

Schriftenreihe Bauwirtschaft

I Forschung

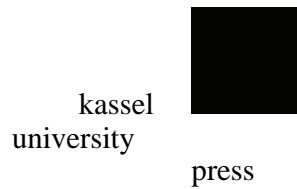
CAD-integrierte Modellierung von agentenbasierten
Simulationsmodellen für die Bauablaufsimulation im Hochbau

Martin Kugler

Schriftenreihe Bauwirtschaft

I Forschung 22

Herausgegeben vom Institut für Bauwirtschaft der Universität Kassel



CAD-integrierte Modellierung von agentenbasierten Simulationsmodellen für die Bauablaufsimulation im Hochbau

Martin Kugler

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Bauingenieur- und Umweltingenieurwesen der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Erster Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz

Zweiter Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sigrid Wenzel

Tag der mündlichen Prüfung:

3. September 2012

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.ddb.de> abrufbar

Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2012

ISBN print: 978-3-86219-392-9

ISBN online: 978-3-86219-393-6

URN: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0002-33932>

© 2012, kassel university press GmbH, Kassel

www.upress.uni-kassel.de

Druck und Verarbeitung: Unidruckerei der Universität Kassel

Printed in Germany

Vorwort des Herausgebers

Die Simulation von Bauprozessen ist ein aktuelles Forschungsthema, das derzeit an unterschiedlichen Universitäten bearbeitet wird. In der Praxis der Bauwirtschaft hat sich die Simulation mit Ausnahme prototypischer Einsätze jedoch noch nicht etabliert. Ein Hauptgrund für die fehlende Akzeptanz ist die Komplexität der Implementierung von geeigneten Modellen zur Simulation und damit der hohe Aufwand sowie die Einschätzung vieler Unternehmen über den nur geringen Nutzen einer Simulationsstudie.

Mit seiner Arbeit leistet Herr Dr.-Ing. M. Kugler einen Beitrag zur Reduzierung dieses Aufwandes, in dem er die Simulationsmodellierung durch Verknüpfung mit den CAD-Daten und einer vereinfachten Eingabe weiterer simulationsrelevanter Daten erleichtert. Ziel der Arbeit ist die Untersuchung von Möglichkeiten zur Entwicklung einer CAD-integrierten Simulationsmodellierungsumgebung und die erstmalige Einführung eines agentenbasierten Modellierungsansatzes zur Simulation im Bauwesen. Dabei beschränkt sich Herr Dr.-Ing. Kugler auf den Bereich Hochbau, insbesondere auf den mehrgeschossigen Wohnungs- und Bürobau, auf den Einsatz in der Arbeitsvorbereitung im Bauunternehmen und auf eine prototypische Implementierung. Im Hochbau ist der Einsatz der Simulation wegen der Vielzahl an unterschiedlichen Gewerken und der punktuellen Baustellenorganisation besonders sinnvoll. Die Arbeitsvorbereitung ist eine wesentliche Voraussetzung für eine wirtschaftliche Bauausführung und der Nutzen einer Simulationsstudie hier im besonderen Maße Erfolg versprechend.

Die von Herrn Dr.-Ing. Kugler definierten Ziele werden in der Arbeit konsequent umgesetzt, sehr anschaulich beschrieben und ausführlich erläutert sowie durch zwei Beispiele auch die Praxistauglichkeit nachgewiesen.

Diese Arbeit ist im Institut für Bauwirtschaft an der Universität Kassel im Zuge eines von der DFG geförderten Forschungsprojekts entstanden und wurde durch den Herausgeber betreut. Zweite Betreuerin war Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Wenzel vom Institut für Produktionstechnik und Logistik. Dem Autor Herrn Dr.-Ing. M. Kugler sei an dieser Stelle ausdrücklich gedankt für die sehr gute Zusammenarbeit in den vergangenen Jahren in verschiedenen Forschungsprojekten des Fachgebiets, für die Durchführung eigenständiger Lehrveranstaltungen im Bereich der Simulation und für seine erfolgreiche Mitarbeit im Institut für Bauwirtschaft.

Kassel, im September 2012

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz
Leitender Direktor des IBW
Leiter des Fachgebiets Bauorganisation und Bauverfahren

Vorwort des Verfassers

Die Idee zu dieser Arbeit entstand schon während meiner Tätigkeit als studentische Hilfskraft am Institut für Bauwirtschaft. Während dieser Zeit war ich an der Implementierung eines Werkzeugs zur Integration von CAD und Simulation auf Basis von Produktmodellen für den Erdbau beteiligt. Bei mir entstand die Idee, ein solches Werkzeug auch für den Hochbau zu entwickeln. Der Hochbau stellt mit seinen vielen unterschiedlichen und dynamischen Prozessen wesentlich höhere Ansprüche an ein solches Werkzeug, als die gleichförmigen Prozesse des Erdbaus. Diese Herausforderung reizte mich jedoch in besonderer Weise, speziell weil es bisher keine Lösungen gab, um das Potenzial der Simulation auch für den sehr schwierig zu prognostizierenden Hochbau zu erschließen.

Bedanken möchte ich mich zuerst bei meiner Familie und ganz besonders bei meiner Frau Melanie, die mich immer wieder in unterschiedlichster Weise liebevoll unterstützt hat. Mein Dank gilt aber auch meiner Tochter Miriam, deren Lächeln für mich die schönste Motivation für meine Arbeit war. Für ihre Unterstützung und ihre Motivation bedanke ich mich aber auch bei meinem Vater Dipl.-Ing. Friedrich Kugler, meiner Mutter Monika, geb. Labitzke, und meinen Geschwistern Andreas und Maria.

Mein Dank gilt darüber hinaus allen Mitarbeitern des Instituts für Bauwirtschaft der Universität Kassel, die mich während meiner Promotionsphase in vielfältiger Art und Weise unterstützt haben. Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Dipl. Ing. Ralph Meyer, der mir sehr oft mit Ideen und Anregungen weitergeholfen hat und bei Frau Dr.-Ing. Racha Chahroud, die bei mir die Freude an der Wissenschaft geweckt hat. Wertvoll war für mich auch der Austausch mit meinem Kollegen Herrn Dipl.-Ing. Basel Kordi, mit dem ich sehr gut zusammengearbeitet habe. Bedanken möchte ich mich außerdem bei Frau Christiane Heiss, die mir bei meinen Veröffentlichungen regelmäßig Korrektur gelesen hat.

Hervorheben möchte ich die ausgezeichnete Betreuung durch meinen Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz, der während meiner Promotionsphase immer für mich ansprechbar war und mich in vielfältiger Art und Weise unterstützt hat. Mein Dank gilt außerdem meiner zweiten Gutachterin Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sigrid Wenzel für ihre präzisen und sehr hilfreichen Verbesserungsvorschläge. Ebenso danken möchte ich den weiteren Mitgliedern der Prüfungskommission Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Racky und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko.

Zuletzt möchte ich mich noch bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung dieser Arbeit bedanken.

Bad Emstal, im September 2012

Martin Kugler

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Motivation	1
1.2 Arbeitshypothese	7
1.3 Zielsetzung.....	8
1.3.1 Wissenschaftliche Zielsetzung und Forschungsbedarf.....	8
1.3.2 Abgrenzung der wissenschaftlichen Zielsetzung	9
1.3.3 Zielsetzung in Bezug auf die prototypische Implementierung.....	9
1.3.4 Systemarchitektur	12
1.4 Aufbau und Methodik der Arbeit.....	15
2 Grundlagen zur Simulation und Stand der Forschung	17
2.1 Grundlegende Definitionen zur Simulation	17
2.2 Simulation im Bauwesen	20
2.2.1 Baubetriebswirtschaftliche Simulation.....	21
2.2.2 Bauablaufsimulation.....	23
2.2.3 Schwerpunkte der Forschungsarbeiten.....	31
2.2.4 Zusammenfassung der Entwicklungstrends	36
2.3 Multiagentensimulation	39
2.3.1 Erläuterung des Agentenbegriffs	39
2.3.2 Multiagentensysteme	42
2.3.3 Die multiagentenbasierte Simulation	42
2.3.4 Anwendungsfelder der Agentensimulation in der Wissenschaft.....	44
2.3.5 Anwendungsfelder der Agentensimulation im Bauwesen.....	45
2.3.6 Vergleich mit anderen Modellierungskonzepten.....	48
3 Analyse des Systems „Hochbau“.....	61
3.1 Methodisches Vorgehen bei der Systemanalyse.....	61
3.2 Systemkomponenten	62
3.2.1 Bauleitung.....	62
3.2.2 Arbeitskräfte	62
3.2.3 Betriebsmittel	63
3.2.4 Material.....	63
3.3 Systemgrenzen	64

3.3.1	Materialfluss.....	64
3.3.2	Informationsfluss	65
3.4	Ablaufstruktur	66
3.4.1	Fertigungsabläufe.....	68
3.4.2	Produktionslogistik	74
3.5	Aufbaustruktur.....	76
3.5.1	Erzeugnisstruktur	77
3.5.2	Aufgabenstruktur	77
3.6	Systemdaten.....	79
4	CAD-integrierte Simulationsmodellierung.....	81
4.1	Motivation	81
4.2	Produktmodelle im Hochbau.....	83
4.3	Das Prozessmodell des Simulationssystems	87
4.3.1	Prozessmodelle für die Terminplanung und die Bauablaufsimulation	88
4.3.2	Semantik des entwickelten Prozessmodells.....	91
4.3.3	Datenmodell	102
4.4	CiSmo	104
4.4.1	Softwarearchitektur des entwickelten Modellierungswerkzeugs.....	105
4.4.2	Programmablauf und Anwendungsoberflächen.....	107
4.5	Technologische Umsetzung der Modellierungsumgebung	112
4.5.1	VBA	112
4.5.2	Programmstruktur und interner Programmablauf	114
4.5.3	MySQL	119
4.5.4	XML.....	120
5	Das Simulationsmodell	123
5.1	Vorgehensmodelle für die Durchführung von Simulationsstudien.....	123
5.2	Systembeschreibung.....	127
5.2.1	Anwendungsbereich und Systemstruktur.....	127
5.2.2	Die Modellierungsumgebung.....	128
5.2.3	Zusätzlich verwendete Software	135
5.2.4	Beschreibungsmittel.....	135
5.2.5	Systemgrenzen des Modells.....	135
5.2.6	Annahmen	137

5.2.7	Die Systemstruktur im Überblick	138
5.3	Modellierung der Systemstruktur	138
5.3.1	Modellstruktur und Teilmodelle.....	138
5.3.2	Schnittstellen nach außen	141
5.4	Modellierung der Teilsysteme	142
5.4.1	Weltklasse Baustelle.....	144
5.4.2	Bauleitungsagent	147
5.4.3	Arbeitsgruppenagent.....	155
5.4.4	Arbeiteragent	165
5.4.5	Betriebsmittelagent.....	168
5.5	Erforderliche Modelldaten	172
5.5.1	Eingabe- und Ausgabegrößen.....	172
5.5.2	Datenzugriff und Implementierung der Datenstrukturen	174
6	Anwendungsbeispiele zur Verifikation und Validierung	177
6.1	Vorgehensweise	177
6.2	Techniken zur Verifikation und Validierung.....	178
6.3	Bauprojektdaten	180
6.3.1	Projekt Seniorenenzentrum	180
6.3.2	Projekt Passivhausreihensiedlung	182
6.3.3	Aufbereitung der Projektdaten	183
6.3.4	Einschränkungen	184
6.4	Test der Anwendung CiSmo	185
6.4.1	Test der Programmfunctionalitäten.....	187
6.4.2	Ergebnisse der Verifikation.....	188
6.4.3	Validität der Anwendung	189
6.4.4	Bewertung der Benutzerfreundlichkeit.....	192
6.5	Verifikation und Validierung des Simulationsmodells.....	193
6.5.1	Intrinsische Prüfung (Phase 5,5).....	194
6.5.2	Prüfung gegen die Aufgabenspezifikation (Phase 5,2)	204
6.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	213
7	Fazit und Ausblick.....	217
7.1	Zusammenfassende Bewertung des Prozessmodells	217
7.2	Fazit in Bezug auf das agentenbasierte Simulationsmodell.....	218

7.3	Fazit in Bezug auf die prototypische Implementierung	219
7.4	Ausblick.....	220
8	Literaturverzeichnis.....	223

Abkürzungsverzeichnis

3-D	3-dimensional
4-D	4-dimensional
A-A	Anfang-Anfang
ADO	ActiveX Data Objects
A-E	Anfang-Ende
AG	Arbeitsgruppe
AK	Arbeitskräfte
ANSI	American National Standards Institute
Anz.	Anzahl
ARH	Arbeitszeit-Richtwerte Hochbau
BIM	Building Information Modelling
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CAD	Computer Aided Design
CiSmo	CAD-integrierte Simulationsmodellierung für die Bauablaufsimulation im Hochbau
CYCLONE	CYCLic Operation Network
d. h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
dll	Dynamic Link Library
dt.	deutsch
DTD	XML Document Type Definition
dwg	Drawing – Datenformat in AutoCAD
DXF	Drawing Interchange File Format
E-A	Ende-Anfang
E-E	Ende-Ende
E-R-Diagramm	Entity-Relationship Diagramm

etc.	Et cetera
ForBAU	Bayrischer Forschungsverbund virtuelle Baustelle
GAEB	Gemeinsamer Ausschuss Elektronik im Bauwesen
GPL	GNU General Public License
GPS	General Purpose Simulations
HTML	Hypertext Markup Language
IDE	Integrated Development Environment
IEC	International Electrotechnical Commision
IFC	Industrial Foundation Classes
ISO	International Organization for Standardization
jew.	jeweils
LV	Leistungsverzeichnis
MEFISTO	Management – Führung – Information – Simulation im Bauwesen
Nr.	Nummer
OMG	Object Management Group
PERT	Program Evaluation and Review Technique
Prosidyc	Process Simulation Dragados y Constructionnes
REB	Regelungen für die elektronische Bauabrechnung
REFA	Reichsausschuß für Arbeitszeitermittlung – Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung
SimCoMar	Simulation Cooperation in the Maritime Industries
SIMoFIT	Simulation of Outfitting Processes in Shipbuilding and Civil Engineering
SPS	Special Purpose Simulations
SQL	Standard Query Language
STS	Simulation Toolkit Shipbuilding
u. a.	unter anderem

