlag ausgewählt wird, so gewählt, dass Zuständen geringerer Energie nachgegeben wird (siehe Abb. 4).



Abb. 4: *Simulated Annealing*.

Ameisenalgorithmen ahmen das Verhalten von Ameisen bei der Futtersuche nach. Ameisen sondern bei der Suche nach Futter ein Pheromon ab, welches andere Ameisen anzieht – hierdurch werden zurückgelegte Wege markiert.

Die *Simulated Annealing*-Heuristik überprüft ebenso, wie die Tabu-Suche, die Umgebung eines Wertes auf neue Lösungsmöglichkeiten. Die Heuristik lässt sich gut an das zugrunde liegende Problem anpassen und kann auch durch das Abbruchkriterium gut gesteuert werden [8].

Ameisenalgorithmen lassen sich ebenfalls gut an das Problem anpassen (Stärke der Pheromonspur und Wahrscheinlichkeit, mit der ein Weg eingeschlagen wird). Da der Implementierungsaufwand für Ameisenalgorithmen jedoch als wesentlich größer eingestuft wird, wurde in einem ersten Versuch entschieden, die *Simulated Annealing*-Heuristik zu implementieren.

5 Prototypische Implementierung des Wartungsleitsystems

Zur Berechnung der kürzesten Wartungsrouten innerhalb eines Gebäudes und damit zur Lösung des *Traveling Salesman*-Problems sind verschiedene Schritte notwendig, die nachfolgend dargestellt werden:

Lokalisierung des Instandhaltungsobjektes: Jedes Instandhaltungsobjekt ist mit einer Nummer eindeutig identifizierbar und verfügt über Koordinaten, mit denen seine Position im Gebäude eindeutig bestimmt werden kann. Über diese Koordinaten muss

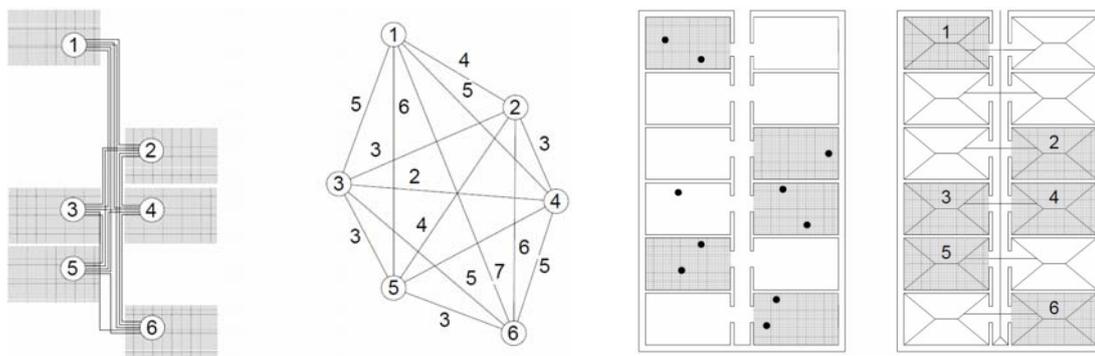


Abb. 6: a) Lokalisieren der Wartungsobjekte (links),
b) Ermitteln kürzester Wege zwischen Räumen (rechts) [8].

zunächst der Raum bestimmt werden, in dem sich das jeweilige Instandhaltungsobjekt befindet. Dieser Raum ist dann im Rahmen der Bearbeitung der Wartungsrouten aufzusuchen (siehe Abb. 6a).

Ermittlung der Raummittelpunkte: Das *Routing* (Wegberechnung) erfolgt auf Basis eines Routingnetzes, welches alle möglichen Wege im Gebäude enthält. Das Routingnetz ist ein Graph, der Kanten (mögliche Wegstücke) und Knoten (Start- und Endpunkte von Wegstücken) enthält. Die automatische Generierung von Routingnetzen ist in Rüppel und Stubbe [10] dargestellt. Das Hinführen zu einem Raum erfolgt durch die Angabe eines Weges von einem Ausgangspunkt zu einem Raummittelpunkt.

Ermittlung der kürzesten Wege zwischen einzelnen Räumen. Zwischen einzelnen Räumen der Wartungsrouten sind in der Regel keine direkten Wege in Form von Verbindungen durch eine einzelne Kante vorhanden. Stattdessen bestehen die Wege zwischen den Räumen aus vielen verschiedenen Kanten. Daher muss zunächst der kürzeste Weg zwischen jedem Raum der Wartungsrouten ermittelt werden (siehe Abb. 6b). Hierzu wird der *Dijkstra-Algorithmus* verwendet, der die kürzesten Wege von einem vorgegebenen Startpunkt zu allen Knoten im Netz ermöglicht.

Ermittlung einer Tour. Mit der Ermittlung der jeweils kürzesten Wege zwischen den Räumen ist die Grundlage geschaffen anhand dieser Entfernungen zwischen den Räumen das *Traveling Salesman-Problem* zu lösen und die kürzeste Route durch die optimale Kombination der Reihenfolge der zu besuchenden Räume zu ermitteln. Hierzu wird die in Kapitel 4 beschriebene *Simulated Annealing-Heuristik* verwendet, mit der zwar keine optimale Tour berechnet werden, jedoch eine möglichst gute Tour, die mit vertretbarem Zeit- und Rechenaufwand auf mobilen Endgeräten ermittelt werden kann.

Neben der reinen Ermittlung der kürzesten Wartungsrouten innerhalb eines Gebäudes verfügt die entwickelte Anwendung über Möglichkeiten, Wartungsaufträge zu generieren und abzuarbeiten. Die graphische Darstellung beruht auf einem Luftbild, auf das die Gebäudegrundrisse (extrahiert aus der Gebäude- und Navigationsdatenbank) gezeichnet werden, sodass sich Servicemitarbeiter auch anhand der Umgebung des Gebäudes orientieren können. Die zu wartenden und bereits gewarteten Objekte sind mit unterschiedlichen Symbolen dargestellt (siehe Abb. 7).

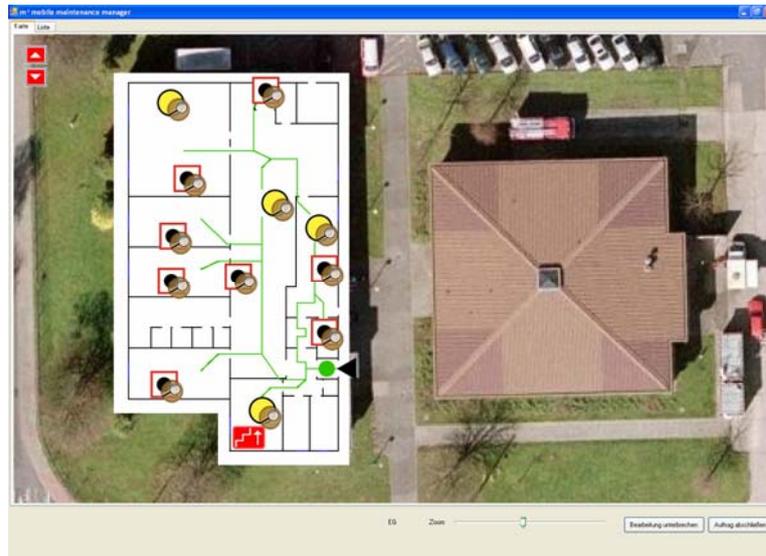


Abb. 7: Übersicht über eine Wartungsrouten vor der Inspektion.

6 Zusammenfassung

In diesem Paper wurden Methoden zur Ermittlung kürzester Wartungsrouten innerhalb von Gebäuden basierend auf Indoor-Ortung zur aktuellen Positionsbestimmung dargestellt. Zur Berechnung des Routenvorschlags wurden zunächst auf Grundlage von Routingnetzen die Weglängen zwischen den Mittelpunkten der einzelnen Räume der Wartungsobjekte mittels des Dijkstra-Algorithmus berechnet. Basierend auf diesen Berechnungen wurde die kürzeste Wartungsrouten zwischen den einzelnen Brandschutzobjekten berechnet. Dieses Optimierungsproblem lässt sich auf das Traveling-Salesman-Problem zurückführen, das mittels der Metaheuristik Simulated Annealing näherungsweise gelöst wird.

Ziel der Anwendung ist die Unterstützung der Prozessbeteiligten, insbesondere der Wartungstechniker, welche die Prüfung ausführen. Durch die Darstellung einer möglichen Route und der Position des Mitarbeiters wird die Orientierung im Gebäude erleichtert und der Arbeitsablauf bei Inspektionsprozessen erheblich verkürzt, da die Wegsuche entfällt. Aufgrund der beschriebenen Funktionalitäten ist die Verwendung von Papierplänen als Hilfsmittel zur Orientierung nicht mehr erforderlich.

Literaturverzeichnis

- [1] U. Rüppel, K.-C. Hahn, und K. Stübbe. *Gebäudeleitsystem. Digitale Feuerwehrlaufkarten mit aktiver Lenkung der Einsatzkräfte. Baurechts- und Brandschutzsymposium 2009.* [http://brandschutz.bureauveritas.de/symposium/symposium2009/2_vt/07_Vortrag Stübbe.pdf](http://brandschutz.bureauveritas.de/symposium/symposium2009/2_vt/07_Vortrag_Stübbe.pdf)
- [2] B. Eissfeller, A. Teuber, und P. Zucker. *Indoor-GPS. Ist der Satellitenempfang in Gebäuden möglich? ZfV 04 2008.*
- [3] U. Rüppel, K. Stübbe. *Context Sensitive Emergency-Navigation-System for Buildings. In: Proceedings of the 11th International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, Malta, 2007.*
- [4] U. Rüppel, K. Stübbe. *BIM Based Indoor-Emergency-Navigation-System for Complex Buildings. In: Tsinghua Science and Technology Journal, Vol. 13, 2008.*
- [5] DIN VDE 0833:2003. *Gefahrenmeldeanlagen für Brand, Einbruch und Überfall – Teil1: Allgemeine Festlegungen. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2003.*
- [6] I. Gerdes, F. Klawonn. *Evolutionäre Algorithmen. 2004.*
- [7] J. Hromkovic. *Theoretische Informatik, Berechenbarkeit, Komplexitätstheorie, Algorithmik, Kryptographie.*
- [8] D. Krause. *Wartung und Instandhaltung im anlagentechnischen Brandschutz mit Mobile Computing und RFID. Diplomarbeit am Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, TU Darmstadt. 2009.*
- [9] N.Boysen. *Ameisenalgorithmen. Universität Hamburg.* <http://www.ibl-unihh.de/ameisenalgorithmen.pdf>
- [10] U. Rüppel, K. Stübbe, *Supporting Fire Fighters during Rescue Missions by use of BIM and Indoor Navigation, In: Proceedings of EG-ICE Workshop, Berlin. 2009.*

Aspects of Interface Design for Energy Management in Buildings

Yue Wang, Paul Stack, Emmanuel Tumwesigye, Karsten Menzel

University College Cork, Civil and Environmental Engineering Department, Cork, Ireland, E-mail: yue.wang@student.ucc.ie, Phone +35321/4901931

Abstract

Energy management includes everything involved in planning, selection, installation and operation of an energy technology. An energy management platform will support integrated energy and environmental management for non-residential and residential buildings. The key to granting stakeholders access to actionable information is through generic graphical user interfaces (GUIs). The aim is to allow occupants, operators and owners of buildings to make effective and efficient decisions in respect of energy utilisation efficiency. These are the different user roles identified and form part of the integrated user interface application. The paper introduces an appropriate GUI design fulfilling these highlighted requirements.

Keywords

Building performance, Energy management, Graphical user interface, Stakeholder.

1 Introduction

Given the current energy awareness in our society, the responsibility of efficient use of energy resources is a core managerial objective within organisations. Therefore, methods that provide access to economical and building performance data and enable effective energy management are of high importance. The range of services involved include the preparation of energy management concepts for all areas of application, be it for industrial, commercial, residential or complex functional buildings. So far energy and environmental performance management systems for residential buildings do not really exist.

For non-residential buildings they consist of wired *Building Management Systems* (BMS) or ad-hoc integrated *Monitoring & Targeting Systems*. Given the current state of

proprietary BMSs, it is not cost effective and also not easily accessible, for the residential users to avail of new developments in technology for gaining an insight of their energy consumption habits. The *BuildWise project*, that involves researchers in University College Cork (UCC), supports buildings and facilities life cycle management [1]. The BuildWise project aims to specify, design, and validate a data management technology platform. However, the key to granting people access to this plethora of energy related data is to provide a generic form of GUI which presents building performance critical information in an easy to understand forms. The aim is to allow occupants, operators and owners of buildings to make effective and efficient decisions in respect of energy utilisation efficiency.

Building Energy Management Systems are now an established part of modern buildings, although their potential has yet to be realised in practice [2]. Developments in Information Technology (IT) have brought a new dimension to the methodology of building monitoring. Current sensing technology combined with computer networking communication systems provides remote monitoring capability of plant facilities to building managers and operators. The information from these sensors is displayed to the system users in a context that is easily interpreted and facilitates stakeholder decision making [3].

Modern managerial procedures require a high standard of accountability, especially with regard to expenditure [4]. Also, the consumption of fossil fuel must be optimised due to rising energy costs and CO₂ emissions [5]. The role of this research is to seek ways of utilising the monitored building data and satisfying the requirements of identified user roles.

2 User Interface Design

One of the mechanism through which users access a software application is referred to as the user interface [6]. The user interface to a software application consists of both hardware and software aspects. Hardware devices include a mouse, a keyboard and a monitor. But in the current trends of modern computing there is a shift towards the incorporation of mobile devices and touch-screens to better facilitate user interaction.

Inputs from users trigger an action and an application should respond in a controlled and predictive manner. This promotes the concept of user friendly applications. An ISO standard, ISO 13407:1999, was created to standardise human-centered design activities

[7]. It was called the *Human-centred Design Process for Interactive Systems* and details essential aspects such as visibility, accessibility, language and legibility.

The most important element of a user interface is the representation of data. Data must be presented clearly and unambiguously to leave the user in a state of mind that they can precisely interpret and trust what they see [8]. Early attempts at displaying energy consumption data involved the use of graphs to inform the user of trends within their building systems [9, 10].

With respect to data representation, there is also the ability to provide a deeper insight into the operations of the building plant through the proper use of graphical methods [11]. Tufte proposes a number of guidelines for graphs that depict building performance [12]. These include the use of a grey grid outline for graphs, labelling should be clear and helpful, maximum number of data series is six and font should be of the type *SansSerif*.

Modern applications now facilitate increased interactivity with the availability of WIMP (window, icon, menu, and pointing device) paradigm on screen based systems. This enables the organised layout of information elements. Multiple data streams can be viewed on a single screen to lessen user navigation issues. There are numerous other characteristics that exist in user interaction such as security, multi-user capabilities and network access in software solutions. Given these characteristics and guidelines for user interfaces, our research aims to incorporate these best practices to develop a user-centric platform for energy management.

3 Stakeholder Analysis

The essential component of any software application is the user requirements. Capturing user requirements defines the scenarios to which software must comply with and the stakeholders' roles that interact with the system. Stakeholders include any person or organisation that may be affected by the success or failure of the software [13]. With the use of *Unified Modelling Language (UML)*, scenarios can be described to support the design stage of the application.

The principle stakeholders defined in this research are outlined in fig.1 and their data requirements and roles are described below:

1. Building Owner
 - Review the overall energy consumption of building

- Review the overall energy consumption of particular organisation, individual person or plant
 - Generate bills and control cost
2. Building Operator
- View and analyse building performance data for a given zone/zones
 - Evaluate cumulative data to support operation and maintenance activities
 - Review the history of performance objects
3. Occupant/Tenant
- Able to submit a thermal comfort evaluation within his zone
 - View a relevant zone/room performance data

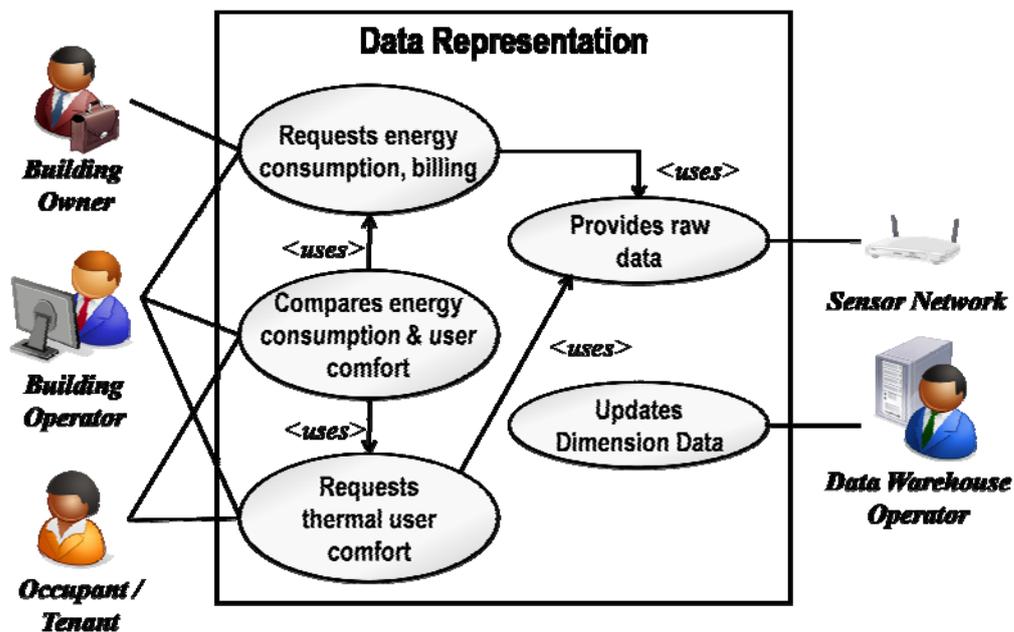


Fig. 1: Energy usage monitoring scenarios.

Other roles to support this system include:

- Sensor Network
 - Produces streams of data which is periodically sampled relative to its monitoring function
- Data Warehouse Operator

- Ensures the consistency and maintenance of the data management system. This data management system processes and archives the raw data to ensure data is available to the relevant stakeholders

The GUI has to support common software usability requirements, profiles for multiple users, security options that enable users to protect their information, appropriate feedback to the user within a reasonable response time and an easy menu structure so that the user can accomplish their tasks quickly. Essential qualities for user accessibility imply an easy and clear interface that allows users to learn to use the application fast. Due to compatibility issues with various types of display devices different screen layouts for desktop and mobile devices should be supported.

4 Architecture

The architecture provides a structure for the provision of context-based data to the relevant stakeholders. The proposed *Energy Management System-GUI* aims to provide easy access to the data collected from the facility. The platform for developing this system incorporates a number of software layers to provide layers of abstraction with the *Data Warehouse* as described in fig. 2.

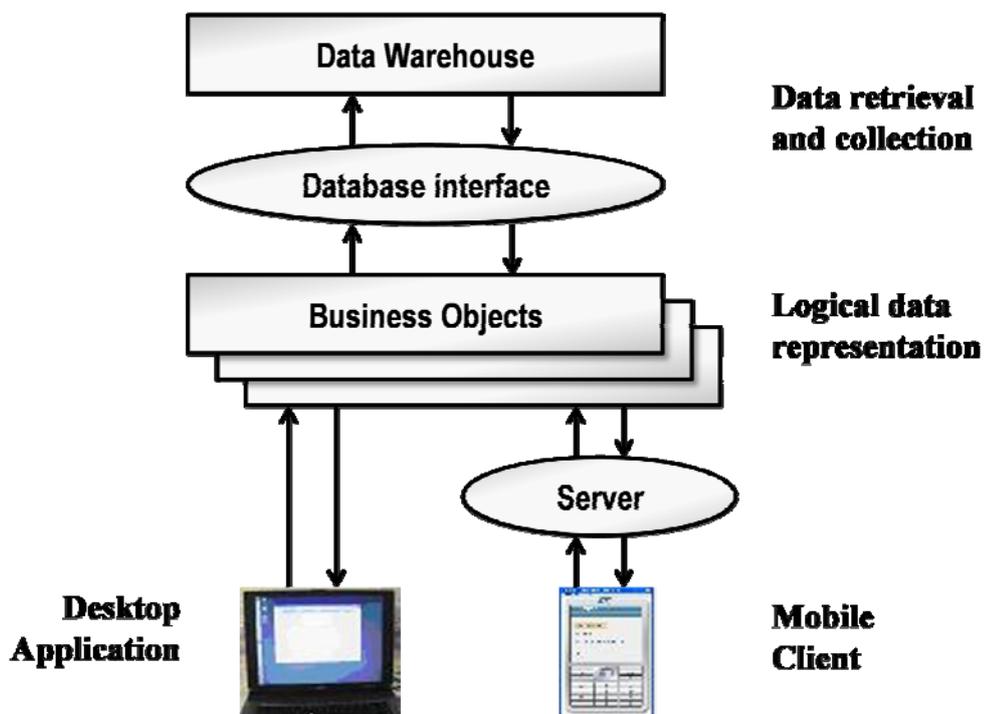


Fig. 2: GUI system architecture.

At the back of this GUI are core components that process and present data to the stakeholders. The main components are the Data Warehouse and business objects to provide context-dependant data. At the front end are mobile clients, desktop and web-based applications. Through this system architecture, a platform is created to support the various stakeholders accessing the system with different types of devices. For the purpose of this demonstrator, the focus is GUIs designed for a desktop. The next section is the representation of the building monitoring data to enable user interactivity through a generic set of user interfaces.