UML	Unified Modelling Language
VB	Visual Basic
VBA	Visual Basic for Applications
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
VOB	Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen
XML	Extensible Markup Language
XSD	XML Schema Definition
z. B.	zum Beispiel

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Zielsetzungen in Bezug auf die Phasen einer Simulationsstudie	12
Abbildung 1.2:	Systemarchitektur des Simulationssystems (<i>Kugler und Franz 2008, S. 155</i>).....	13
Abbildung 1.3:	Aufbau der Arbeit	15
Abbildung 2.1:	Klassifikation von Simulationsmethoden (<i>Wenzel 2000, S. 8</i>).....	19
Abbildung 2.2:	Taxonomie von Agenten in ihren konkreten Umgebungen (<i>Klügl 2001, S. 71</i>).....	39
Abbildung 2.3:	Agententypen nach Russel und Norvig (<i>Klügl 2001, S. 20</i>).....	41
Abbildung 3.1:	Beschaffungs-, Produktions- und Entsorgungslogistik einer Baumaßnahme (<i>Boenert und Blömeke 2003</i>)	65
Abbildung 3.2:	Informationsfluss in Bezug auf den Bauprozess	66
Abbildung 3.3:	Ablaufprinzipien (<i>Künstner 1984, S. 115</i>).....	67
Abbildung 3.4:	Ablaufabschnitte nach der REFA-Methodenlehre (<i>Berg 1984, S. 58</i>)	68
Abbildung 3.5:	Sequenzierung der Bauvorgänge durch technische, organisatorische und kapazitative Abhängigkeitsbeziehungen	72
Abbildung 3.6:	Materialfluss auf der Baustelle	76
Abbildung 3.7:	Exemplarische Aufgabenstruktur im Hochbau.....	78
Abbildung 4.1:	Datenhaltung in der Dissertation von Chahrour, Weber und der vorliegenden Arbeit	83
Abbildung 4.2:	<CARS>-Tupel der Bauverfahrensmodellvorlage nach <i>Fischer et al. (1999)</i>	89
Abbildung 4.3:	„ <i>Vorgang mit Voraussetzungen und Ergebnissen</i> “ (<i>Huhnt und Enge 2007, S. 34</i>)	90
Abbildung 4.4:	UML-Klassendiagramm des Gebäude- und des Prozessmodells	93
Abbildung 4.5:	Verschiedene räumliche Abhängigkeitsbeziehungen	99
Abbildung 4.6:	Alternative Fertigungsrichtungen	99
Abbildung 4.7:	Entity-Relationship-Diagramm des Datenmodells	102

Abbildung 4.8:	Komponentendiagramm des Simulationssystems	105
Abbildung 4.9:	Menüleiste von Architecture mit dem zusätzlichen Menüpunkt „Simulation“.....	107
Abbildung 4.10:	UML-Aktivitätsdiagramm des Programmablaufs.....	108
Abbildung 4.11:	Anwendungsoberfläche der Projektbeschreibung.....	109
Abbildung 4.12:	Anwendungsoberfläche für die Definition eines stochastischen Wertebereichs.....	109
Abbildung 4.13:	Zeichnungsdatei mit den Baustelleneinrichtungselementen und Anwendungsoberfläche zur Baustelleneinrichtung.....	110
Abbildung 4.14:	Anwendungsoberfläche zur Verfahrensauswahl.....	111
Abbildung 4.15:	UML-Aktivitätsdiagramm der Abläufe während der Datenmanipulation .	116
Abbildung 4.16:	Klassendiagramm des Moduls ModSQLProjekt.....	116
Abbildung 4.17:	UML-Klassendiagramm des Klassenmoduls ClsProjekt und des Formulars frm1_Projektbeschreibung.....	117
Abbildung 4.18:	UML-Klassendiagramm des Moduls ModXMLSituation mit den enthaltenen Prozeduren	118
Abbildung 5.1:	Erweitertes Vorgehensmodell (angelehnt an <i>Rabe et al. (2008)</i>) für die Durchführung und Dokumentation einer Simulationsstudie (<i>Wenzel et al. 2008, S. 6</i>).....	124
Abbildung 5.2:	UML-Klassendiagramm eines Simulationsmodells in SeSAM	130
Abbildung 5.3:	Die Reasoning Engine "Auftragsvergabe" des Bauleitungsagent mit dem zugehörigen Aktivitätsgraphen	132
Abbildung 5.4:	<i>"Definition der Notation der Knoten- und Kantentypen im SeSAM-UML-Aktivitätsgraph"</i> (<i>Oechslein 2004, S. 81</i>)	132
Abbildung 5.5:	Funktionseingabe im Aktivitätsknoten „Arbeitsgruppen erfassen“	133
Abbildung 5.6:	UML-Klassendiagramm des Simulationsmodells.....	140
Abbildung 5.7:	Situation eines Simulationsmodells während eines Simulationslaufs	142
Abbildung 5.8:	Variablen und Verhaltensnetze der Weltklasse "Baustelle"	144
Abbildung 5.9:	UML-Aktivitätsdiagramm der Reasoning Engine "Datenverarbeitung" ...	146

Abbildung 5.10: UML-Aktivitätsdiagramm der Reasoning Engine "Verwaltung der Systemzeit"	147
Abbildung 5.11: Variablen und Verhaltensnetze der Agentenklasse "Bauleitungsagent"	148
Abbildung 5.12: Pseudocode der Aktivität "Voraussetzungen aktualisieren"	150
Abbildung 5.13: Quellcode der Aktivität "Voraussetzungen aktualisieren" in SeSAM-Impl.....	151
Abbildung 5.14: Quellcode in SeSAM-Impl der benutzerdefinierten Funktion "ProofVoraussetzung"	153
Abbildung 5.15: UML-Aktivitätsdiagramm der Reasoning Engine „Nachrichtenverarbeitung“ des Bauleitungsagenten	154
Abbildung 5.16: UML-Aktivitätsdiagramm der Reasoning Engine „Auftragsvergabe“ des Bauleitungsagenten	155
Abbildung 5.17: Variablen und Verhaltensnetze der Agentenklasse "Arbeitsgruppenagent"	156
Abbildung 5.18: UML-Sequenzdiagramm der Interaktionen des Arbeitsgruppenagenten ...	158
Abbildung 5.19: UML-Aktivitätsdiagramm der Reasoning Engine „Auftragsverarbeitung“ des Arbeitsgruppenagenten	160
Abbildung 5.20: Unterdiagramm „Auftragsbearbeitung“ des Arbeitsgruppenagenten	161
Abbildung 5.21: Unterdiagramm „Bewegung zum Abschnitt“ des Arbeitsgruppenagenten	161
Abbildung 5.22: Unterdiagramm „Teilvorgaenge bearbeiten“ des Arbeitsgruppenagenten.	162
Abbildung 5.23: Unterdiagramm „Bauteil bearbeiten“ des Arbeitsgruppenagenten.....	163
Abbildung 5.24: UML-Aktivitätsdiagramm der Reasoning Engine „Transportorganisation“ des Arbeitsgruppenagenten.....	164
Abbildung 5.25: Terminanforderung	165
Abbildung 5.26: Klassendiagramm des Arbeiteragenten	166
Abbildung 5.27: UML-Sequenzdiagramm der Interaktionen des Arbeiteragenten.....	167
Abbildung 5.28: UML-Aktivitätsdiagramm der Reasoning Engine „Transportauftrag ausführen“ des Arbeiteragenten.....	168

Abbildung 5.29: Klassendiagramm des Betriebsmittelagenten	169
Abbildung 5.30: Klassendiagramm der Betriebsmitteltypen	170
Abbildung 5.31: UML-Aktivitätsdiagramm der Reasoning Engine „Terminberechnung“ des Betriebsmittelagenten	170
Abbildung 5.32: UML-Aktivitätsdiagramm der Reasoning Engine „Auftragsverwaltung“ des Betriebsmittelagenten	171
Abbildung 5.33: UML-Aktivitätsdiagramm der Reasoning Engine „Auftragsbearbeitung“ des Betriebsmittelagenten	171
Abbildung 5.34: Eingabe- und Ausgabegrößen des Simulationsmodells	172
Abbildung 5.35: Entity-Relationship-Diagramm der Ergebnisdatenbank.....	175
Abbildung 6.1: Vorgehensmodell zur V&V (<i>Rabe et al. 2008, S. 119</i>)	178
Abbildung 6.2: Bauabschnitt 1 und 2.1, Ansicht Innenhof	181
Abbildung 6.3: Querschnitt des Seniorenzentrums (KG, EG, 1. OG und 2. OG).....	181
Abbildung 6.4: Reihenhaus aus der Passivhausreihensiedlung (<i>Bleichert 2011, S. 23</i>)	182
Abbildung 6.5: Querschnitt des Passivhauses (<i>Bleichert 2011, S. 24</i>).....	182
Abbildung 6.6: bauteilorientiertes CAD-Modell des Seniorenzentrums	184
Abbildung 6.7: Auswahlmatrix zur Verknüpfung der Verfahren mit Abschnitten oder Geschossen (<i>Bleichert 2011, S. 83</i>).....	190
Abbildung 6.8: Lastverlauf Radien Liebherr 26 K.1 (<i>Bleichert 2011, S. 125</i>)	192
Abbildung 6.9: Ursache-Wirkungsgraph der wichtigsten Parameter des Simulationsmodells	196
Abbildung 6.10: Berechnung der prozentualen Veränderung der Bauzeit durch die Motivationskennzahl	199
Abbildung 6.11: durchschnittliche Auslastung des Krans im Ausgangsszenario über den zeitlichen Verlauf der Baumaßnahme	201
Abbildung 6.12: Ausschnitt aus dem Terminplan der auf Basis der Simulationsergebnisse generiert wurde.....	211

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Zusammenfassung der Systemmerkmale der verschiedenen Simulationssysteme	38
Tabelle 2.2:	Verhaltenstypisierung von Agenten nach <i>Schmidt (2000, S. 24 ff.)</i>	41
Tabelle 2.3:	Eigenschaften der Modellierungskonzepte.....	54
Tabelle 2.4:	Eignung der Modellierungskonzepte für verschiedene Systemmerkmale....	55
Tabelle 2.5:	Eignung der Modellierungskonzepte in Bezug auf das Verhalten der Systemkomponenten.....	56
Tabelle 4.1:	Bestandteile einer Voraussetzung.....	97
Tabelle 4.2:	Begriffe zur Beschreibung der räumlichen Relationen	98
Tabelle 4.3:	Drei Voraussetzungen des Vorgangs "Innenwand mauern"	100
Tabelle 4.4:	Relationale Datenbank-Tabelle mit verschiedenen Datenbankeinträgen (Tupeln)	103
Tabelle 4.5:	Formulare, Module und Klassenmodule von CiSmo	114
Tabelle 5.1:	Variablen des zusammengesetzten Datentyps "InternalMessage"	134
Tabelle 5.2:	Variablen des zusammengesetzten Datentyps "Auftrag"	148
Tabelle 5.3:	Variablen des zusammengesetzten Datentyps "Voraussetzung"	152
Tabelle 5.4:	Variablen des zusammengesetzten Datentyps "Aufzugsfahrt".....	157
Tabelle 5.5:	Variablen des zusammengesetzten Datentyps "Transportauftrag- Außenlager"	157
Tabelle 5.6:	Variablen des zusammengesetzten Datentyps "Terminangebot"	159
Tabelle 5.7:	Variablen des zusammengesetzten Datentyps "Transportauftrag- Abschnitt"	160
Tabelle 5.8:	Variablen des zusammengesetzten Datentyps "Auswertung"	163
Tabelle 5.9:	Die beiden Datenquellen des Simulationsmodells im Überblick	173
Tabelle 5.10:	Variablen des zusammengesetzten Datentyps "simulation_tbl_vorgang" .	174
Tabelle 5.11:	Spalten der Datenbanktabelle "tbl_auftrag"	175

Tabelle 5.12:	Spalten der Datenbanktabelle "tbl_bedarfsmittel"	176
Tabelle 6.1:	Tabellenerfassung der Bauvorgänge aus dem LV in Bezug zu den Bauteilen	183
Tabelle 6.2:	Zusammenhänge zwischen den Parametern und daraus abgeleitete Testfälle	197
Tabelle 6.3:	Parameter und Ergebnisse von Test 1	198
Tabelle 6.4:	Parameter und Ergebnisse von Test 2	198
Tabelle 6.5:	Parameter und Ergebnisse von Test 3	200
Tabelle 6.6:	Parameter und Ergebnisse von Test 4	200
Tabelle 6.7:	Parameter und Ergebnisse von Test 5	201
Tabelle 6.8:	Parameter und Ergebnisse von Test 6	202
Tabelle 6.9:	Parameter und Ergebnisse von Test 7	202
Tabelle 6.10:	Parameter und Ergebnisse von Test 8	202
Tabelle 6.11:	Parameter und Ergebnisse von Test 9	203
Tabelle 6.12:	Parameter und Ergebnisse von Test 10	204
Tabelle 6.13:	Vergleichszeiten einzelner Bauteiltypen aus dem Projekt "Altenpflegeheim"	208
Tabelle 6.14:	Vergleichsdaten des realen Bauprojektes.....	210
Tabelle 6.15:	Grenzwerttests zur Materiallogistik	212
Tabelle 6.16:	Laufzeitverhalten des Modells unter verschiedenen Testbedingungen	213

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Motivation

*"Wenn der Wind des Wandels weht,
bauen die einen Schutzmauern,
die anderen Windmühlen." – Chinesisches Sprichwort*

Trotz eines sehr hohen Kostendrucks, der in der Regel den Einsatz innovativer, kostensenkender Methoden begünstigt, verhält sich die deutsche Bauwirtschaft sehr konservativ. Forschungsmittel für die Entwicklung neuer Methoden zur Verbesserung der Arbeitsvorbereitung und der Bauablaufplanung werden nur selten vergeben. Neue Methoden werden nur sehr zögerlich eingesetzt oder sie stoßen in der Praxis auf Skepsis. Hartmann (2004, S. 2) belegt anhand verschiedener Studien, dass der Anteil innovativer Unternehmen in der Bauwirtschaft deutlich unterhalb dem Anteil innovativer Unternehmen in anderen Industriezweigen liegt. Diese Tendenz wird durch die Tatsache verfestigt, dass die meisten Unternehmen im Bauhauptgewerbe nur über eine sehr geringe Mitarbeiterzahl verfügen. So waren im Jahr 2010 in den 73.290 Betrieben des deutschen Bauhauptgewerbes 727.200 Mitarbeiter beschäftigt, woraus sich eine durchschnittliche Beschäftigtenzahl von 9,92 Mitarbeitern errechnen lässt. Noch geringer fällt die durchschnittliche Betriebsgröße bei Unternehmen des Ausbaugewerbes aus. Dort waren im Jahr 2009 in 227.600 Betrieben 689.000 Mitarbeiter beschäftigt, was einer durchschnittlichen Mitarbeiterzahl von 3,3 Personen entspricht (BMVBB 2011). Aus diesen Zahlen wird ersichtlich, dass der Großteil der Betriebe im Baugewerbe nicht über die Ressourcen für eine vertiefende, eigene bauorganisatorische Forschung verfügt.