5 User Interface Demonstrator for Stakeholders

Based on the requirements gathered for the stakeholders in an energy management application and using the data access architecture, a demonstrator was created to present and test the set of GUIs to industry partners. The Environmental Research Institute (ERI) Building [14], owned by UCC, is used to as the test bed for BuildWise research. The data which is used by this demonstrator has been collected from a BMS installed in the building plus a wireless sensor network that is also part of BuildWise research.

The application is a Java-based Applet which provides users the ability to access the system via the Web. The initial screen is log in. This log in is setup for occupants of the ERI building and enables authorised and authenticated access to the data. Based on the log in user name, the system can load role-based and location-based information, setup for the stakeholders, from the Data Warehouse.

In the following sections, a more detailed description of the core screens for the three essential stakeholders is provided.

5.1 Occupant/Tenant GUI

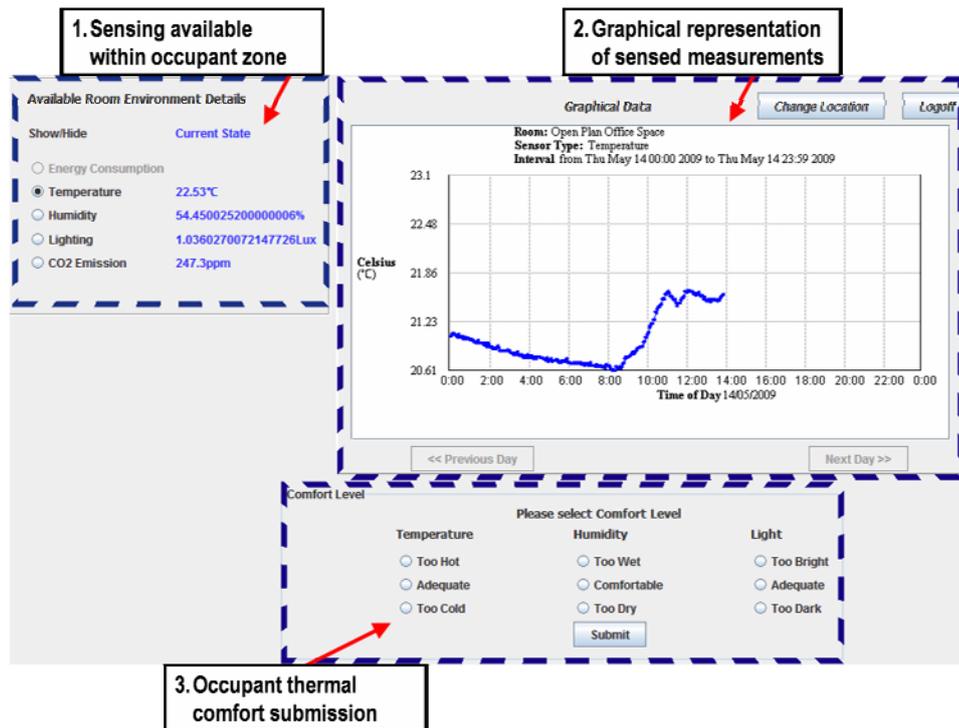


Fig. 3: Occupant/Tenant GUI showing the major information requirements for this role.

All members of staff within the ERI, who occupy a space within a zone, have been allocated access to the application as an occupant. This occupant user type shall be able to submit thermal comfort evaluation information to the system relating to the thermal conditions within their zone. This user shall also be able to view relevant information like temperature, humidity and energy consumption data relating to the zone that he/she occupies quickly and simply. Fig. 3 is the example of user interface that was developed to answer the occupant requirements.

The occupant GUI shows the details of the room environment which include the following elements:

1. The user can select one view of information from five room environment details which are energy consumption, temperature, humidity, lighting and CO₂ emissions if the relevant sensors exist in their zone. Current values are displayed.
2. Once the user selects the information he interests in viewing, for example temperature, a graph will be plotted indicating the current day room temperature changes as a plotted blue line.

- User feedback for comfort level evaluation from the occupant can select three levels of comfort from three categories which are temperature, humidity and light level. Based on this feedback a steady high level user comfort at a minimal energy consumption can be provided.

5.2 Building Operator GUI

The building operator shall solely be interested in the analysis of the performance data for a given zone/zones within the ERI building, for this purpose he shall have unlimited access to all data within the ERI building at any stage. He shall also be able to extrapolate and manipulate data contained within the database in order to accomplish more effective diagnosis of building operation problems, and to review the history of performance objects. Fig. 4 shows the GUI design relating to the building operator. The GUI should provide building operator as much detailed information as possible.

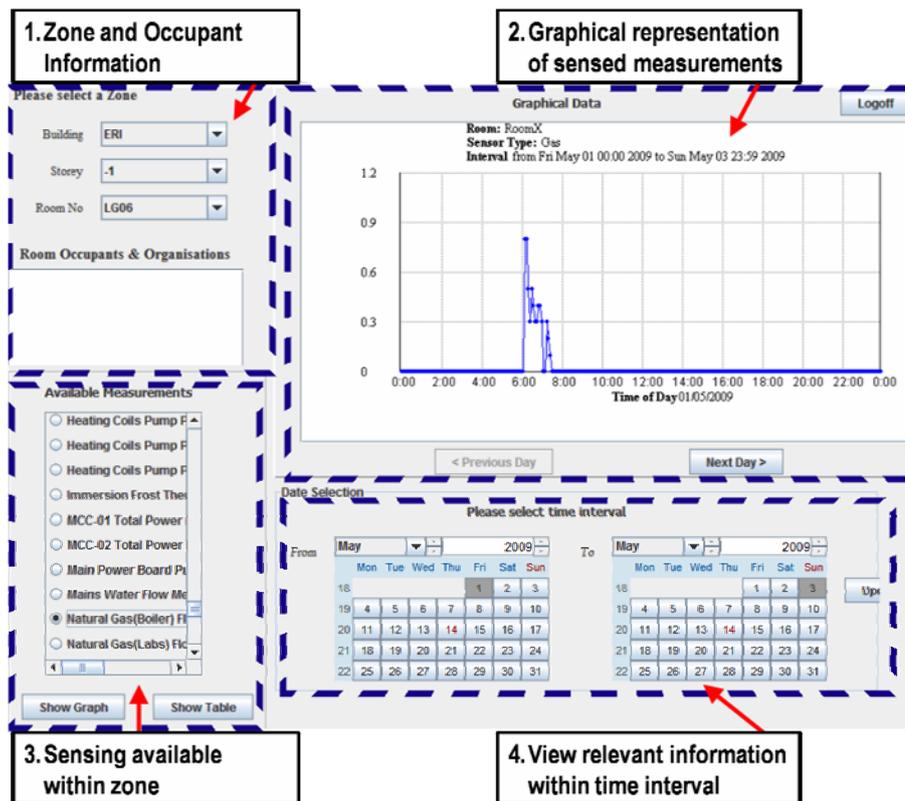


Fig. 4: Building operator GUI showing the major information requirements for this role.

The elements of the Building Operator GUI are described as follows:

1. Zone selection enables the building operator or facility manager to view zone conditions and the zone occupants. In the ERI, there are multiple types of zones including laboratories, meeting rooms and office space. With a two sets of solar panels and five air handling units residing on the roof and a boiler and heat pump within the facility, easy access to this data is critical for diagnosing plant operation levels.
2. A graphical representation provides the building operative with a visual representation of the sensed level of the selected object they want to monitor. It will be possible for facility manager to use this particular visual component of the application to assess whether a zone is operating efficiently or if there is a defect with one of the services in this particular area. The next and previous day buttons enable the user to view performance deviations from the normal operation levels.
3. Once a zone is selected in panel 1, the user is presented with a number of sensor, meter and actuator data streams that are available. The user selects an option they want to monitor and the graph is updated with the relevant information.
4. The date selection is a critical element for any building operator as it enables the user to view only relevant data from a defined number of days.

5.3 Building Operator GUI

The interest of the building owner is to overview the overall energy consumption of the building, as well as of individual tenants to control cost and create bills. A GUI was developed to show the building information and the interval of time which considers weekly, monthly, annually or multiple year intervals. One example is when the building owner selects the energy consumption of the ERI-Building, a bar chart will be displayed to show measured readings over a specific interval. Also, the billing which includes electricity, gas and water also will be calculated. Fig. 5 is the view that was designed to assist the owner.

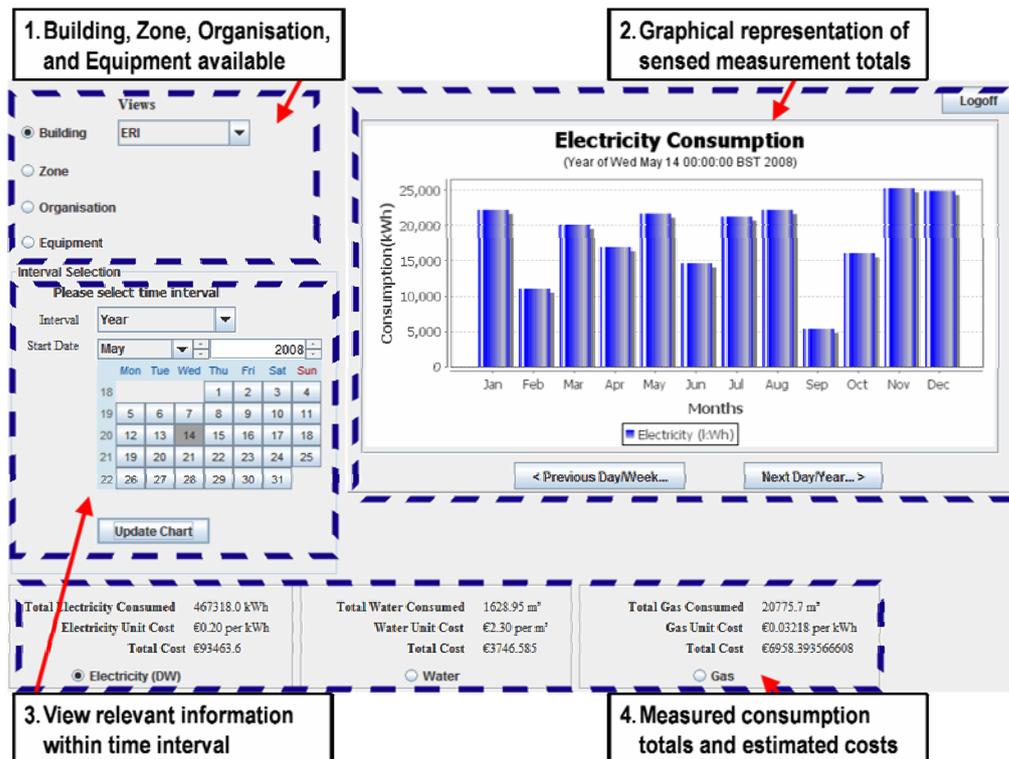


Fig. 5: Owner/Manager GUI showing the major information requirements for this role.

The following are a description of the main elements displayed on the building owner GUI:

1. The owner wants to monitor a particular type of object that includes the building within a campus or site, the zones within the selected building, equipment within the selected building, or information relating to organisations or individuals who rent space within the selected building.
2. Once a building or aspect within a building is selected, the bar chart is updated to display the selected objects data for a given interval and given a start date for the interval. Owners can observe abnormal usage of energy over a particular period and refine the search to see possible causes for excess energy consumption.
3. A building owners need to see accumulated data quickly using predefined intervals. This also enables managers to view auditable data which will be reviewed in major organisations. The intervals require an initial start date to determine the relevant interval. The graph is redrawn when the update chart button is clicked.
4. The final panel presents an example of the accumulated values for energy consumption. The main factors in the ERI are water, gas and electricity. The initial

value is a sum total, the second value is an average cost per unit of the resource to be consumed and the final value is a calculated total cost based on the first two values.

6 Evaluation on GUI application

The GUI is focused on three stakeholders: *Building Operator*, *Building Owner* and *Building Occupant*. The Building Operator interfaces enable informed decisions relating to the performance levels of equipment and zones in buildings. The Building Owner display, permit the review the overall energy consumption of the building. The Office Occupants user interface facilitates viewing of up to date information of their respective zones and submission of their thermal comfort state.

The system has been validated to make sure the information presented is accurate, reliable and optimised to satisfy user requirements. A questionnaire has been developed to capture industry feedback for further redevelopment of the GUIs.

7 Results and Future Work

This paper describes a process of building an integrated facilities management GUI. The user interfaces are not only for information views but also provide a mechanism for occupant feedbacks. The GUIs are specified for the roles identified but also for the attendant hardware requirements and limitations. The GUI support energy managers to utilise building resources more efficiently and cost-effectively as well as integrating the building occupant to allow him/her to be more environmentally-aware in their building resources usage.

In the next few months meetings with BuildWise industry partners is planned to attain some expert feedback from users from different domains including facility management, BMS developers and building services engineering. Based on this information, a more complete set of requirement will be achieved and the aim is to incorporate these in the existing demonstrator to achieve a more complete system.

Bibliography

- [1] BuildWise. <http://www.zuse.ucc.ie/buildwise>
- [2] G. J. Levermore. *Building Energy Management Systems – Applications to Low-Energy HVAC and Natural Ventilation Control*. 1999.
- [3] K. Menzel, D. Pesch, B. O’Flynn, M. Keane, and C. O’Mathuna. *Towards a Wireless Sensor Platform for Energy Efficient Building Operation*. *12th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, Beijing*. 2008.
- [4] B. L. Capehart, W. Turner, and W. J. Kennedy. *Guide to Energy Management*. 2005.
- [5] K. J. Moss. *Energy Management in Buildings*. 2006.
- [6] R. B’Far. *Mobile Computing Principles: Designing and Developing Mobile Applications with UML and XML*. 2004.
- [7] ISO 13407 Model: *Human-centred Design Processes for Interactive Systems*. <http://zonecours.hec.ca/documents/A2007-1-1395534.NormeISO13407.pdf>
- [8] J. O’Donnell. *Specification of Optimum Holistic Building Environmental and Energy Performance Information to Support Informed Decision Making*, PhD Thesis, UCC. 2009.
- [9] J. Haberl, R. Sparks, and C. Culp. *Exploring New Techniques for Displaying Complex Building Energy Consumption Data*. In: *Energy and Buildings*, 24 (1). 1996. pp. 27–38.
- [10] L. Prazeres and J. A. Clarke. *Communicating Building Simulation Outputs to Users*. In: *Proceedings of Building Simulation 2003, IBPSA, Eindhoven, Netherlands*. 2003.
- [11] J. W. Tukey. *Exploratory Data Analysis*. 1977.
- [12] E. Tufte. *The Visual Display of Quantitative Information*. 2001.
- [13] M. Marinilli. *Professional Java User Interfaces*. 2006.
- [14] ERI. <http://www.ucc.ie/en/ERI>

BIM goes Gaming

Integration von Building Information Modeling in virtuelle Spieleumgebungen

Kristian Schatz

Universität Darmstadt, Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, E-Mail: schatz@iib.tu-darmstadt.de, Tel. +49(0)6151/166745

Kurzfassung

Auf den ersten Blick gibt es kaum Gemeinsamkeiten zwischen einem Bauplanungsprozess und der Produktion eines Computerspiels. Die Projektteams sind in unterschiedlichen Welten zu Hause: Während die einen direkten Bezug zur realen Welt mit ihren Gesetzmäßigkeiten haben, erschaffen die anderen virtuelle, fiktive Welten mit eigenen Gesetzen. Dies ändert sich, sobald Computerspiele eingesetzt werden, um durch spielerische Handlungen Wissen zu vermitteln und Reaktionen anzutrainieren, welche der Spieler für die Bewältigung der an ihn in der realen Welt gestellten Aufgaben heranziehen kann. Man spricht dann von *Serious Gaming*. Um die Trainingsziele zu erreichen, ist es wichtig, dass die Eindrücke aus der virtuellen Welt denen der realen möglichst nahe kommen. In diesem Paper wird der Aufbau einer *BIM-Game-Plattform* beschrieben, welche mit Hilfe von *BIM (Building Information Modeling)-Gebäuedaten* direkt in eine virtuelle Spieleumgebung integriert wird. Damit ist es unter anderem möglich, typische Einsatzszenarien im Katastrophenschutz in einem Computerspiel zu simulieren und Einsatzkräfte zu trainieren. Darüber hinaus kann eine entsprechende Plattform helfen, Sicherheitsrisiken schon im frühen Planungsstadium besser einzuschätzen und so Planungsfehler zu vermeiden.

Stichworte

BIM, Serious Gaming, Virtuelle Realität, Immersion

1 Einleitung

1.1 Motivation

Durch eine veränderte Sicherheitslage kommt, zusätzlich zu bestehenden Risiken wie Naturkatastrophen oder Brände, noch eine permanente Terrorbedrohung hinzu. Ereignisse wie der 11. September 2001 und nachfolgend jährliche Anschläge mit Hunderten von Opfern (z.B. London 2005, Mumbai 2008) haben gezeigt, dass Sicherheits- und Rettungskräfte vor immer neuen Herausforderungen stehen. Besonders gefährdet sind komplexe Gebäude mit hohem Publikumsverkehr wie Flughäfen und Bahnhöfe. Für ein schnelles und sicheres Eingreifen müssen Einsatzkräfte in die Lage versetzt werden, sich innerhalb kürzester Zeit am Einsatzort zu orientieren und sich einen Überblick über die Lage zu verschaffen. Nur so können Strategien für die weitere Vorgehensweise entwickelt werden. Dies erfordert ein regelmäßiges Training entsprechender Einsatzsituationen. Vor allem in komplexen Gebäuden ist ein Training im realen Objekt sehr aufwendig und aus Sicherheitsgründen unter realistischen Bedingungen nicht durchführbar.

Mit der Verfügbarkeit leistungsfähiger virtueller Umgebungen im Sinne eines immersiven Systems – wie das *Darmstadt Civil, Environmental and Safety Engineering Lab (DACES-Lab)*, welches am Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen der TU Darmstadt (IIB) aufgebaut wurde – ergeben sich neue Möglichkeiten, virtuelle gebäudebezogene Katastrophenszenarien (i.d.R. Feuer, Rauch, Explosionen und Teileinstürze) in einem Computerspiel auf Personen in einer neuen Qualität einwirken zu lassen. Durch die Immersion soll das Erleben der Präsenz im Computerspiel verbessert werden. Wie in diesem Paper beschrieben, soll hierzu eine BIM-Game-Plattform entwickelt werden, welche CAD-gestütztes Building Information Modeling (BIM) in eine Game-Engine integriert um daraus Spiel-Einsatzszenarien generieren zu können. Diese Einsatzszenarien können in virtueller Realität unter anderem von Einsatzkräften zu Trainingszwecken durchgespielt werden.

1.2 Definitionen

Für ein besseres Verständnis der Thematik werden zu Beginn die beiden Begriffe *Serious Gaming* und *Virtuelle Realität* etwas näher erläutert:

Serious Gaming ist der Einsatz von Computer- und Videospielen in „ernsthaften Anwendungsbereichen“. Dies können Aus- oder Weiterbildungszwecke in unterschiedlichsten Bereichen, z.B. in der Pilotenausbildung sein. Auch der geplante Einsatz der BIM-Game-Plattform für die Ausbildung der Feuerwehr wäre ein „ernsthafter Anwendungsbereich“. Neben der Wissensvermittlung bleibt aber auch der Unterhaltungsaspekt ein wichtiger Bestandteil: In Computerspielen sind die Spieler aktive und kreative Akteure in einer virtuellen Realität. Der Spieler ist von den virtuellen Szenarien direkt betroffen und kann Handlungsabläufe beeinflussen. Durch diese spielerischen Handlungen lassen sich Wissen vermitteln und Reaktionen antrainieren, welche der Spieler in der realen Welt für die Bewältigung der an ihn gestellten Aufgaben heranziehen kann.

Als *virtuelle Realität* wird die Darstellung und Wahrnehmung der Wirklichkeit und ihrer physikalischen Eigenschaften in einer immersiven Umgebung bezeichnet. Durch die Immersion, das „Eintauchen“ in die künstliche Welt, die in der Regel durch 3-D-Darstellung, realistische Surround-Sound-Effekte, Interaktivität und dynamisches Tracking der Benutzer unterstützt wird, soll das Erleben der Präsenz in der virtuellen Umgebung verbessert werden. Für die 3-D-Darstellung werden spezielle Ausgabegeräte wie z.B. Head Mounted-Displays oder Großbildleinwände eingesetzt. Stereoprojektionen, bei denen zwei Bilder für die unterschiedlichen Perspektiven des rechten und linken Auges erzeugt werden, vermitteln einen räumlichen Eindruck. Für die Interaktion mit der virtuellen Welt werden spezielle Eingabegeräte wie „Spacemouse“ oder „Flystick“ eingesetzt. Dynamische Tracking-Systeme dienen zur Positionserfassung von Objekten der realen Welt. Neben den Hardware-Komponenten benötigt man zur Erzeugung virtueller Realität spezielle Software. Diese Programme müssen vor allem in der Lage sein, die dreidimensionalen Szenarien zu berechnen und mit mindestens 60 Bildern pro Sekunde an die Hardware ausgeben zu können, um Übelkeit („Cybersickness“) zu vermeiden.