Der Bedarf für die Entwicklung neuer Methoden zur Verbesserung von Planungs- und Bauabläufen wird in der Forschung aber als sehr hoch angesehen. Zülch und Börkircher (2006) stellen fest, dass die Bauwirtschaft zu den wichtigsten Sektoren der deutschen Wirtschaft zählt, sie aber dennoch „*weitgehend im Schatten der organisatorischen Forschung*“ liegt (Zülch und Börkircher 2006, S. 571). Einen ähnlichen Standpunkt vertreten Kuhne et al. (2000, S. 15): „*Während die Anforderungen an Planung und Herstellung von Bauwerken ständig gestiegen sind, so hat sich bei der Methodik und den Hilfsmitteln zur Ablauf- und Kostenplanung, zur Baustellensteuerung und zur Projektdatenverwaltung nicht viel getan. Die Verantwortlichen vor Ort werden mit einer immer größeren Flut von Daten konfrontiert, die zudem noch meist unstrukturiert und unzusammenhängend sind. Um aus diesen Daten mit den vor-*

handenen Werkzeugen nützliche und für eine wirtschaftliche Projektabwicklung erforderliche Informationen zu gewinnen, ist ein nicht mehr tragbarer manueller Aufwand nötig.“

Auch die schon zwei Jahrzehnte alte Feststellung von Nagel et al. (1990, S. 21) hat nicht an Aktualität eingebüßt. Die Autoren zählen insbesondere den Ausbau „zu den rückständigen Zweigen der Bauproduktion“. Als Grund nennen sie u.a.: „*Die bautechnische und bautechnologische Vorbereitung beruht auf empirischen Grundlagen. Die teilweise rechnergestützte Projektierung des Ausbaus muss noch auf unzureichenden theoretischen Grundlagen aufbauen und konnte deshalb nur Teilerfolge im Vorbereitungsbereich, aber keinen durchgängigen Fortschritt bringen*“ (Nagel et al. 1990, S. 22).

Ein Ansatzpunkt für die Unterstützung von Planungsleistungen im Bauwesen stellt das in den vergangenen Jahren bearbeitete DFG-Schwerpunktprogramm 1103 „Vernetzt-kooperative Planungsprozesse im Konstruktiven Ingenieurbau“ dar (Rüppel 2007). In diesem Schwerpunktprogramm wurden die Grundlagen für eine vernetzt-kooperative Planung zwischen verschiedenen Fachingenieuren im konstruktiven Ingenieurbau geschaffen. Unberücksichtigt blieben in diesem Schwerpunktprogramm die Belange der Arbeitsvorbereitung und der Bauausführung, so dass in dieser Fachrichtung nach wie vor ein hoher Forschungsbedarf besteht.

Die Herausforderungen der Arbeitsvorbereitung bestehen darin, dass die verantwortlichen Ingenieure unter hohem Zeitdruck eine große Menge an Parametern festlegen müssen, die über den Produktionsverlauf der Baumaßnahme entscheiden. Aufgrund der Komplexität des Bauprojektes, die in der großen Anzahl an verfügbaren Verfahren, Fertigungsstrategien, Ressourcen und Beteiligten begründet liegt, sind die Auswirkungen einer Parametervariation nur schwer zu prognostizieren. Der Zeitdruck führt dazu, dass eine detaillierte analytische Be- trachtung von Parameterkombinationen nicht möglich ist. Die individuellen Randbedingungen eines neuen Projektes bewirken, dass Erfahrungswerte aus abgeschlossenen Projekten nur eingeschränkt herangezogen werden können.

Doch welche Methodiken sind geeignet, die Planungsleistungen in der Arbeitsvorbereitung und der Bauausführung zu verbessern? Bauer (1994) fasst zu diesem Zweck die Grundlagen der Arbeitsvorbereitung und die notwendigen Instrumente in einem Buch zusammen. Hoffmann (2000, S. 7 ff.) warnt vor einem Outsourcing der wichtigen Aufgaben der Arbeitsvorbe- reitung und empfiehlt stattdessen die systematische Aus- und Weiterbildung der Mitarbeiter. Er entwickelt außerdem ein Rechenverfahren zur Ermittlung von Ausführungszeiten für Scha-

lungsarbeiten bei Wänden und Decken. *Hofstadler (2007)* schlägt die Verwendung von Interaktionsdiagrammen vor. Exemplarisch entwickelte er Diagramme für Stahlbeton- und Mauerwerksarbeiten, um Aufwandswerte unter Berücksichtigung einer Vielzahl von Einflüssen (wie z. B. die Anzahl der Arbeitskräfte und die Anzahl der Arbeitsstunden) besser abschätzen zu können. Die Auswirkungen der räumlichen Situation, die Verfügbarkeit von Betriebsmitteln (wie z. B. Krane, Aufzüge etc.) und die Wechselbeziehungen zwischen unterschiedlichen Gewerken, lassen sich jedoch mit diesen Methoden nicht im Vorfeld ermitteln. Obwohl die Aufwandswerte sehr schnell bestimmt werden können, gründet die Prognose des Bauablaufs unter Verwendung von Rechenverfahren oder Interaktionsdiagrammen nur auf einem kleinen Ausschnitt der Einflussparameter.

Weber (2006, S. 571) schlägt die Übernahme von Konzepten und Ideen aus der Automobilindustrie vor, um die Innovationsrate in der Bauwirtschaft zu erhöhen. Als geeignete Methode zur Betrachtung der Baustellenlogistik empfiehlt er die Simulation, jedoch mit der Anmerkung, dass die Unterschiede zur stationären Industrie zu beleuchten und für diese Unterschiede entsprechende Alternativen zu entwickeln sind.

Die Simulation zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass beliebig viele Einflussfaktoren in die Prognose des Produktionsablaufs mit einfließen können. In den stationären Industriezweigen hat sie sich in den vergangenen Jahrzehnten als Methodik zur Abschätzung der Folgen von Planungsentscheidungen etabliert. Für die Untersuchung stationärer Produktionsanlagen existieren bereits eine Vielzahl ausgereifter Simulatoren (wie z. B. Plant-Simulation oder Enterprise Dynamics), die die Durchführung von Simulationsstudien wesentlich vereinfachen. Unter Verwendung dieser Simulatoren können Produktionsanlagen schon vor ihrem Bau oder während ihres Betriebs systematisch getestet werden. Fehlplanungen können frühzeitig erkannt und beseitigt werden. Aber auch bereits bestehende Produktionsanlagen können anhand von Simulationsstudien betrachtet und mögliche Optimierungspotentiale aufgezeigt werden, ohne teure Eingriffe in die realen Produktionsanlagen vornehmen zu müssen.

Bevor eine Simulationsstudie für ein Produktionssystem durchgeführt wird, ist jedoch grundsätzlich die Simulationswürdigkeit des Systems zu überprüfen (*Wenzel et al. 2008, S. 14*). Als Kriterien für die Überprüfung der Simulationswürdigkeit werden im ASIM Leitfaden für Simulationsbenutzer in Produktion und Logistik (*vgl. ASIM 1997, S. 6*) genannt:

- das Beschreiten von Neuland
- das Erreichen analytischer Grenzen
- die Existenz komplexer Wirkungszusammenhänge, die die menschliche Vorstellungskraft überfordern
- das Experimentieren ist am realen System nicht möglich oder zu kostenintensiv
- das zeitliche Ablaufverhalten einer Anlage soll untersucht werden

Diese Kriterien werden in der Regel von einem Bauprojekt erfüllt. Das Errichten eines Bauwerks ist aufgrund des Unikatcharakters immer ein „Beschreiten von Neuland“. Die große Anzahl der Projektbeteiligten und der zu fertigenden Bauteile setzt der analytischen Betrachtung Grenzen und ist gleichzeitig ursächlich für die hohe Komplexität eines Bauprojektes. Experimente am realen System sind aufgrund des Unikatcharakters nur bedingt sinnvoll, da sich wichtige Randbedingungen beim nächsten Projekt grundlegend ändern können.

Doch warum hat sich die Simulation im Bauwesen bisher nicht durchsetzen können? Nach der *VDI-Richtlinie 3633, Blatt 1 (1993)*, wird die Simulationswürdigkeit eines Produktionssystems maßgeblich durch das Kosten-/Nutzen-Verhältnis der Simulationsstudie beeinflusst. Die Rentabilität einer Simulationsstudie im Bauwesen wird allein schon durch das individuelle Layout eines Bauvorhabens fast unmöglich. Die Modellierung des Layouts und die Eingabe aller projektrelevanten Parameter verursachen einen enormen Zeit- und damit auch Kostenaufwand. Hinzu kommt, dass für die Arbeitsvorbereitung in der Regel nur sehr wenig Zeit und Personal vorgesehen ist. Durch feste Terminvorgaben seitens des Auftraggebers kann der Zeitdruck noch verstärkt werden. *Hofstadler (2007, S. 37)* bezeichnet es als das „*Dilemma der Arbeitsvorbereitung*“, dass nur wenige Stunden aufgewendet werden können, „*in denen verschiedene Bauverfahren miteinander verglichen werden und verschiedene Möglichkeiten des Fertigungsablaufs, der Ressourcenverteilung, Baustelleneinrichtung, Bauwerkseinteilung und Unterteilung in Fertigungsabschnitte etc. untersucht werden*“. *Hofstadler (2007, S. 38)* sieht daher zwei Lösungsansätze, um die Arbeitsvorbereitung zu verbessern:

1. „*Ausdehnung der Zeit und der Ressourcen zur Durchführung der Arbeitsvorbereitung*
2. *bei gleichbleibenden Zeit- und Ressourcenverhältnissen oder gar Einschränkungen: Schaffung von Instrumenten zur Effektivitätssteigerung in der Arbeitsvorbereitung*“

Soll die Simulation in der Phase der Arbeitsvorbereitung eingesetzt werden, so sind daher nicht nur adäquate Simulationsmodelle zu entwickeln, sondern auch Werkzeuge, die eine schnelle und vereinfachte Modellierung und Parametrisierung der Simulationsmodelle ermöglichen. Die meisten aktuellen Forschungsansätze verwenden aus diesem Grund bausteinorientierte Simulationswerkzeuge (*König und Beißert 2008; Voigtmann und Bargstädt 2008; Weber 2007a*). Diese Simulationswerkzeuge ermöglichen es, Teile des Produktionssystems in Bausteinen abzubilden, die in Bausteinbibliotheken verwaltet werden. Vorhandene Bausteine können in neuen Projekten wiederverwendet werden. Außerdem können die Bausteine miteinander kombiniert werden, so dass sie sich den Erfordernissen von neuen Projekten anpassen lassen. „*Der Vorteil des Bausteinkonzepts ist, dass die Funktionalität eines Bausteines festliegt und vom Anwender nicht mehr hinterfragt werden muss (Rabe et al. 2008, S. 130).*“ Eine weitere Möglichkeit besteht darin, sogenannte Referenzmodelle zu entwickeln, die als Basis für die Implementierung von neuen Simulationsmodellen herangezogen werden können. „*Ein Referenzmodell umfasst eine systematische und allgemeingültige Beschreibung eines definierten Bereichs der Realität mit den für eine vorgegebene Aufgabenstellung relevanten charakteristischen Eigenschaften und legt das zugehörige Modellierungskonzept fest. Im Bereich der Simulation dienen Referenzmodelle als Konstruktionsschemata für den Entwurf von aufgabenbezogenen Simulationsmodellen (Wenzel 2000, S. 13).*“

Erheblich beschleunigen lässt sich die Modellierung von Simulationsmodellen aber auch durch die automatisierte Generierung von Modellen. *Rabe et al. (2008, S. 131)* unterscheiden drei Arten von automatisch generierten Modellen:

1. „*Generierung von Layoutdaten für das Simulationsmodell auf der Grundlage eines vorhandenen CAD-Layouts (...)*“
2. „*Erzeugung von Modellen mithilfe von Arbeitsplandaten, die beispielsweise in Datenbanken hinterlegt sein können (...)*“
3. „*Generierung ausführbarer Modelle auf Basis vorhandener (nicht ausführbarer) Modellbeschreibungen, beispielsweise anhand von ARIS-Prozessbeschreibungen (...)*“

Für die Anwendung dieser Konzepte lassen sich im Bauwesen jedoch bisher allenfalls Anfangserfolge im Bereich der Forschung vorweisen. Eine praxisrelevante Anwendung dieser Konzepte findet bisher nicht statt. Insbesondere der ausgeprägte Unikatcharakter der Bauprojekte macht die Entwicklung von allgemeingültigen Bausteinen, Referenzmodellen und Werkzeugen für die automatische Modellgenerierung schwierig.