1.3 Vorgehensweise

Die in diesem Paper beschriebene BIM-Game-Plattform verbindet, in einem neuen, innovativen Ansatz, Erkenntnisse aus verschiedenen Bereichen der Informationstechnologie. Zu nennen sind hier Building Information Modeling (BIM), Serious Gaming und Virtuelle Realität. Hierzu wurde zuerst der Bauplanungsprozess der Spiele-Produktion gegenübergestellt, um die eingesetzten Software-Werkzeuge zu

vergleichen und um Schnittstellen für eine Datenübergabe zu identifizieren. Danach wurden unterschiedliche Game- und Grafik-Engines auf ihre Möglichkeiten untersucht, BIM-Daten zu importieren und für die Visualisierung in Computerspielen aufzubereiten. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird dann das Konzept der BIM-Game-Plattform erläutert und Anwendungsgebiete aufgezeigt.

2 Der Bauplanungsprozess

Um geeignete Schnittstellen für eine Datenübergabe zwischen BIM-Anwendungen und der BIM-Game-Plattform zu identifizieren, wurde zuerst der Bauplanungsprozess mit den beteiligten Akteuren und der eingesetzten Software analysiert, was im folgenden Kapitel beschrieben wird.

2.1 Vernetzt-kooperative Ingenieurplanung

An einem Bauplanungsprozess sind eine Vielzahl von Akteuren beteiligt, in der Regel Bauherr, Architekt, Fachingenieure, Bauverwaltung, Baufirmen und die Betreiber. Die Anzahl der beteiligten Personen kann je nach Komplexität des Gebäudes sehr stark variieren. Während des Bauplanungsprozesses müssen viele unterschiedliche Fachinformationen zwischen den Akteuren ausgetauscht werden. Aus diesem Grund kommt der Koordination und dem Informationsaustausch eine große Bedeutung zu. Dies wird als *vernetzt-kooperative Ingenieurplanung* verstanden, was die fachtechnische Kooperation in Computernetzen bezeichnet, die software-gestützte Koordinationsmechanismen unterschiedlicher Automatisierung und Granularität in Bezug auf die Prozesse und Modelle beinhaltet [1].

Um einen *vernetzt-kooperativen Planungsprozess* effizient Gestalten zu können, sind verteilte Produktmodelle erforderlich [2]. Dabei werden alle relevanten Gebäudedaten mit IT-Unterstützung in verschiedenen Fachmodellen verarbeitet und zu einem virtuellen Gesamtmodell zusammengeführt. Dies ermöglicht effizienten Datenaustausch zwischen den Beteiligten.

1.2.1 Building Information Modeling (BIM)

BIM ist der Prozess des Generierens, Verwaltens und Benutzens von Gebäudedaten während des Gebäudelebenszyklus [3] und stellt eine Methode *der vernetzt-kooperativen*

Ingenieurplanung dar. Dabei kommen moderne CAD-Systeme zum Einsatz, mit denen objektorientiert oder modellorientiert am virtuellen, meist dreidimensionalen Gebäudemodell gearbeitet werden kann [4]. Es wird nicht mehr mit Linien, sondern mit Objekten geplant, aus denen später ein Gebäude bestehen wird. Marktführende Softwarehersteller wie Autodesk [5] oder Bentley [6] unterstützen BIM in ihren CAD-Software-Lösungen der neuesten Generation.

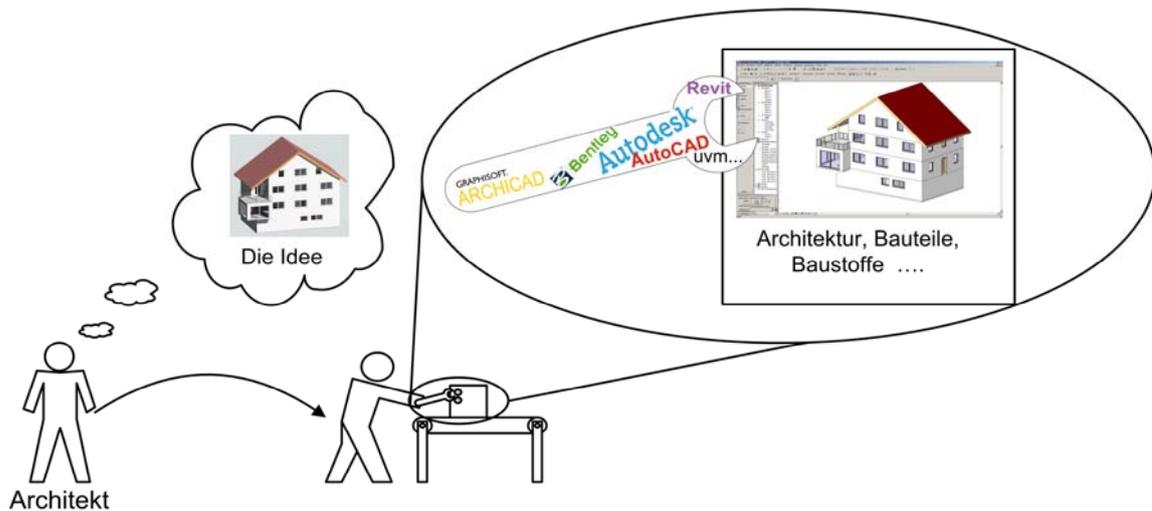


Abb. 1: Von der Idee zum Architekturmodell.

Grundlage der verteilten Produktmodelle ist in der Regel das Architekturmodell, welches von einem Architekt erstellt wird. Neben der Konstruktion kann das Architekturmodell auch Informationen zu gestalterischen Aspekten wie verwendete Materialien, Farben usw. beinhalten.

BIM stellt sicher, dass CAD-Daten nur einmal erfasst werden und dann unabhängig vom eingesetzten Software-Programm ohne Datenverlust zwischen den Projektbeteiligten ausgetauscht und von weiteren Ingenieur-Anwendungen weiterverarbeitet werden können. Dies hilft Redundanzen zu vermeiden und die aktuellen Daten schnell den unterschiedlichen Fachplanern zur Verfügung zu stellen. Außerdem ist es möglich, Normen, Vorschriften, Richtlinien und technische Regelwerke zu berücksichtigen.

Um dies zu Gewährleisten und BIM effektiv einsetzen zu können, ist es nötig, dass die Projektbeteiligten die Daten nach einheitlichen Regeln fehler- und verlustfrei austauschen können. Aus diesem Grund unterstützen viele Software-Hersteller neben den proprietären Datenformaten auch offene Standards wie die *Industry Foundation Classes* (IFC) oder *Green Building XML* (gbXML) in ihren Produkten an.

1.2.2 Industry Foundation Classes (IFC)

Die *Industry Foundation Classes* (IFC) wurden von der *Industriellianz für Interoperabilität e.V.* (IAI) entwickelt und werden von ihr kontinuierlich überarbeitet. Sie stellen ein Objektmodell für die Beschreibung eines Bauwerks während des kompletten Lebenszyklus dar. Als Standard (ISO 16739) werden die *Industrial Foundation Classes* (IFC) mittlerweile als Schnittstelle zwischen verteilten Produktmodellen von einer Vielzahl von Programmen unterstützt und stellen damit eine einheitliche Grundlage für den Datenaustausch im Bauwesen dar.

IFC ist keine reine 3-D-Schnittstelle, da sie auf Bauobjekten wie Wänden, Decken, Türen, Fenster etc. basiert. Zusätzlich zu der 3-D-Geometrie können noch weitere Parameter wie logische Gebäudestrukturen (z.B. die Beziehung Wand-Öffnungs-Fenster), Materialien, Kostenansätze, Raumflächen, Projektinformationen usw. abgebildet werden.

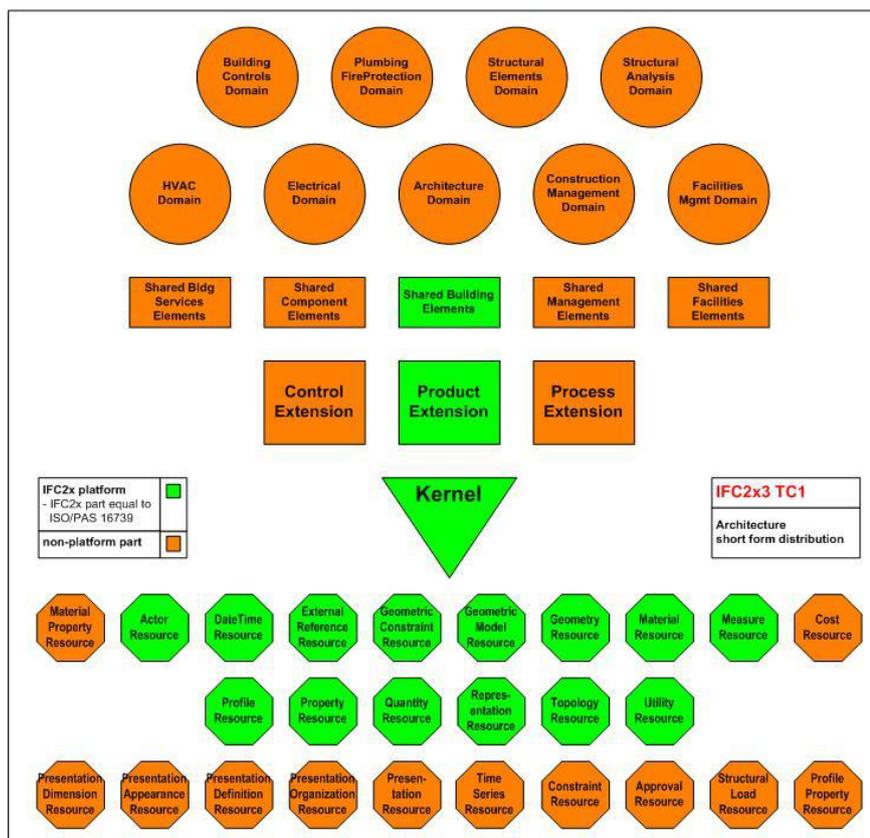
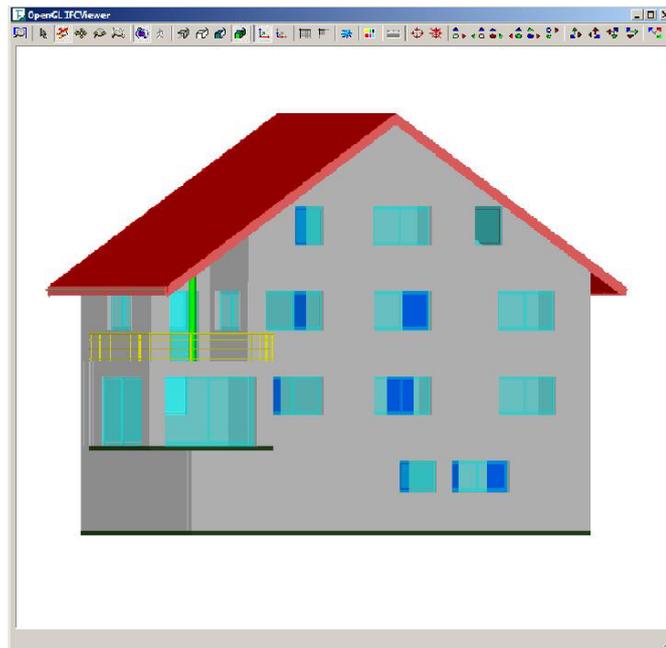


Abb. 2: IFC 2x Plattform [7].



3-D-Gebäudemodell aus IFC in IfcStoreyView [8].

Wie man Abb. 2 entnehmen kann, ist die IFC-Schnittstelle modular aufgebaut. Es existieren unter anderem Elemente zur Beschreibung der Geometrie (*Geometric Model Resource*, *Geometry Resource*) und von Materialien (*Material Resource*). Abb. 3 zeigt die 3-D-Visualisierung eines Gebäudemodells, welches aus Autodesk „Revit“ in das IFC2x3-Datenformat exportiert und in *IfcStoreyView* geladen wurde.

Abb. 4 zeigt als Beispiel die Selektion einer Wand aus dem Gebäudemodell. Die Auswertungen in *IfcStoreyView* zeigen, dass alle wichtigen Objekt-Eigenschaften wie Lage, Abmessungen, Material und Beziehungen zwischen den Bauteilen im IFC-Datenformat vorhanden sind.

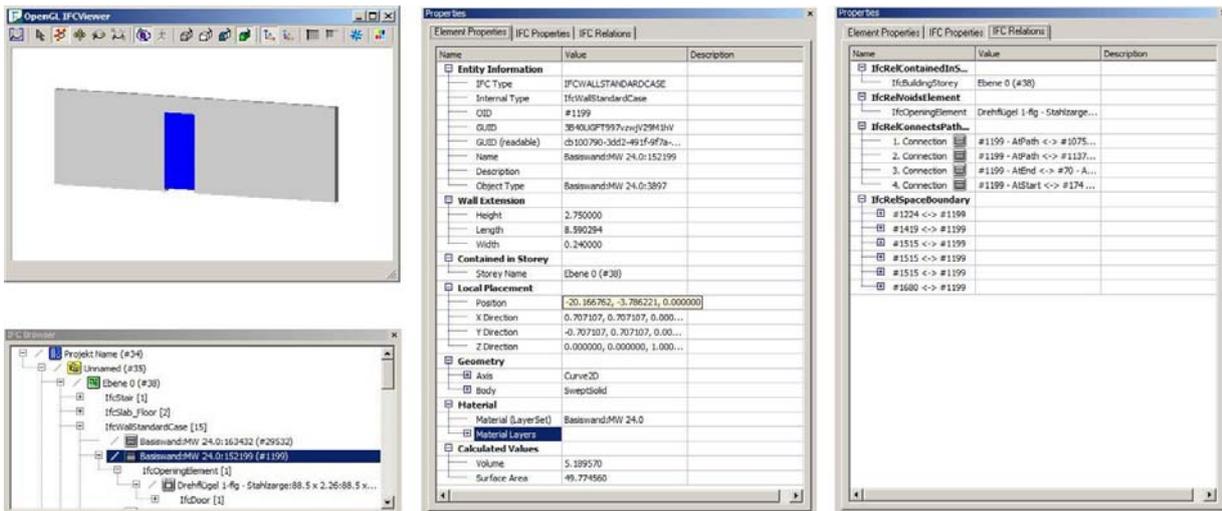


Abb. 4: Objekt-Eigenschaften in IFC.

Damit existiert mit der IFC-Schnittstelle eine herstellerunabhängige Schnittstelle, welche in einem standardisierten Datenformat alle, für die Visualisierung in einem Computerspiel erforderlichen Gebäudemodellinformationen bereitstellen kann.

3 Die Computerspiel-Produktion

Nachdem mit IFC eine mögliche Export-Schnittstelle identifiziert wurde, muss man sich nun mit dem Prozess der Computerspiel-Produktion auseinandersetzen, um die Gebäudedaten an geeigneter Stelle zu importieren und für das Computerspiel aufzubereiten.

3.1 Akteure und ihre Aufgaben

Als *Produktion* wird der Spiel-Entwicklungsprozess von der ersten Idee bis zur Marktreife verstanden. Verantwortlich für eine *Produktion* ist der *Producer*. Er koordiniert die anderen Projektbeteiligten und ist verantwortlich, dass das Computerspiel im angesetzten Zeit- und Budgetplan entwickelt wird. Unterstützt wird der *Producer* von den *Game Designern*, die für die Gesamtgestaltung und Konzeption von Computerspielen zuständig sind. Die kreativen Ideen kommen meistens von den so genannten *Game Artists* welche sie von Entwurfszeichnung bis zum fertigen Modell umsetzen.

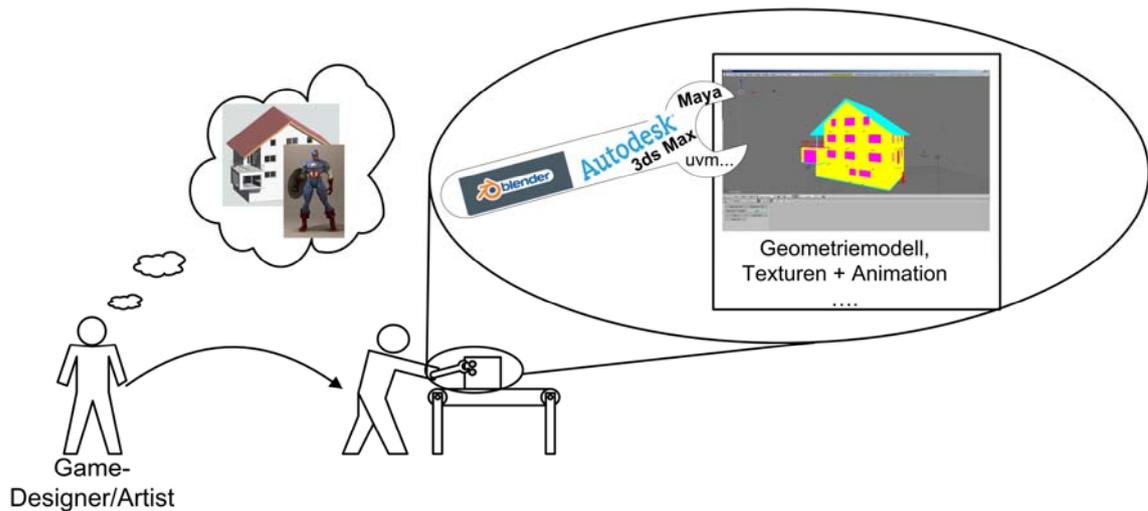


Abb. 5: Von der Idee zum 3-D-Objekt für Computerspiele.

Die *Game Artists* sind sozusagen die Architekten der Spielentwicklung und sind maßgeblich für die Gestaltung, Umsetzung und Animation von Charakteren, Landschaften, Texturen und Grafiken verantwortlich. Die Programmierer sind dann für die softwaretechnische Umsetzung des Spiels und für die Funktionen der Game-Engine mit ihren Komponenten verantwortlich.

3.2 Eingesetzte Software

Abb. 5 zeigt grob die unterschiedlichen Schritte in der Entwicklung eines Computerspiels. Zuerst existieren nur Skizzen und Entwurfszeichnungen, welche mit Hilfe von **3-D-Grafik Software** in Computermodelle umgesetzt werden. 3-D-Grafik Software enthält Funktionen um 3-D-Objekte zu modellieren, zu texturieren, zu animieren und zu rendern. Diese 3-D-Objekte können dann von der Game-Engine in die virtuelle Welt geladen werden und auf dem Bildschirm zur Anzeige gebracht werden. Im professionellen Bereich werden oft „3ds Max“ und „Maya“ von Autodesk [5] eingesetzt, es existieren aber auch vergleichbare Open Source-Anwendungen wie „Blender“ [9].

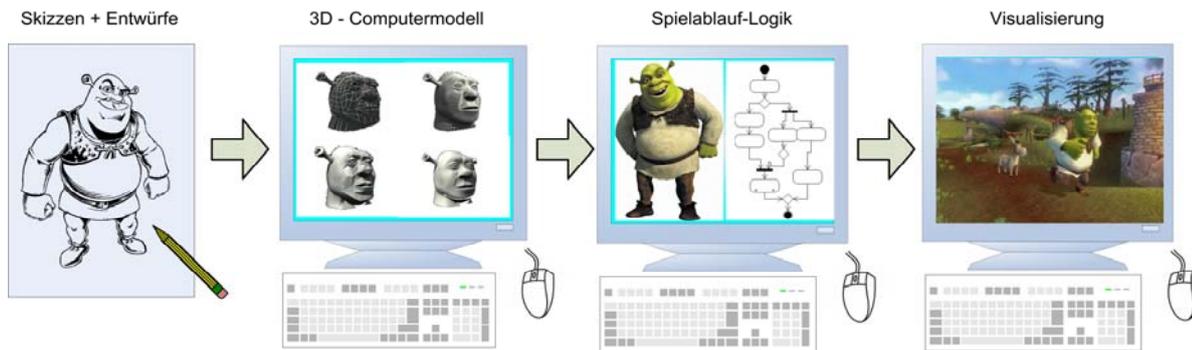


Abb. 6: Von der Skizze zum animierten 3-D-Objekt.

Die Spielablauf-Logik wird mit klassischen Programmier-Techniken implementiert. Die fertigen 3-D-Modelle und der Spielablauf werden an die Game-Engine übergeben. Eine Game Engine ist der Kern eines Computerspiels. Sie steuert den Spielverlauf und die visuelle Darstellung während des Spielablaufs.

Eine Game-Engine ist in der Regel modular aufgebaut und besteht aus verschiedenen Komponenten. Die Grafik/3-D-Engine ist für die grafische Darstellung auf dem Bildschirm verantwortlich und beinhaltet Funktionen zum Laden, Verwalten, Darstellen und Animieren von texturierten 3-D-Modellen. Hinzu kommen eine Textausgabe und ein Shader-System zur möglichst realistischen Darstellung der Wirkung von Licht und Schatten auf verschiedene Materialien (Metall, Holz, Haut) und Effekte wie Feuer, Explosionen, Wasser, Schnee, Nebel. Zur Grafik-Engine kommt eine Physik-Engine, welche in der Regel die Mechanik für feste Körper simuliert (Kugel rollt eine schiefe Ebene hinunter). Um den Eindruck in der virtuellen Welt zu verstärken sorgt ein Soundsystem für realistischen (Surround-)Sound. Damit computergesteuerte Mitspieler und Gegner auch wissen, was sie zu tun haben müssen sie mit einer künstlichen Intelligenz (KI) ausgestattet werden. Um Spielstände zu speichern und wieder zu laden besitzen Game-Engines auch eine Zustandsspeicherung und Datenmanagement. Damit der Spieler den Spielablauf steuern kann, muss er mit der virtuellen Welt interagieren. Dies geschieht in der Regel über Eingabegeräte wie Tastatur, Maus und Joystick. Auch hierzu muss die Engine Werkzeuge für die Steuerung bereitstellen. Weitere Komponenten einer Game –Engine sind Netzwerk-Unterstützung für Multiplayer-Modus und Skripting um die Programmierung zur Laufzeit interaktiv zu ändern, ohne das Spiel neu starten zu müssen.