Die Anwendung der Simulation kann in der Phase der Arbeitsvorbereitung aber dennoch zu erheblichen Wettbewerbsvorteilen führen, da im Bauwesen ein hohes Kostenrisiko auf Seiten des Auftragnehmers besteht. Angebote basieren auf Kostenschätzungen, die maßgeblich durch die vom Auftragnehmer eingesetzten Ressourcen beeinflusst werden.

Entscheidungen in der Phase der Bauablaufplanung im Zuge der Arbeitsvorbereitung eines Bauprojektes werden bisher oft intuitiv oder ausgehend von Erfahrungswerten getroffen. Dadurch bleiben viele wichtige Randbedingungen und Projektparameter bei der Entscheidungsfindung unberücksichtigt. Fehlen Erfahrungswerte ganz oder gehen sie in einem Unternehmen verloren, so lässt sich der Projektablauf nur sehr schwer voraussagen und Fehldispositionen können besonders schwerwiegende Auswirkungen haben.

Günthner und Kraul (2008, S. 8) sehen einen zusätzlichen Nutzen bei der Verwendung von Simulationsmodellen im Bauwesen: "Die Simulation bietet über die durch die Simulationsläufe ermittelten Daten hinaus einen weiteren, jedoch schwer quantifizierbaren Nutzen: Die für die Modellbildung unabdingbare Systematisierung des Bauablaufs erzwingt eine frühe, sehr eingehende Beschäftigung mit dem Bauprozess."

Insbesondere die Koordination der Arbeiten verschiedener Gewerke untereinander kann dadurch qualitativ verbessert werden, da die fehlende Vorhersagbarkeit des Bauablaufs zu terminlichen und räumlichen Konfliktsituationen führen kann. Entscheidungen, die während der Projektausführung von einzelnen Beteiligten getroffen werden, können Auswirkungen auf ganz andere Teilbereiche des Baugeschehens haben. Die Konsequenzen einer Entscheidung sind aber aufgrund der Komplexität des Baugeschehens für die einzelnen Akteure oftmals nicht vorhersehbar. Dieses Konfliktpotential führt dazu, dass zwischen den Arbeiten unterschiedlicher Gewerke in der Regel ausreichend große Zeitspannen offen gehalten werden, um problematische Überschneidungen zu vermeiden. Betriebsmittel sind dadurch oftmals länger als eigentlich notwendig an eine Baustelle gebunden.

Werden von einem Auftraggeber sehr enge terminliche Vorgaben gemacht, so kann es durch Fehlentscheidungen oder Störungen in den Phasen der Arbeitsvorbereitung und der Bauausführung zu empfindlichen Vertragsstrafen kommen. Eine verbesserte Vorhersage des Bauablaufes verspricht daher aus verschiedenen Gründen wirtschaftliche Vorteile für den Bauausführenden. Bei fehlender Erfahrung innerhalb der Bauleitung kann ein Werkzeug, das die Vorhersage des Bauablaufs ermöglicht, dabei helfen, Unsicherheiten zu überwinden und da-

über hinaus das Verständnis für ablaufbedingte Zusammenhänge verbessern. Dadurch wird es möglich, kritische Überschneidungen zwischen einzelnen Vorgängen bereits im Vorfeld vorherzusagen und entsprechende Vorbereitungen zur Vermeidung von Konflikten zu treffen. Die detaillierte Betrachtung von Fertigungsprozessen auf der Baustelle mit Hilfe der Simulation kann neue Optimierungsmöglichkeiten aufzeigen. Außerdem wird durch die Simulation die systematische Untersuchung verschiedener Ausführungsvarianten ermöglicht.

Bisher existieren für die Betrachtung von Bauprozessen aber noch keine Simulatoren, die in der Praxis auf eine breitere Akzeptanz stoßen.

1.2 Arbeitshypothese

Die Arbeitshypothese lautet, dass eine gewinnbringende Nutzung der Simulation im Hochbau unter bestimmten Randbedingungen möglich ist. Die Arbeitshypothese setzt voraus, dass

1. eine anwenderfreundliche Modellierungsumgebung verfügbar ist, die eine schnelle Parametrisierung des Modells ermöglicht.
2. diese Modellierungsumgebung einen Anwendungsbezug für den Hochbau besitzt.
3. die Modellgenerierung in Bezug auf das Layout und die Festlegung des Bauablaufs teilautomatisiert stattfindet.
4. projektunabhängige Bausteine oder Komponenten existieren, aus denen neue Modelle zusammengesetzt werden können.

Die mangelnde Verbreitung der Simulation in der Arbeitsvorbereitung wird darauf zurückgeführt, dass die bisher verwendeten Modellierungskonzepte für den Hochbau unzweckmäßig sind und die Aufbereitung der Projektparameter und der Randbedingungen der Projekte aufgrund des fehlenden Anwendungsbezugs vorhandener Simulationswerkzeuge zu zeitaufwendig ist. Es wird davon ausgegangen, dass die Integration einer Modellierungsumgebung in ein CAD-System den Aufwand einer Simulationsstudie für die Bauablaufsimulation im Hochbau erheblich senken kann.

Um die Grundlagen zur Überprüfung dieser Arbeitshypothese zu schaffen, werden im Zuge dieser Arbeit der Entwurf und die prototypische Implementierung einer CAD-integrierten Simulationsmodellierungsumgebung für die Entwicklung agentenbasierter Simulationsmodelle im Hochbau durchgeführt.

Die Systemarchitektur des Simulationswerkzeugs sieht eine automatische Generierung der Layoutdaten aus den CAD-Daten der Gebäudeplanung vor. Die Projektparameter werden über eine in eine CAD-Umgebung integrierte Anwenderoberfläche erfasst. In einem Prozessmodell werden alle Produktionsprozesse beschrieben. Die Verknüpfung dieses Prozessmodells mit den CAD-Daten soll eine teilautomatisierte Generierung des Bauablaufs ermöglichen. Die Verwendung eines agentenbasierten Modellierungskonzepts trägt den Tatsachen Rechnung, dass bei einer Baumaßnahme individuelle Randbedingungen vorliegen, die Produktion an vielen kleinen Produktionsstätten verteilt stattfindet, die Produktionsumgebung ständigen Veränderungen unterliegt und außerdem wechselnde Kooperationen zwischen den Akteuren einer Baumaßnahme erfolgen.

1.3 Zielsetzung

1.3.1 Wissenschaftliche Zielsetzung und Forschungsbedarf

Im Mittelpunkt der wissenschaftlichen Zielsetzung steht der Entwurf eines Referenzmodells für agentenbasierte Simulationsmodelle im Hochbau und die Entwicklung einer Prozessmodellierungsmethode, die eine teilautomatisierte Generierung des Bauablaufs auf der Basis von CAD-Daten ermöglicht. Die notwendigen wissenschaftlichen Teilziele lassen sich in folgende Punkte einteilen:

1. analytische Betrachtung von existierenden Simulationsmodellen für den Hochbau mit einer Identifikation von Entwicklungstrends
2. Systemanalyse von Hochbau-Baustellen als Grundlage für die Entwicklung des Referenz- und des Prozessmodells
3. analytische Betrachtung verschiedener Prozessmodelle für den Hochbau
4. Entwurf einer Integration von Prozess- und Gebäudemodell als Datenbasis für die Simulation
5. Entwurf eines agentenbasierten Referenzmodells für die Simulation im Hochbau
6. Verifikation und Validierung der implementierten Werkzeuge und des Simulationsmodells

1.3.2 Abgrenzung der wissenschaftlichen Zielsetzung

Der Entwurf einer Integration von Prozess- und Gebäudemodell beschränkt sich lediglich auf die Belange der Arbeitsvorbereitung im Rahmen von Simulationsstudien und der Terminplanung. Weitere mögliche Anwendungsfelder einer solchen Integration, wie z. B. für die Kalkulation, werden nicht betrachtet. Eine Betrachtung von umfangreicheren Produktmodellen, die den Anspruch haben alle Phasen eines Bauprojektes zu integrieren, findet daher nur am Rande statt. Die Integration wird nicht für die Entwicklung von sogenannten 4-D-Simulationsmodellen verwendet, in deren Mittelpunkt die Visualisierung von Terminplänen steht. Vielmehr soll durch die Integration von Prozess- und Gebäudemodell eine teilautomatisierte Sequenzierung von Bauvorgängen für die Bauablaufsimulation erreicht werden.

Die Entwicklung eines eigenen Gebäudemodells für die Simulation wird in der vorliegenden Arbeit nicht angestrebt. Verwendet wird ein schon existierendes, bauteilorientiertes 3-D-Gebäuudemodell, welches lediglich um simulationsrelevante Eigenschaften erweitert wird. Das Hauptaugenmerk wird auf die Entwicklung des Prozessmodells gelegt, in welchem die in der Gebäudestruktur enthaltenen Informationen für eine Sequenzierung des Bauablaufs verwendet werden.

Im Rahmen dieser Arbeit findet keine Untersuchung von Verfahren zur Optimierung der Simulationsergebnisse statt. Eine Erweiterung der entwickelten Systemarchitektur um Optimierungsverfahren ist jedoch ohne Weiteres denkbar (siehe Kapitel 7.4).

1.3.3 Zielsetzung in Bezug auf die prototypische Implementierung

Als Ergebnistransfer der wissenschaftlichen Zielsetzung soll im Rahmen dieser Arbeit eine CAD-integrierte Simulationsmodellierungsumgebung für die Entwicklung agentenbasierter Simulationsmodelle im Hochbau (CiSmo) entwickelt werden. Dieses Simulationssystem soll der Unterstützung der Planungsaufgaben der Arbeitsvorbereitung und der Bauausführung im Hochbau dienen. Denkbar ist auch eine Nutzung des Simulationssystems im wissenschaftlichen Bereich bei der Durchführung von Sensitivitätsanalysen, um beispielsweise die Einflüsse einzelner Projektparameter besser einschätzen zu können. Die Anforderungen an das Simulationssystem orientieren sich an den Aufgaben der Arbeitsvorbereitung und der Ablaufkontrolle und -steuerung während der Bauausführung.

Drees und Spranz (vgl. 1976, S. 11) nennen als Planungsaufgaben der Arbeitsvorbereitung:

- den **Verfahrensvergleich** („*Auswahl des wirtschaftlichsten Bauverfahrens*“)
- die **Bauablaufplanung** („*Planung des Bauablaufs*“)
- die **Bereitstellungsplanung** (Bereitstellung „*von Arbeitskräften, Baustoffen und Maschinen*“)
- die **Baustelleneinrichtung**

Die Aufgaben der Ablaufkontrolle und -steuerung bestehen darin (vgl. Bauer 1994, S. 646 ff.)

- den **Ist-Ablauf mit den Vorgaben des Ablaufplans zu vergleichen,**
- den **weiteren Ablauf zu prognostizieren,**
- und mit Steuerungsmaßnahmen **den Ist-Ablauf wieder dem Soll anzunähern.**

Um im Vorfeld einer Baumaßnahme Verfahrensvergleiche durchzuführen und verschiedene Bauablaufplanungen, Logistikkonzepte und Baustelleneinrichtungspläne zu prüfen, muss der Planende in der Lage sein, zuverlässige Prognosen des Bauablaufs zu erstellen. Das Simulationssystem soll der Generierung dieser Prognosen dienen und gleichzeitig eine schnelle Integration der wichtigsten projektrelevanten Parameter und Randbedingungen in ein projektspezifisches Simulationsmodell ermöglichen, so dass der Ausführungsplaner die Auswirkungen seiner Entscheidungen besser abschätzen kann.

Das Simulationssystem soll in der Lage sein Projekte abzubilden, die den Bau von mehrgeschossigen Wohn- und Geschäftshäusern betreffen. Aufgrund der Diversität in Bezug auf die Randbedingungen und Parameter der Bauprojekte müssen die zu entwickelten Modellkomponenten des Simulationsmodells eine hohe Flexibilität aufweisen. Es muss möglich sein, im Simulationssystem beliebige Gebäudemodelle mit den sich aus dem Gebäudeaufbau ergebenen Bauprozessen mit den benötigten Ressourcen (Arbeitskräfte, Material und Betriebsmittel) zu erfassen, zu kombinieren und zu simulieren.

Im Zuge von Simulationsexperimenten kann der Einsatz verschiedener Verfahren und Bauablaufvarianten unter Einbezug logistischer Aspekte (z. B. Weglängen und Lagerkoordinaten), der Platzierung von Baustelleneinrichtungselementen und der möglichen systematischen Variation wichtiger Systemparameter (z. B. Anzahl und Ausbildungsstand der Arbeitskräfte, Anzahl und Leistung der Betriebsmittel) simuliert werden. Als Ergebnisse der Experimente sollen Aussagen über die Wirtschaftlichkeit und den Zeitablauf verschiedener Verfahren und

Bauablaufvarianten ermöglicht werden. Als Grundlage für die Bauausführung sollen aus den Resultaten der Simulationsexperimente detaillierte Terminpläne erstellt werden.