Als Beispiel für eine Quellcode-offene Game-Engine ist die *Quake-Engine* [10] zu nennen. Diese ist eine 3-D-Game-Engine von id Software, welche *OpenGL* (Open Graphics Library), eine plattform- und programmiersprachenunabhängige Programmierschnittstelle zur Entwicklung von 3-D-Computergrafik, nutzt. Die *Quake-Engine* wird in den, in jüngster Zeit kontrovers diskutierten, Ego-Shootern wie „Half-Life“ oder „Counter-Strike“ eingesetzt. Microsoft stellt mit dem *XNA-Framework* [11] eine Game-Engine zur Spieleentwicklung für Microsoft „Windows“ und „Xbox 360“ zur Verfügung. XNA vereint 3-D-Darstellung (*DirectX/Direct3D*), Audioausgabe und Kommunikation mit Eingabegeräten in einer Entwicklungsumgebung. Ein Vertreter einer kommerziellen Engine ist hier die *CryEngine* von Crytek [12], welche unter anderem von den Spielen „Far Cry“ und „Crysis“ benutzt wird.

Ein Hauptunterscheidungsmerkmal von Game-Engines ist die Art der Programmierschnittstelle für die 2-D/3-D-Computergrafik. Am weitesten verbreitet sind *DirectX* [13] und *OpenGL* [14]. *DirectX* von Microsoft ist eine Sammlung von COM-basierten Programmierschnittstellen und beschränkt sich auf die Windows-Plattform. *OpenGL* dagegen ist eine plattform- und programmiersprachenunabhängige Grafikschnittstelle. Für den *Active-Stereo Output* für *Shutter*-Systeme ist es nötig, die Videostreams getrennt für das linke und rechte Auge zu rendern und in den Grafikpuffer zu schreiben (*Quad-Buffering*). Diese Methode wird aktuell nur von *OpenGL* unterstützt.

3.3 Die OGRE-Engine

Es existieren auch unabhängige Game-Engines die mehrere Grafik-Schnittstellen unterstützen. Ein Beispiel ist die *OGRE-Engine* [15], welche sowohl *DirectX* als auch *OpenGL* als Render-System unterstützt. OGRE steht für „Object-Oriented Graphics Rendering Engine“ und ist eine, in C++ geschriebene *Open Source*-Engine für 3-D-Grafikdarstellung. Um sie als Game-Engine einzusetzen, können Erweiterungen wie Physik- oder Mechanik-Simulation über Plug-Ins eingebunden werden. Ein weiterer Vorteil ist die Plattform-Unabhängigkeit: Die Betriebssysteme Windows, Linux und Mac OS X werden unterstützt. Mit *MOGRE (Managed OGRE)* gibt es auch einen .NET-Wrapper für OGRE, MOGRE ist eine Verbindungsschicht zwischen C++ und .NET. Mit dieser Verbindungsschicht ist es möglich, aus dem Microsoft „Visual Studio 2008“-OGRE-Anwendungen in C# oder „Visual Basic“ zu entwickeln. Dabei können die OGRE C++-Bibliotheken über die Verbindungsschicht angesprochen werden. Abb. 6 zeigt den

modularen Aufbau der *OGRE-Engine*. Kern-Komponenten sind *Scene Management*, *Resource Management* und *Rendering*.

Das *Scene Management* ist für die Verarbeitung des Inhaltes einer Szene verantwortlich. Es steuert unter anderem die Struktur der Objekte einer Szene und wie sie von den Kameras gesehen werden. Objekte dieses Bereichs sind verantwortlich für die Bereitstellung einer beschreibenden Schnittstelle zur Erschaffung der virtuellen Welt.

Das *Resource Management* lädt, entlädt und recycelt unter anderem Geometrien, Texturen und Schriftarten, welche zur Laufzeit des Programms für das Rendern benötigt werden.

Über die *Rendering*-Komponente wird das Erzeugen eines Bildes aus einer Szene für die Ausgabe über den Bildschirm gesteuert. Eine Szene ist ein virtuelles räumliches Modell, das Objekte und deren Materialeigenschaften, Lichtquellen, sowie die Position und Blickrichtung eines Betrachters definiert und über das *Scene Management* verwaltet wird. Um die Szene in ein Bild umzuwandeln müssen beim Rendern in der Regel folgende Aufgaben gelöst werden. Zuerst müssen die, abhängig vom Blickwinkel des Betrachters, sichtbaren Objekte ermittelt werden (Verdeckungsrechnung), danach muss das Aussehen der Objektoberflächen abhängig von den Materialeigenschaften simuliert werden (*Shading*) und zuletzt die Lichtverteilung innerhalb der Szene berechnet werden. Ist dies erfolgt kann das aktuelle Bild der Szene über den Bildschirm ausgegeben werden.

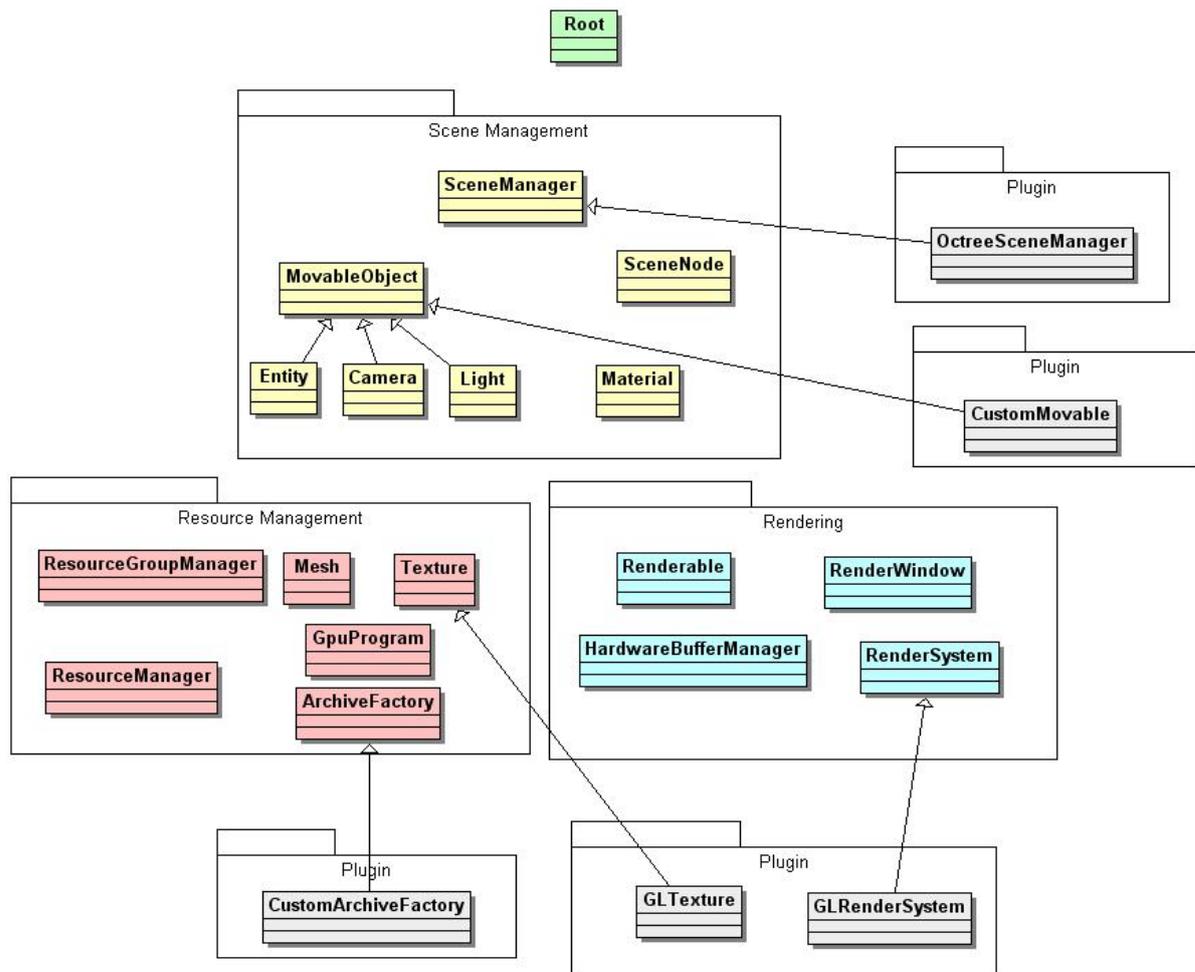


Abb. 7: Aufbau der *OGRE-Engine* [15].

Die *OGRE-Engine* enthält somit alle wichtigen Komponenten und lässt sich aufgrund des flexiblen Aufbaus, der leichten Anpassbarkeit und der Plattformunabhängigkeit gut als Game-Engine für die *BIM-Game-Plattform* einsetzen.

4 Die BIM-Game-Plattform

4.1 Systemarchitektur

In Kapitel 2 wurde mit dem IFC-Datenformat eine Schnittstelle identifiziert, mit der Gebäudedaten aus BIM-Anwendungen ausgetauscht werden können. Um auf deren Grundlage Szenarien für das Spiel generieren zu können, müssen diese jedoch noch

verarbeitet und ergänzt werden. Hierzu werden weitere Komponenten benötigt, welche nachfolgend beschrieben werden. Abb. 8 zeigt den Aufbau der *BIM-Game*-Plattform.

Der **BIM2OGRE-Mesh-Builder** liest die IFC-Datei ein. Aus den Geometrie-Informationen generiert diese Komponente dann das 3-D-Modell für OGRE. Da IFC jedoch nicht direkt die Texturen für die Bauteil-Oberflächen mitbringt, müssen diese noch ergänzt werden: Mit den Material-Informationen können aus der *IFCMaterialTexturesDB* die Texturen für jedes Bauteil abgerufen werden und mit dem 3D-Modell verknüpft werden. Das 3-D-Modell kann nun von der MOGRE Game-Engine verwendet und visualisiert werden.