Im Fokus der Arbeit steht der Brückenschlag zwischen der Berücksichtigung möglichst vieler Randbedingungen und Projektparameter in einem Simulationsmodell und der wirtschaftlich sinnvollen Anwendung der Simulation in der Bauorganisation und im Baubetrieb. Um die Wirtschaftlichkeit für den Einsatz des Simulationssystems zu gewährleisten, soll die Modellbildung durch einen hohen Automatisierungsgrad beschleunigt werden und die Eingabe der Systemparameter für das Simulationsmodell durch anwenderfreundliche Eingabefenster im CAD-System erleichtert werden. Die komplette Modellierung und Parametrisierung des Simulationsmodells findet daher im CAD-System statt. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass CAD-Systeme eine für die meisten Ingenieure vertraute Arbeitsumgebung darstellen, was zusätzlich die Einführung der Simulation in die Baupraxis erleichtert (*vgl. Chahrour 2007, S. 1*). Folgende Punkte sollen bei der prototypischen Implementierung berücksichtigt werden:

- automatische Generierung des Modelllayouts durch die Verwendung von CAD-Daten aus der Entwurfsplanung (Gebäudemodell)
- wiederverwendbare und modular aufgebaute Beschreibung der Bauprozesse (Prozessmodell)
- automatische Generierung des Bauablaufs aus dem Gebäude- und dem Prozessmodell
- flexibel einsetzbare und miteinander kombinierbare Agenten und Ressourcen (Simulationsmodell)
- einfache Eingabe und Variation der Projektparameter durch Anwendungsfenster im CAD-System
- Implementierung eines Werkzeugs zur Auswertung der Simulationsergebnisse in Form von Terminplänen

In Abbildung 1.1 wird dargestellt, durch welche Zielsetzungen die verschiedenen Phasen einer Simulationsstudie beschleunigt werden sollen. Außerdem enthält die Abbildung die Daten, die in der jeweiligen Phase erfaßt oder ausgewertet werden.

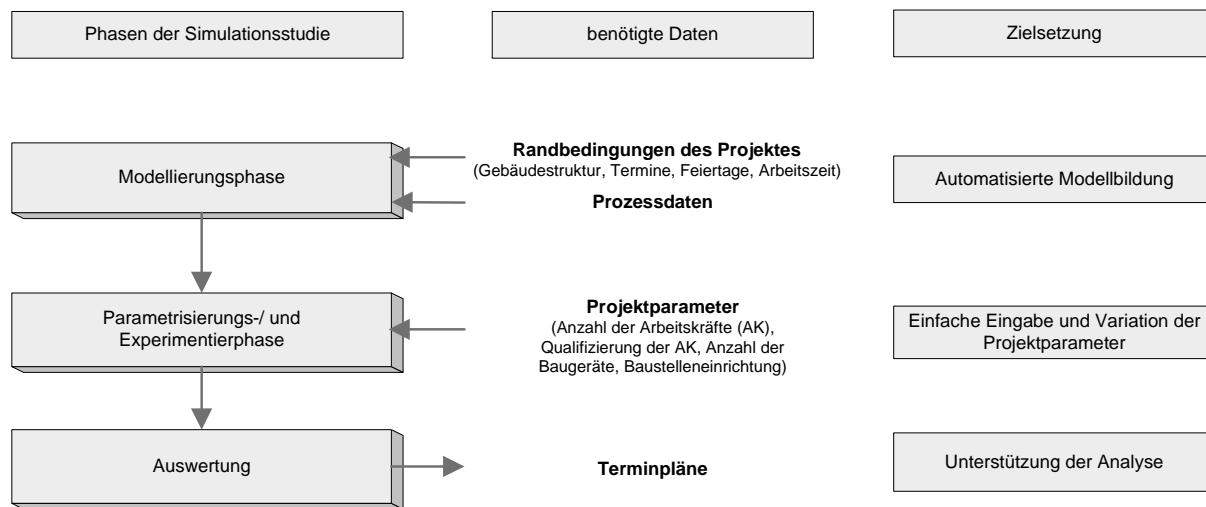


Abbildung 1.1: Zielsetzungen in Bezug auf die Phasen einer Simulationsstudie

Ziel ist es vor allem, eine Verringerung des zu leistenden Arbeitszeitaufwandes in den Phasen der Modellbildung und der Parametrisierung des Simulationsmodells zu erreichen. Diese beiden Phasen beanspruchen in der Regel einen hohen Prozentsatz des gesamten Arbeitszeitaufwandes einer Simulationsstudie (*vgl. Chahrour und Franz 2004, S. 337*).

1.3.4 Systemarchitektur

In der baubetrieblichen Forschung gibt es bereits verschiedene Ansätze, um sich der Zielsetzung einer beschleunigten und vereinfachten Modellbildung zu nähern. Von *Weber (2007b)* wurden CAD-Daten verwendet, um die Systemlast für die Simulation der Baustellenlogistik zu erhalten. *Chahrour (2007)* integrierte die Modellierung von Simulationsmodellen über ein simulationsspezifisches Produktmodell für den Erdbau in eine CAD-Umgebung, um Daten aus den CAD-Plänen für die Simulation verwenden zu können. *Halpin, AbouRizk und Mohamed (2006)*, *Weber (2007b)*, *König und Beißert (2008)* und *Voigtmann und Bargstädt (2008)* verwenden bausteinorientierte Simulationswerkzeuge, um Simulationsmodelle modular mit wiederverwendbaren Bausteinen schneller implementieren zu können. All diese Ansätze haben letztendlich hervor, dass die Akzeptanz der Simulation im Bauwesen von der Verfügbarkeit einfach anzuwendender Modellierungswerkzeuge und damit von einer Beschleunigung der Phase der Modellbildung abhängig ist.

Der weitergehende Ansatz der vorliegenden Arbeit besteht darin, dass der Automatisierungsgrad der Modellbildungsphase gesteigert werden soll und mit dem agentenbasierten Modellierungskonzept ein neues Simulationsparadigma zur Anwendung kommt. Um den Automatisierungsgrad der Modellbildung zu steigern, wird ein CAD-System mit einem bauteilorientierten

Gebäudemodell verwendet. Bauteilorientierte Gebäudemodelle bestehen aus 3-dimensionalen Bauteilen, aus denen sich das Gesamtgebäude zusammensetzt. Die Informationen, die ein Bauteil betreffen, wie z. B. die Koordinaten, die Bauteilabmessungen und die Baumaterialien werden objektorientiert direkt dem Bauteil als Eigenschaften zugewiesen. Diese Daten können dadurch automatisch erfasst und für die Simulation weiterverwendet werden. Über die Koordinaten der Bauteile kann aus bauteilorientierten Gebäudemodellen aber auch der Aufbau des Gebäudes ausgelesen werden. Durch die Ergänzung der Informationen aus der Aufbaustruktur des Gebäudes mit einem Prozessmodell, kann ein möglicher Bauablauf und damit die Ablaufstruktur des Simulationsmodells bestimmt werden.

Den Bauteilen eines bauteilorientierten Gebäudemodells lassen sich außerdem in der Regel zusätzliche Eigenschaften zuweisen. Dadurch können für die Produktion und die Simulation relevante Eigenschaften dem Gebäudemodell hinzugefügt werden. Besitzt das Gebäudemodell alle für die Simulation notwendigen Daten und wird es mit einem Prozessmodell verknüpft, so ist es möglich, aus diesen Daten ein Simulationsmodell automatisch zu erstellen. Die Daten des Prozessmodells sollten jedoch unabhängig von den CAD-Daten in einer eigenen Datenbank gespeichert werden, um sie einfacher für neue Projekte wiederverwenden zu können (siehe Abbildung 1.2).

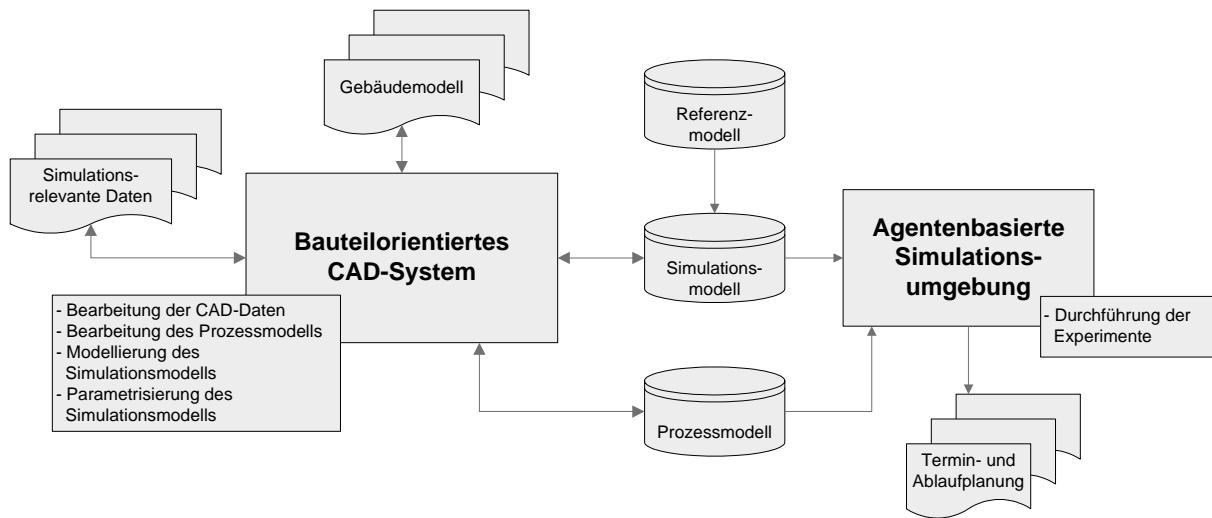


Abbildung 1.2: Systemarchitektur des Simulationssystems (Kugler und Franz 2008, S. 155)

Aus dem Gebäudemodell soll in Kombination mit den Daten des Prozessmodells automatisch ein agentenbasiertes Simulationsmodell generiert werden. Dazu muss der Anwender weitere, simulationsrelevante Daten innerhalb der CAD-Umgebung spezifizieren. So wird z. B. die Baustelleneinrichtung über einen eigenen Layer direkt in das Gebäudemodell eingezeichnet.

Über zusätzliche Anwendungsfenster können die Daten von Betriebsmitteln eingegeben und die Anzahl und die Qualifikation von Arbeitskräften festgelegt werden.

Ähnlich wie bausteinorientierte Simulationsumgebungen bieten agentenbasierte Simulationsumgebungen die Möglichkeit, das Simulationsmodell modular aufzubauen. Vordefinierte Agenten mit Verhaltensweisen können für die Bewältigung von bestimmten Aufgaben miteinander kombiniert werden. Die Agenten interagieren mit anderen Agenten nicht wie Bausteine über Schnittstellen, sondern über den Austausch von Nachrichten. Agenten besitzen außerdem eine eigene Wahrnehmung, durch die sie sich besonders gut in einer dynamischen und heterogen strukturierten Produktionsumgebung zurechtfinden können. Passive Modellelemente können als Ressourcen in ein agentenbasiertes Modell integriert werden. Diese Ressourcen besitzen kein eigenes Verhalten, sie können aber von den Agenten bearbeitet und verändert werden.

Die Betriebsmittel und die Facharbeiter einer Baustelle lassen sich als Agenten darstellen, die für ein neues Simulationsmodell von einer Agentenklasse instanziert und parametrisiert werden können. Passive Systemelemente einer Baustelle, wie Materialien, Bauteile und Bauhilfsstoffe können als Ressourcen abgebildet werden und ebenfalls von vordefinierten Ressourcenklassen instanziert werden. Innerhalb einer sogenannten „Situation“, in der die Ausgangskonfiguration eines Simulationslaufs festgelegt wird, können die instanzierten Agenten und Ressourcen auf der Grundlage der CAD-Daten und von Benutzereingaben platziert werden.

1.4 Aufbau und Methodik der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel (siehe Abbildung 1.3). Im ersten Kapitel wird die Ausgangssituation in der Arbeitsvorbereitung geschildert und die Motivation für die Arbeit dargelegt. Ausgehend von einer Arbeitshypothese werden die wissenschaftliche Zielsetzung und die Zielsetzung in Bezug auf die prototypische Implementierung des Simulationssystems skizziert.

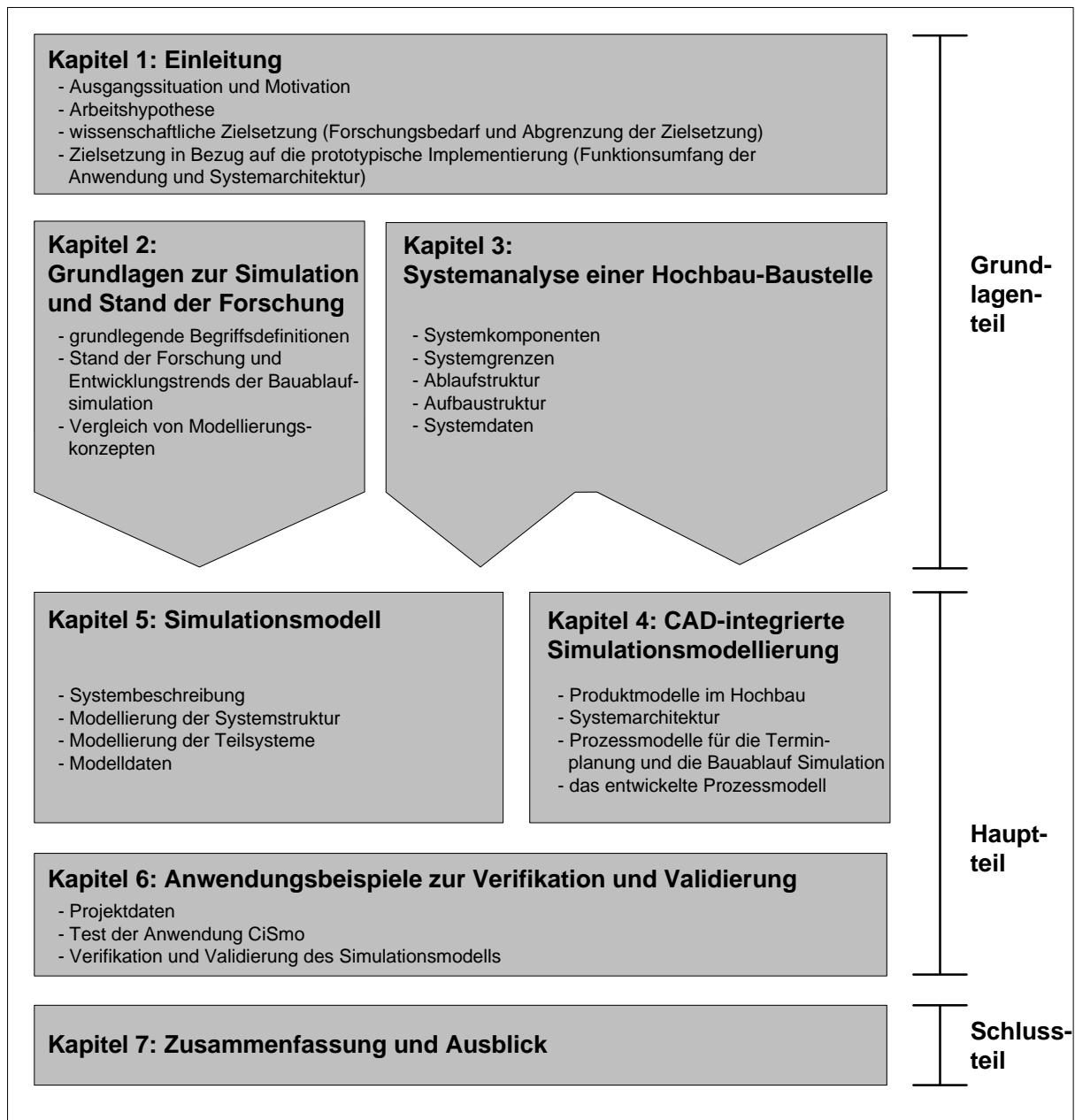


Abbildung 1.3: Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 werden zunächst Begriffsdefinitionen zur Simulation erarbeitet. Darauf aufbauend erfolgt die Darstellung der aktuellen Forschungstätigkeiten im Bereich der baubetrieblichen Simulation. Ausgehend von dieser Darstellung werden die Schwerpunkte der Arbeiten gegenübergestellt und eine Identifikation von aktuellen Entwicklungstrends in der Bauablaufsimulation durchgeführt. Nachfolgend werden Definitionen in Bezug auf das in dieser Arbeit verwendete multiagentenbasierte Modellierungskonzept erläutert und anhand eines Vergleichs verschiedener Modellierungskonzepte die Besonderheiten der agentenbasierten Simulation herausgearbeitet.