Das Szenario für das Spiel wird mit dem **BIM-Game-Szenario-Builder** festgelegt. Er kann dabei auf Regeln für die Erstellung von Szenarien zurückgreifen. Diese Regeln können zum Beispiel festgelegte Brandszenarien und Bemessungsbrände aus Normen und Richtlinien sein (z.B. DIN, EC oder vfdb-Leitfaden) oder von dem Benutzer definiert werden. Diese Regeln können auch Aufgaben sein, die der Spieler im Verlaufe des Spiels zu erledigen hat (z.B. Feuer im 2.OG löschen, Person aus Fahrstuhl befreien etc.).

Mit der **BIM-Game-Simulation** können anschließend dynamische Aspekte aus den Szenarien simuliert werden. Dies beinhaltet unter anderem die Simulation der Feuer- und Rauchausbreitung oder das Verhalten von virtuellen Personen während des Spielablaufs (KI). Diese Komponente ist, zusammen mit der **MOGRE-Game-Engine**, für die Steuerung des Spiel-Ablaufs verantwortlich.

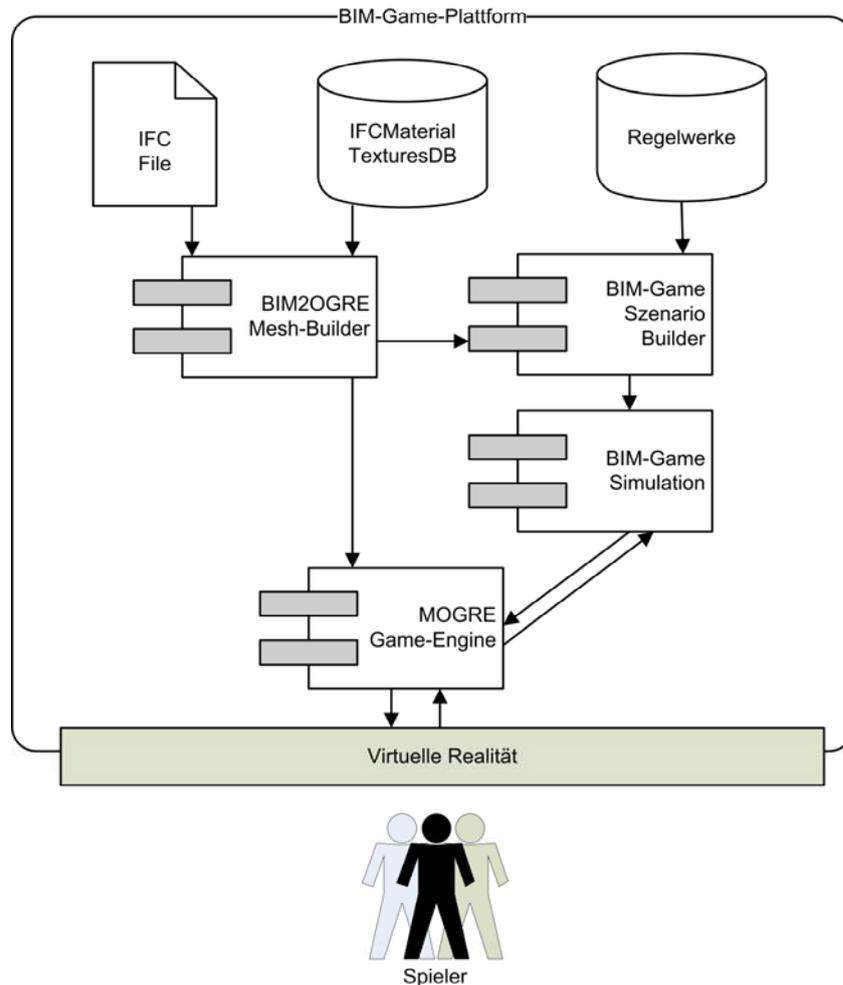


Abb. 7: Aufbau BIM-Game-Plattform.

4.2 Anwendungsbereiche

Die *BIM-Game*-Plattform befindet sich aktuell noch in einem frühen Stadium der Entwicklung. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Papers wird an der Implementierung des *BIM2OGRE-Mesh-Builder* und dem Aufbau der *IFCMaterialTexturesDB* gearbeitet.

Die *BIM-Game*-Plattform soll kein fertiges Computerspiel darstellen. Sie stellt vielmehr Werkzeuge zur Verfügung, mit deren Hilfe innerhalb kürzester Zeit Gebäudebezogene Szenarien erstellt und durchgespielt werden können. Da Daten des kompletten Gebäudelebenszyklus verwendet werden können, sind auch Szenarien vom ersten Spatenstich bis zum Abbruch des Gebäudes grundsätzlich denkbar. Als erster Schritt soll jedoch der Prototyp eines Trainingsspiels für die Feuerwehr entwickelt werden.

Aus diesem Grund ist das erste Gebäudemodell, welches umgesetzt werden soll, das des Feuerwehr-Übungshauses der Landesfeuerwehrschule Baden-Württemberg. Das Feuerwehr-Übungshaus ermöglicht in der realen Welt die praktische Ausbildung am Feuer, indem man in unterschiedlichen Räumen über eine Gasanlage realistische Szenarien für die Brandbekämpfung simulieren kann. Diese Szenarien sollen auch mit Hilfe der *BIM-Game*-Plattform in virtueller Realität durchgespielt werden können. Somit hat man einen direkten Vergleich zwischen der realen und virtuellen Welt, kann den Realitätsgrad der virtuellen Welt ermitteln und feststellen welche Trainingseffekte mit solch einem Spiel erreicht werden können.

5 Zusammenfassung

Mit der in diesem Paper beschriebenen *BIM-Game*-Plattform können Gebäudeinformationen mit Hilfe von BIM in eine virtuelle Spieleumgebung integriert werden. Die Datenschnittstelle IFC dient dabei als Resource zur Gewinnung der Gebäudedaten. Diese können direkt in die Spielumgebung geladen werden und dienen als Grundlage für Szenarien des Spiels. Mögliche Szenarien können z.B. Umbaumaßnahmen, Katastrophen (Brand, Explosion) oder einfach nur virtuelle Gebäudegänge sein. Die MOGRE-Game-Engine stellt Schnittstellen für die 3-D-Visualisierung und Benutzerinteraktion bereit, was in einer immersiven Umgebung zu einem hohen Realitätsgrad führt.

Damit können Planer, Erbauer, Betreiber und Nutzer eines Gebäudes sowie Rettungskräfte unterschiedlichste Szenarien aus dem Lebenszyklus noch vor dem ersten Spatenstich virtuell „durchspielen“ und in einer neuen Qualität auf sich einwirken lassen. Dies kann in einem frühen Planungsstadium helfen, Planungsfehler zu vermeiden und Sicherheitsrisiken zu erkennen. Nachträgliche, oft mit erhöhten Kosten verbundene Änderungen können so vermieden werden. Dadurch können BIM-basierte *Serious Games* einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und Sicherheit von Gebäuden leisten.

Literaturverzeichnis

- [1] U. Rüppel U and M. Lange. An integrative Process Model for Cooperation Support in Civil Engineering. ITcon Vol. 11. Special Issue Process Modelling, Process Management and Collaboration. p. 509-528. 2006. <http://www.itcon.org/2006/37>
- [2] B. Firmenich und E. Rank. *Überblick zum Themenbereich Verteilte Produktmodelle*. In: U. Rüppel (Hg.). *Vernetzt-kooperative Planungsprozesse im konstruktiven Ingenieurbau*. 2007. pp. 121–132.
- [3] G. Lee, R. Sacks and C.M., Eastman. *Specifying parametric Building Object Behavior (BOB) for a Building Information Modeling System*. *Automation in Construction Vol. 15*. 2006.
- [4] T. Liebich und T. Hoffeller (Hg.). *Anwenderhandbuch Datenaustausch BIM/IFC, Industrieallianz für Interoperabilität*. 2006.
- [5] Autodesk Revit Architecture. Maya, 3ds Max. <http://www.autodesk.de>
- [6] Bentley Speedikon Architectural. <http://www.bentley.com/DE/Products/Bentley+speedikon+Architectural>
- [7] T. Liebich (Hg.). *IFC2x Edition 3 Technical Corrigendum 1*. IAI International Council Limited. <http://www.iai-tech.org/ifc/IFC2x3/TC1/html/index.htm>
- [8] Institut für Angewandte Informatik, Forschungszentrum Karlsruhe. *IfcStoreyView*. <http://www.iai.fzk.de/ifc>
- [9] Blender 3-D-Grafik-Software. <http://www.blender.org>
- [10] Quake Engine. <http://www.idsoftware.com>
- [11] Microsoft XNA Developer Center. <http://msdn.microsoft.com/en-us/xna/default.aspx>
- [12] Crytek GmbH. *CryEngine*. <http://www.crytek.com>
- [13] Microsoft DirectX Developer Center. <http://msdn.microsoft.com/en-us/directx/default.aspx>
- [14] OpenGL (Open Graphics Library). <http://www.opengl.org>
- [15] OGRE (Object-Oriented Graphics Rendering Engine). <http://www.ogre3d.org>

Autorenverzeichnis

- Abolghasemzadeh, Puyan, 13
Abromeit, Arne, 127
Abu Abed, Wassim, 139
Asche, Christian, 273
Borrmann, André, 1
Börkircher, Mikko, 223
Bode, Matthias, 139
Brüggemann, Thilo, 211
Braunes, Jörg, 237
Cahill, Brian, 37
Cai, Quanji, 79
Cong, ZiXiang, 37, 169
Euringer, Thomas, 1
Frisch, Jérôme, 67
Göbel, Peter, 297
Gerold, Fabian, 161
Höcker, Mario, 25
Hamm, Matthias, 55
Hanh, Quang Le, 309
Hartmann, Ulrich, 179
Hofmann, Felix, 285
Janßen, Christian, 47
Könke, Carsten, 115
Knežević, Jovana, 105
Krafczyk, Manfred, 47
Li, Yang, 25
Menzel, Karsten, 37, 357
Mundani, Ralf-Peter, 105
Obergrießer, Mathias, 1
Olbrich, Lukas, 199
Paul, Norbert, 93
Pfäffinger, Andreas, 1
Rätzke, Matthias, 13
Riedel, Thomas, 149
Rinke, Nils, 285
Schatz, Kristian, 369
Schlüter, Arno, 247
Schrader, Kai, 115
Stübbe, Kai Marcus, 345
Stack, Paul, 357
Stein, Peter, 261
Theiler, Michael, 149
Tauscher, Eike, 149
Tobin, Ena, 169
Tulke, Jan, 149
Tumwesigye, Emmanuel, 357
van Treeck, Christoph, 67
Wagenknecht, Armin, 321
Wagner, Andreas, 127
Wang, Yue, 357
Wießflecker, Thomas, 333
Zülch, Gert, 223

ISBN: 978-3-86644-396-9

www.uvka.de