Kapitel 3 enthält eine umfangreiche Systemanalyse einer Hochbaustelle. Behandelt werden die wichtigsten Systemkomponenten, die Systemgrenzen sowie die Ablauf- und Aufbaustruktur des Systems „Hochbau“.

Aufbauend auf die in Kapitel 3 erfolgte Systemanalyse wird in Kapitel 4 ein eigenes Prozessmodell für die CAD-integrierte Simulationsmodellierung der Bauablaufsimulation im Hochbau erarbeitet. In Ergänzung zu der Systemanalyse werden in diesem Kapitel Forschungsarbeiten betrachtet, in denen eine Verbindung von Gebäude- und Prozessmodell verwendet wurde. Außerdem wird in Kapitel 4 die auf dem Prozessmodell aufbauende prototypische Anwendung CiSmo vorgestellt, die der Modellierung und Parametrisierung von Simulationsmodellen für die Bauablaufsimulation im Hochbau dient.

Kapitel 5 enthält eine Darstellung des Simulationsmodells, das in der Modellierungsumgebung CiSmo modelliert und parametrisiert wird.

In Kapitel 6 wird sowohl die Modellierungsumgebung CiSmo, wie auch das in der Modellierungsumgebung generierte Simulationsmodell anhand von Anwendungsbeispielen validiert und verifiziert.

Kapitel 7 enthält eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse der Arbeit und einen Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungstätigkeiten.

2 Grundlagen zur Simulation und Stand der Forschung

Das Kapitel 2 behandelt für die Arbeit grundlegende Definitionen zur Simulation und den Stand der Forschung in der baubetrieblichen Simulation.

Im Unterkapitel 2.1 werden zunächst wichtige Begriffsdefinitionen zur Simulation erläutert. Darauffolgend wird im Unterkapitel 2.2 das in der Arbeit verwendete Vorgehensmodell für die Durchführung einer Simulationsstudie behandelt.

Unterkapitel 2.3 enthält einen Überblick über die verschiedenen Anwendungsfelder der Simulation im Bauwesen. Danach werden speziell die aktuellen Forschungsarbeiten im Bereich der baubetrieblichen Simulation betrachtet. Die Möglichkeiten der Simulation im baubetriebswirtschaftlichen Bereich werden nur exemplarisch anhand einiger Beispiele dargestellt, während die für die Arbeit relevantere Bauablaufsimulation in einer umfangreichen Literaturrecherche behandelt wird. Aufbauend auf die Literaturrecherche erfolgt anschließend eine Zusammenfassung der erkennbaren Trends und der Schwerpunkte der wissenschaftlichen Arbeiten im Bereich der Bauablaufsimulation.

Das in der Arbeit verwendete agentenbasierte Modellierungskonzept wird in Unterkapitel 2.4 erläutert. Zunächst wird der Agentenbegriff behandelt. Danach wird der Aufbau von Multiagentensystemen und von multiagentenbasierten Simulationsmodellen dargestellt. Im Folgenden werden Beispiele für die Anwendung von multiagentenbasierten Simulationsmodellen genannt. Anhand eines Vergleichs mit anderen Modellierungskonzepten werden die Besonderheiten des multiagentenbasierten Modellierungskonzepts herausgearbeitet. Aufbauend auf diesen Vergleich wird dargestellt, welche Vorteile die Agentenorientierung bei der Simulation von Bauprozessen bietet.

2.1 Grundlegende Definitionen zur Simulation

Der Begriff „Simulation“ wird für den Bereich der Logistik-, Materialfluß- und Produktionsysteme in der *VDI-Richtlinie 3633 (VDI 3633 - Blatt 1 1993, S. 2)* folgendermaßen definiert:

„Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. Insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt.“

Weiter wird in der *VDI-Richtlinie 3633 (VDI 3633 - Blatt 1 1993, S. 3)* unter einem Modell „*eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System*“ verstanden. Modelle werden nach folgenden Merkmalen klassifiziert (*VDI 3633 - Blatt 1 1993, S. 14*):

- „**Experimentierbarkeit** (experimentierbar / nicht experimentierbar)
- **Beschreibungsmittel** (symbolisch / physisch / hybrid / formal / abstrakt / gedanklich / graphisch / textuell)
- **Beschreibungsart** (digital / analog)
- **Beschreibungsmedium** (Software / ...)
- **Zufallsverhalten** (stochastisch / deterministisch)
- **Zeitverhalten** (dynamisch / statisch)
- **Zeitablauf** (kein Zeitablauf / diskret / quasikontinuierlich / kontinuierlich)
- **Zeitablaufsteuerung** (ereignisgesteuert / prozeßorientiert / aktivitätsorientiert / transaktionsorientiert / zeitgesteuert)“

Der im Simulationsmodell verwendete Zeitablauf wird auch als Simulationsmethode bezeichnet. Die Simulationsmethode beschreibt die Art und Weise des Zeitfortschrittes im Modell und besitzt daher einen großen Einfluss auf die in einem Modell stattfindenden Abläufe. Die Veränderung der Systemzeit kann entweder über die diskrete oder über die kontinuierliche Simulationsmethode erfolgen. Bei der kontinuierlichen Simulationsmethode wird von einer über die Zeit stetigen Zustandsänderung des Modells ausgegangen. Der Zustand des Systems zu einem Zeitpunkt wird über miteinander verkoppelte Differentialgleichungen berechnet. Bei diskreten Simulationsmodellen wird der Zustand des Systems nur zu diskreten Zeitpunkten bestimmt. Es wird davon ausgegangen, dass sich der Zustand des Systems zwischen zwei diskreten Zeitpunkten nicht verändert (vgl. Kuhn und Wenzel 2008, S. 78 f.).

Die Zeitablaufsteuerung beschreibt in welcher Form die Simulationszeit inkrementiert wird und damit auch wann der Zustand des Modells neu berechnet wird. Während bei der diskreten zeitgesteuerten Simulation die Simulationszeit jeweils um ein konstantes Zeitinkrement erhöht wird, findet bei der ereignisorientierten Simulation ein Zeitfortschritt nur bei dem Eintritt eines Ereignisses statt (vgl. Kuhn und Wenzel 2008, S. 78 f.).

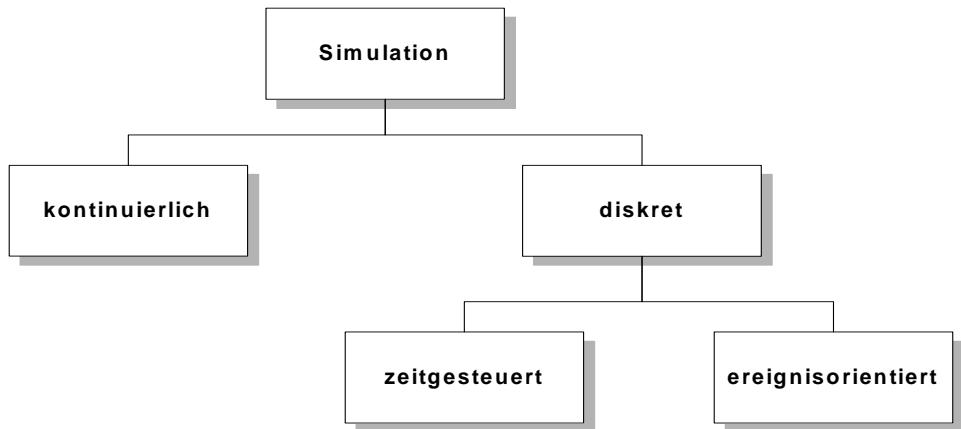


Abbildung 2.1: Klassifikation von Simulationsmethoden (Wenzel 2000, S. 8)

Das Modellierungskonzept eines Simulationsmodells „bestimmt das Regelwerk zur Strukturierung und Modellierung des betrachteten Systems. (...). Es prägt Methodik und Vorgehensweise des Systementwurfs mit und hat dadurch einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die Modellstruktur des abzubildenden Systems“ (Kuhn und Wenzel 2008, S. 80). Die für die Implementierung der Simulationsmodelle verfügbaren Simulationswerkzeuge basieren in der Regel auf nur einem bestimmten Modellierungskonzept. Eine Auseinandersetzung mit den Eigenarten und Möglichkeiten der Modellierungskonzepte ist daher vor der Auswahl eines Simulationswerkzeugs dringend erforderlich. Kuhn und Wenzel (vgl. 2008, S. 80) unterscheiden folgende vier Modellierungskonzepte:

- **Sprachkonzepte** – Simulationsmodelle werden in Programmier- oder Simulations-sprachen umgesetzt, wodurch eine hohe Flexibilität bei der Modellbildung gewährleistet wird.
- **Generische Konzepte** – Zu den generischen Konzepten zählen objektorientierte Modellierungskonzepte, deren Schlüsselabstraktion Objekte darstellen und Entity-Relationship Modelle, die aus Entitäten und den Beziehungen (Relationships) zwischen diesen Entitäten bestehen.
- **Theoretische (mathematische) Konzepte** – Dies sind formal aufgebaute Modelle, die sich meist durch mathematische Modelle beschreiben lassen. Dazu zählen Automaten-theoretische Konzepte, Petri-Netz-Konzepte und Warteschlangennetze.
- **Anwendungsorientierte Modellierungskonzepte** – Diese orientieren sich bei der Begrifflichkeit an den Anwendungssystemen. Zu diesem Modellierungskonzept zählt

das Bausteinkonzept, in dem vordefinierte parametrisierbare Elemente bestehen, aus denen die Modelle erstellt werden können.

Aufgrund des großen Einflusses, den das Modellierungskonzept auf die Modellstruktur ausübt, sollte das Modellierungskonzept immer auf die Eigenschaften des realen Systems und den Verwendungszweck des Simulationsmodells abgestimmt sein.

2.2 Simulation im Bauwesen

Die vielen verschiedenen Arbeitsfelder im Bauwesen stellen ein großes Anwendungsspektrum für Simulationen dar. Die Anforderungen an einen Simulator sind aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der zu untersuchenden Systeme, den unterschiedlichen Anwendungsbe reichen und den Fragestellungen in den diversen Fachrichtungen sehr heterogen.

Mukherjee (2005, S. 10 f.) verwendet für die Klassifikation der für das Bauwesen verfügbaren Simulatoren drei verschiedene Ansätze. Diese Ansätze unterscheiden die Simulatoren nach ihrer Fachrichtung, dem Umfang des Anwendungsbereiches und den Eingriffs- und Steuerungsmöglichkeiten der Anwender. Konkret teilt er die Simulatoren wie folgt ein:

1. Klassifikation nach der Fachrichtung:

- Simulation von Bauabläufen
- Simulation baubetriebswirtschaftlicher Prozesse (Parameter/Faktoren)

2. Klassifikation nach dem Umfang des Anwendungsbereiches:

- für einen bestimmten Anwendungsbereich (Verwendungszweck) spezialisiertes Simulationswerkzeug (Special Purpose Simulations – SPS)
- für mehrere oder einen universellen Anwendungsbereich programmierbare Simulationswerkzeuge (General Purpose Simulations – GPS)

3. Eingriffs- und Steuerungsmöglichkeiten der Anwender während der Simulationslaufzeit:

- interaktive Simulatoren
- nicht interaktive Simulatoren

Die Klassifikation nach der Fachrichtung bezieht sich jedoch lediglich auf Simulationen im baubetrieblichen Bereich, während andere Anwendungsgebiete im Bauwesen nicht mit einbezogen werden. Beispielhaft seien hier weitere Anwendungsgebiete genannt:

1. Simulation des Verhaltens der Gebäudestruktur (Statik, Bauphysik)
2. Simulation von Umgebungsbedingungen (Bodenverhalten, Gewässer- und Luftströmungen)
3. Simulation der Planungsvorgänge im konstruktiven Bereich
4. Simulation in der Raum-, Stadt- und Verkehrsplanung

Für jedes dieser Anwendungsgebiete sind außerdem verschiedene Nutzungsformen der Simulation möglich. *Kuhn und Wenzel* (vgl. 2008, S. 76) nennen vier solcher Nutzungsformen:

1. die Kompetenzvermittlung
2. die Kenntnisvermittlung
3. die Erkenntnisgewinnung
4. und die Entscheidungsunterstützung

Die Entscheidung für eine Simulationsmethode und ein Modellierungskonzept ist im Wesentlichen von den Systemeigenschaften des Anwendungsgebiets und der Nutzungsform abhängig. Um ein geeignetes Konzept auszuwählen, ist eine gründliche Analyse der Systemeigenschaften Grundvoraussetzung. Das Anwendungsgebiet (reale System) sollte maßgeblich mit darüber entscheiden, welches Modellierungskonzept verwendet wird. In der Praxis zeigt sich beispielsweise, dass bei der Simulation der Umgebungsbedingungen fast ausschließlich numerische Simulationen verwendet werden (*siehe z.B.: Fiedler 2006; Busse et al. 2007*), während bei Simulationsmodellen im Bereich der Raum-, Stadt- und Verkehrsplanung häufig agentenbasierte Simulationsmodelle zur Anwendung kommen (*siehe z.B.: Bauriedel et al. 2006; Pawlaszczyk 2006*).

2.2.1 Baubetriebswirtschaftliche Simulation

Baubetriebswirtschaftliche Simulatoren werden vorwiegend in der Lehre oder in Schulungen eingesetzt. Meist handelt es sich dabei um interaktive Simulatoren, bei denen der Anwender während des Simulationslaufs aktiv in das Simulationsgeschehen eingreift. Sie dienen der Weiterentwicklung von beruflichen Fähigkeiten, wie z. B. der Verhandlungsführung und der Vorgehensweise bei der Angebotsbearbeitung oder der Kostenschätzung. Die Managementfähigkeiten der Anwender können anhand eines solchen Simulators überprüft und verbessert werden, ohne dass diese Versuche Kosten in der Realität verursachen. Über stochastische Parameter werden in den Simulatoren künstliche Ausgangssituationen generiert, auf die der

Anwender reagieren muss. Während der Simulation kann der Anwender verschiedene Strategien verwenden und die Auswirkungen dieser Strategien unmittelbar nachvollziehen.

Nassar (2002) entwickelte ein Multiplayer-Simulationsspiel, das den Einfluss verschiedener Kauf- und Verkaufsstrategien für Ausrüstungsgegenstände auf den wirtschaftlichen Erfolg eines Bauunternehmens simuliert. Das Spiel wurde als Excel-Plugin unter Verwendung der Programmiersprache Visual Basic for Applications (VBA) implementiert (*Nassar 2002, S. 23*). Berücksichtigt wird in dem Spiel u. a. der Einfluss des Alters von Baumaschinen auf die Produktivität und die Reparaturkosten des Unternehmens. Die Strategien für den Neukauf oder den Verkauf der Baumaschinen wird über einen Zeitraum von mehreren Jahren simuliert. Zu Beginn eines Geschäftsjahres muss der Anwender entscheiden, ob er eine Baumaschine für ein weiteres Jahr behält oder ob er sie verkauft. Die Anzahl der Baumaschinen muss vom Anwender auf die Nachfrage der Bauleistungen abgestimmt werden. Die Nachfrage selbst ist abhängig von stochastischen Parametern. Der Erfolg des Spielers wird abschließend am erreichten Buchwert des Unternehmens gemessen.

Von *Mukherjee et al. (2004)* wurde ein multiagentbasiertes Software-Werkzeug für allgemeine Anwendungszwecke (general purpose multi-agent framework) entwickelt, mit dem situationsbezogene, interaktive Simulationen im baubetriebswirtschaftlichen Anwendungsgebiet erstellt werden können.

Basierend auf diesem Werkzeug wurde von Mukherjee ein virtueller Trainer (Virtual Coach) entwickelt, der insbesondere Bauingenieursstudenten und Berufsanfängern ein Verständnis für die Auswirkungen baubetriebswirtschaftlicher Entscheidungen vermitteln soll (*Mukherjee 2005*). Während eines Simulationslaufes kann der Anwender interaktiv Ressourcenzuweisungen verändern und die Auswirkungen seiner Entscheidungen im Simulationsmodell nachvollziehen.

Als Simulator, der sich an der Schnittstelle zwischen Bauablauf- und Baubetriebswirtschaftlicher Simulation einordnen lässt, ist das Spiel „Buildung & Co.“ des französischen Entwicklers *Creative Patterns* zu nennen (www.creative-patterns.com 2010). Dieses Spiel befasst sich sowohl mit dem Bauablauf, wie auch mit den baubetriebswirtschaftlichen Aspekten eines Bauprojektes. Die Bauabläufe werden teilweise sehr realitätsgerecht simuliert. Der Anwender übernimmt die Steuerung eines Bauprojektes und muss sowohl betriebswirtschaftliche, als auch bauorganisatorische Entscheidungen treffen, um das Bauprojekt zum Erfolg zu führen.

Obwohl das Spiel keinen wissenschaftlichen Hintergrund besitzt und sich die Ergebnisse der Spielabläufe nicht ohne Weiteres in die Realität übertragen lassen, eignet sich das Spiel dennoch um Zusammenhänge zwischen Bauabläufen und baubetriebswirtschaftlichen Entscheidungen deutlich zu machen und Managementfähigkeiten zu schulen.

Für einen ausführlichen Überblick über die geschichtliche Entwicklung der baubetriebswirtschaftlichen Simulation bis in das Jahr 2002 wird auf *Nassar (2002)* verwiesen.

2.2.2 Bauablaufsimulation

Bauablaufsimulationen lassen sich unterscheiden in Simulationsmodelle für den Hoch- und den Tiefbau. Beide Anwendungsfelder stellen grundsätzlich unterschiedliche Anforderungen an die Simulationsmodelle. Größere Tiefbaustellen sind meistens Linienbaustellen, bei denen sich Material, Geräte und Personal in Abhängigkeit vom Baufortschritt an der Baustelle entlang bewegen. Die auszuführenden Tätigkeiten, wie die Bodenverfestigung des Unterbaus und die darauffolgende Herstellung der Trag-, der Binder- und der Deckschicht, verändern sich entlang der Trasse einer Linienbaustelle nicht oder nur im geringen Umfang. Lediglich die Geländegegebenheiten, wie z. B. die Geologie und die auf- oder abzutragenden Erdmassen, verändern sich maßgebend im Verlauf der Baumaßnahme. Die wesentlichen Herausforderungen bei der Simulation im Tiefbau bestehen daher aus der Integration der Trassierung und der mit der Trassierung verbundenen Erdmassenbewegungen in die Simulation.

Aufgrund der immer wiederkehrenden gleichen Abläufe entlang einer Linienbaustelle lassen sich Tiefbaustellen mit einem erheblich geringeren Aufwand simulieren als Hochbau-Baustellen. Hochbau-Baustellen lassen sich nach der REFA-Methodenlehre dem Ablaufprinzip der Fertigung nach dem Platzprinzip zuordnen (*vgl. Künstner 1984, S. 124*). Das bedeutet, dass die für die Produktion benötigten Materialien, Arbeitskräfte und Baumaschinen zum Produktionsort transportiert werden müssen. Der Ablauf der Produktion selbst orientiert sich dabei nicht an einem fest vorgegebenen Schema, sondern vielmehr an technologischen Randbedingungen und organisatorischen Projektparametern. Die technologischen Randbedingungen sind von der Gebäudegeometrie, den damit verbundenen konstruktiven Erfordernissen sowie von den gewählten Bauverfahren abhängig. Sie geben vor, in welcher Reihenfolge Wände, Stützen und Decken gebaut werden müssen.

Durch die organisatorischen Projektparameter wird beispielsweise festgelegt, in welche Bauabschnitte das Gebäude während der Fertigung eingeteilt wird, welche Fertigungsrichtung und

welcher Fertigungsablauf bei der Produktion eingehalten werden soll und welche Arbeitskräfte und Betriebsmittel für die Produktion disponiert werden.

Der größte Arbeitsaufwand bei der Simulation im Hochbau besteht daher in der Beschreibung der Prozesse in Verbindung mit der Beschreibung der Abhängigkeiten zwischen diesen Prozessen, unter gleichzeitiger Beachtung der zur Verfügung stehenden Arbeitskräfte und Betriebsmittel. Eine weitere große Herausforderung stellt die Repräsentation der während des Bauablaufs stattfindenden räumlichen Umgestaltung und deren Auswirkungen auf das Produktionsgeschehen dar. Im Folgenden werden die wichtigsten Forschungsvorhaben im Bereich der Bauablaufsimulation der letzten fünf Jahre behandelt. Betrachtet werden Simulationssysteme die für den Hoch- und den Tiefbau entwickelt wurden. Für einen tiefergehenden geschichtlichen Überblick über die Entwicklung der Bauablaufsimulation wird auf die Arbeit von *Chahrour* (2007, S. 15 ff.) verwiesen.

Halpin, AbouRizk und Mohamed (2006) stellen die Simulationsumgebungen „Symphony“ und „Prosidyc“ vor, die sich schon im praktischen Einsatz bewährt haben. Das Simulationssystem Prosidyc (Process Simulation Dragados y Constructionnes) wird von der spanischen Baufirma Dragados eingesetzt. Die Struktur von Prosidyc repliziert die Struktur von MicroCYCLONE, der Microcomputer Implementierung von CYCLONE (CYCLic Operation Network). CYCLONE wurde im Rahmen der Dissertation von *Halpin* (1973) entwickelt und stellt einen Ansatz für die Modellierung, Analyse, das Controlling und die Verbesserung von Bauabläufen dar. Die Methode basiert auf einem einfachen Flussdiagramm, das die Modellierung von sich wiederholenden Prozessen ermöglicht (vgl. *Halpin et al.* 2006, S. 16). Die Simulationsumgebung Prosidyc verwendet Protokolle und Modellierungselemente aus CYCLONE (vgl. *Halpin et al.* 2006, S. 19).

Die Simulation wurde von der Baufirma Dragados als fester Bestandteil der Bauablaufbeobachtung in die Unternehmenskultur integriert. Dem Baupersonal werden in Schulungen die Eigenschaften und das Potential von Simulationsmodellen näher gebracht. Dadurch werden sie in die Lage versetzt Prozesse zu erkennen, bei denen Verbesserungspotentiale durch die Simulation erzielt werden können. Durch die Zahlung von Prämien wird das Baupersonal motiviert, auf Prozesse zu achten, bei denen sich der Einsatz der Simulation lohnen könnte. Werden Einsparungen durch den Einsatz von Prosidyc erzielt, werden diese zwischen dem Baustellenpersonal und dem Hauptbüro in Madrid aufgeteilt. Für die Simulation der Prozesse existiert im Hauptbüro der Baufirma in Madrid eine eigene Abteilung „Planung und Metho-

den“ (P&M). Ein Team aus dieser Gruppe überprüft nach einer Meldung durch das Baustellenpersonal, ob auf der Baustelle wirklich Einsparpotential durch die Simulation erzielt werden kann. Dragados hat die Simulation bisher in über 30 Projekten eingesetzt und eine umfangreiche Bibliothek entwickelt. Die Modelle sind netzwerkbasiert und besitzen eine 2-D-Visualisierung. Sie sind so einfach aufgebaut, dass das Baustellenpersonal sie verstehen kann. Die Modellierung fokussiert sich auf das Erkennen von kritischen Situationen und Engstellen der Produktion. Die 2-D-Modelle sind im Vergleich zu 3-D-Modellen sehr einfach zu entwickeln, da sie weniger Arbeitszeitaufwand beanspruchen (*vgl. Halpin et al. 2006, S. 19 ff.*).

Die zweite von **Halpin et al.** (2006) vorgestellte Simulationsumgebung ist Simphony. Simphony ermöglicht dem Anwender die einfache Implementierung hoch flexibler Simulationswerkzeuge, die graphische, hierarchische, modulare und integrierte Modellierung unterstützt. Innerhalb von Simphony können SPS-Entwurfsvorlagen erstellt werden. SPS steht für Special Purpose Simulation und bezeichnet „Simulationsmodelle für einen bestimmten Anwendungszweck“. Jede SPS-Entwurfsvorlage enthält eine Sammlung von Modellelementen, die für ein bestimmtes Anwendungsgebiet (wie z. B. den Tunnelbau) bestimmt sind (*vgl. Halpin et al. 2006, S. 19*). Die Modellelemente werden vom Anwender am Bildschirm erstellt und mit Beziehungen untereinander verbunden. Jedes Modellelement kann auf bestimmte Ereignisse reagieren und ist einem Element aus der realen Welt zugeordnet, wie z. B. einem Bagger. Die drei Haupteigenschaften eines Modellelements bestehen aus den Eingabe- und Ausgabeparametern und der Statistik. Jedes Element besitzt außerdem einen eigenen erweiterten Eigenschaftssatz, der die spezifischen Eigenschaften des Elements abbildet (*vgl. Halpin et al. 2006, S. 24 f.*). Simphony wurde u.a. beim Bau des „North Edmonton Sanitary Trunk“ (NEST) eingesetzt. Die Simulation wurde während der Planungsphase des Projektes verwendet, um die Produktionsdauer abzuschätzen und um verschiedene Konstruktionsalternativen zu analysieren. Unter Verwendung des „project scheduling templates“ war es beispielsweise möglich, die Terminplanung des Projektes zu simulieren. Diese Entwurfsvorlage basiert auf der PERT Notation¹ und besitzt die Möglichkeit, Vorgangsdauern aus einer Auswahl von Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu generieren (*vgl. Halpin et al. 2006, S. 26 ff.*). Fast alle Tunnelbauprojekte der Stadt Edmonton werden mittlerweile bei der Planung mit Simphony begleitet. Die SPS-Entwurfsvorlage ermöglicht es den Projektplannern, das beste Szenario in Bezug auf die Kosten, Terminplanung und die Dauer zu bestimmen (*vgl. Halpin et al. 2006, S. 24 f.*).

¹ Die PERT (Program Evaluation and Review Technique) Notation ist eine ereignisorientierte Netzplantchnik.

Chahrour (2007) entwickelte im Rahmen ihrer Dissertation eine produktmodellbasierte Umgebung für die Integration von CAD und Simulation im Erdbau. Im Mittelpunkt der Arbeit stand die Vereinfachung des Modellierungsprozesses bei der Durchführung einer Simulationsstudie. Für diesen Zweck entwickelte sie ein aufgabenspezifisches Simulationssystem für Erdbau- und Erdbewegungsprozesse. Mit dem Simulationssystem lassen sich sowohl Prozess- wie auch Projektsimulationen durchführen. Die Simulation wird auf Basis von Petri-Netzen in dem Simulator PACE der Firma IBE Simulation Engineering GmbH durchgeführt (vgl. *Chahrour* 2007, S. 66). Die Parametrisierung des Simulationsmodells erfolgt über das CAD-System AutoCAD, das unter Verwendung der Programmierschnittstelle VBA um Eingabemasken für die simulationsrelevanten Parameter erweitert wurde. Die Schnittstelle zwischen PACE und AutoCAD besteht aus einem simulationsrelevanten Produktmodell, das die Struktur und die Ablaufreihenfolge des Simulationsmodells beinhaltet (vgl. *Chahrour und Franz* 2006, S. 582).

Die Baustelle wird manuell innerhalb von AutoCAD anhand einer DXF-Datei in Einschnitte, Dämme, Deponien und Zwischenlager strukturiert, die mit Förderwegen verbunden werden. Die Einschnitte werden in Abschnitte gegliedert, die sich untereinander hinsichtlich der Bodenart und der verwendeten Betriebsmittel unterscheiden können. Für eine detailliertere Be- trachtung ist es möglich, die Abschnitte manuell in Erdkörper einzuteilen. Für diese Erdkörper können wieder individuelle Randbedingungen (z. B. Manövrierzeiten) definiert werden (vgl. *Chahrour und Franz* 2006, S. 584).

Die definierte Struktur des Projektes, die aus den Einschnitten, Dämmen etc. besteht, wird anschließend in die Vorgangsspalte einer MS-Project-Datei übertragen, wo der Anwender anhand von Anfang-Anfang und Ende-Anfang-Beziehungen die Verknüpfungen zwischen den Vorgängen vornehmen kann, um so die Ablaufstruktur des Simulationsmodells festzulegen. Diese Daten werden danach in das XML-basierte Produktmodell übernommen. Aus dieser XML-Datei wird anschließend vom Simulationssystem automatisch ein Simulationsmodell der Baustelle generiert (vgl. *Chahrour und Franz* 2006, S. 589).

Da sich die Prozesse auf einer Erdbaustelle über einen längeren Zeitraum ständig wiederholen, werden die Prozesse im Simulationsmodell als statische Netzelemente modelliert (Stellen und Transitionen). Die sich bewegenden Betriebsmittel werden als dynamische Marken in das Modell integriert (vgl. *Chahrour und Franz* 2006, S. 583).

Von **Günthner und Kraul** (2008) wurde in Kooperation mit der Max Bögl Bauunternehmung GmbH ein Simulationsmodell für die Simulation des Bauablaufs eines U-Bahnhofs in Rokin erstellt. Das Simulationsmodell wurde in der Simulationsumgebung Plant Simulation der Firma Siemens PLM implementiert. Als Visualisierung besitzt dieses Modell zwei 2-D Darstellungen als Grundriss und als Querschnitt der Baustelle. Im Querschnitt besteht die Baustelle aus mehreren Ebenen. Simuliert werden sowohl der Baufortschritt und der damit verbundene Aushub in den verschiedenen Ebenen der Baustelle, wie auch die Baulogistik, in Bezug auf den Abtransport des Erdmaterials.

Das Modell ist modular aufgebaut und besteht aus verschiedenen wiederverwendbaren Simulationsbausteinen. Beispielsweise wurden ein Portalkran, ein Seilbagger und anpassbare LKW-Fahrtstrecken implementiert (vgl. *Günthner und Kraul* 2008, S. 7). Die Konfiguration des Modells und die Auswertung der generierten Daten geschieht unter Verwendung von Microsoft Excel. Die Parametrisierung und die Auswertung des Modells ist daher unabhängig von Plant Simulation. Zusätzlich wurde das Modell über einen ActiveX-Baustein direkt mit MS-Project gekoppelt, so dass aus den Ergebnissen eines Simulationslaufes direkt ein Projektplan erstellt werden kann (vgl. *Günthner und Kraul* 2008, S. 8-9).

Dieser Ansatz wurde im Rahmen des ForBAU²-Projektes von *Wimmer et al.* (2010) zu einer Bausteinbibliothek für den Tiefbau weiterentwickelt. Die Bibliothek enthält verschiedene Bausteine für den Datenimport und -export, für die Modellierung der baustellenbedingten Vorgänge, interne Verwaltungsbausteine und spezielle Objekte für die Baustelleneinrichtung. Über die Bausteine können ein Projektplan aus einem Projektmanagementtool, auf- und abzutragende Erdkörper als gleichförmige Quadere (Voxel) und die Baustellenumgebung als 3-D-Modell in das Simulationsmodell importiert werden. Über die Baumaschinendatenbank „Equipment“ können Daten der Baugeräte in das Modell übernommen werden. Die importierten Daten werden in der Simulationssoftware miteinander verbunden und ein Simulationsmodell erzeugt. Als Ergebnis kann ein verbesserter Projektplan auf Vorgangsebene ausgegeben werden (vgl. *Wimmer et al.* 2010, S. 94 ff.).

Weber (2007b) entwickelte ein Simulationssystem für die Simulation von logistischen Prozessen auf Hochbau-Baustellen. Die Simulationsmodelle werden automatisch unter Verwendung von CAD-Daten generiert. Als Simulator wurde das Programm Enterprise Dyna-

² ForBAU – Bayrischer Forschungsverbund virtuelle Baustelle

mics (ED) des Unternehmens Incontrol Enterprise Dynamics verwendet (*vgl. Weber 2006, S. 575*). Die Simulationselemente werden in ED als Atome angesprochen, die Eigenschaften besitzen und auf eintretende Ereignisse reagieren. Neue Atome können erstellt und in einer Benutzereigenen Bibliothek verwaltet werden. Die für die Baustellenabläufe erstellten Atome können den Projekterfordernissen entsprechend aus der Bibliothek entnommen und angeordnet werden. Von Weber wurden Atome und Atomgruppen entwickelt, mit denen sich Bauprozesse abbilden lassen. So wurden beispielsweise ein LKW-Beladungsmodul, ein Kranmodul und ein Lagermodul implementiert, die in die jeweils generierten Simulationsmodelle übernommen werden können (*vgl. Weber 2006, S. 575-578*).

Die Gebäudemodelldaten werden über eine Schnittstelle aus der CAD-Umgebung in eine Datenbank überführt. Aus dieser Datenbank resultieren die zu transportierenden Materialien, die Mengen und der Einbauort. Das Gebäude wird in frei wählbare Arbeits- und Lieferabschnitte unterteilt. Die Arbeitsabschnitte dienen der Gliederung des Bauablaufs. Um die Zeitpunkte der Transporte zu bestimmen findet eine Verknüpfung der Abschnitte mit einem Bauzeitenplan statt. Zu einem Arbeitsabschnitt können mehrere Materiallieferabschnitte geplant werden. Die Materialien selbst werden für den Transport und die Lagerung in logistische Einheiten zusammengefasst, wie z. B. Packstücke, Lade- und Transporteinheiten sowie Lagereinheiten. Die Anordnung der für die logistischen Prozesse notwendigen Ressourcen wie Einfahrten, Krane, Lager und Aufzüge findet im CAD-Modell statt (*vgl. Weber 2007a, S. 108*). Als äußere Systemgrenze des Simulationsmodells wird die Baustelleneinfahrt gesetzt.

Die automatische Generierung des Simulationsmodells stößt jedoch an ihre Grenzen. Für den Transport der Materialien muss als Nacharbeit in der Simulationsumgebung ein Wegenetz angelegt werden.

Steinhauer (2008) stellt die Simulation der Fertigung von Schiffen vor, die aufgrund der ähnlichen Systemeigenschaften von Hochbau-Baustellen und Schiffswerften auch für die Bauindustrie von Interesse ist. An der Flensburger Schiffbau-Gesellschaft wird bereits seit Mitte der 1990er Jahre die Simulation für die Betrachtung von Prozessen in der Produktion und der Logistik eingesetzt (*vgl. Steinhauer 2008, S. 84*). Als Basis für die schnelle Entwicklung von Simulationsmodellen wurde der Simulationsbausteinkasten STS (Simulation Toolkit Shipbuilding) für die Simulation von Fertigungsprozessen im Schiffbau entwickelt (*vgl. Steinhauer 2006, S. 2*). Der Simulationsbausteinkasten selbst wurde in der Simulationsumgebung eM-Plant der Firma Siemens/UGS (jetzt Plant Simulation der Firma Siemens PLM) im-

plementiert. Im Rahmen größerer Kooperationen mit anderen Werften und Forschungseinrichtungen, wie z. B. der SimCoMar (Simulation Cooperation in the Maritime Industries) und der SIMoFIT (Simulation of Outfitting Processes in Shipbuilding and Civil Engineering), wird dieser Bausteinkasten genutzt und weiterentwickelt.

So wird in der Kooperation SIMoFIT an Simulationsbausteinen für den Innenausbau gearbeitet (vgl. *Steinhauer 2007, S. 9-10*). Um die Abhängigkeiten zwischen den Gewerken des Innenausbaus beschreiben zu können, wurde in die Montagesteuerung ein Constraints-basierter Ansatz integriert. Die Constraints beschreiben die Abhängigkeiten zwischen den Arbeitsaufgaben sowie die für die Ausführung benötigten Ressourcen. Durch die Formulierung neuer Constraints kann auf veränderte Umgebungsbedingungen reagiert oder neue Fertigungsstrategien in das Modell integriert werden (vgl. *Steinhauer 2007, S. 11*). Die Einhaltung der Constraints wird von dem STS-Baustein ConstraintManager sichergestellt. Als Constraints können Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen zwischen Arbeitsschritten, Abhängigkeiten von Zeitpunkten, Verfügbarkeit von Ressourcen und die Materialverfügbarkeit formuliert werden (vgl. *Steinhauer 2008, S. 85 f.*).

König und Beißert (2008) entwickelten im Rahmen der SIMoFIT-Kooperation einen Constraint-basierten Simulationsansatz. Die Implementierung dieses Ansatzes erfolgte in der Simulationsumgebung Plant Simulation der Firma Siemens PLM. Für den Aufbau des Simulationsmodells wurden Komponenten aus dem zuvor erwähnten Simulationsbaukastens für den Schiffbau der Flensburger Schiffbau-Gesellschaft verwendet und weiterentwickelt. Der Simulationsbaukasten wurde um Bausteine für die Generierung, Verwaltung und Überprüfung der Hard- und Softconstraints erweitert. Als Hard Constraints werden alle zwingend einzuhaltenden Abhängigkeiten zwischen den Bauprozessen beschrieben, während Soft Constraints zweckmäßige Abhängigkeiten beschreiben, die auch verletzt werden können (vgl. *Beißert et al. 2008, S. 142*). Als Bausteine wurden eine Materialverwaltung, eine Ressourcenverwaltung, eine Bereichsverwaltung, eine Transportsteuerung, eine Constraint-Verwaltung und eine Montagesteuerung implementiert. Der Simulationsansatz wurde von *Beißert (2010)* zusätzlich um ein Konzept zur Berücksichtigung von Variablenordnungsstrategien erweitert, der es ermöglicht, die Kosten einer Soft Constraint Verletzung zu berechnen.

Die Bauaufgabe wird im Rahmen der Simulation in einzelne Prozessschritte zerlegt, die jeweils drei verschiedene Zustände besitzen können (nicht gestartet, gestartet und beendet). Ein begonnener Prozessschritt wird ohne Unterbrechung und ohne eine Änderung der Ressour-

cenzuweisungen durchgeführt. Zu Beginn eines Simulationslaufes oder bei Eintritt eines neuen Ereignisses werden die Hard Constraints aller nicht begonnen Prozessschritte kontrolliert. Die Prozessschritte, bei denen die Hard Constraints erfüllt sind, werden zwischengespeichert und anschließend auf ihre Soft Constraints hin überprüft. Die Prozessschritte bei denen die meisten Soft Constraints erfüllt sind, werden gestartet. Die während der Ausführung benötigten Materialien, das Personal und die Arbeitsmittel werden für die Dauer des Prozessschrittes gesperrt. Ist die Ausführungszeit des Prozessschrittes abgelaufen, werden die verwendeten Ressourcen wieder freigegeben und die noch nicht ausgeführten Prozessschritte erneut auf ihre Hard- und Soft-Constraints hin überprüft (*vgl. Beißert 2010, S. 52*).

Die als Baustein implementierte Materialverwaltung verwaltet alle Materialien des Simulationsmodells. Bei der Prüfung der Hard Constraints wird die Materialverfügbarkeit bei der Materialverwaltung angefragt. In der ebenfalls als Baustein implementierten Ressourcenverwaltung sind das Personal und die verfügbaren Geräte aufgeführt. Vor dem Beginn eines Arbeitsschrittes wird überprüft, ob die benötigte Kapazität an Ressourcen vorhanden ist. Beim Start eines Arbeitsschrittes werden die entsprechenden Ressourcen von der Ressourcenverwaltung gesperrt (*vgl. König und Beißert 2008, S. 21*).

Die Bereichsverwaltung dient der Verwaltung der Arbeits- und Lagerflächen. Der verfügbare Raum (Bereich) wird in Form eines rechteckigen Rasters modelliert, dessen Zellen die Zustände frei, belegt oder gesperrt für die Lagerung annehmen können. Für Transporte oder Arbeitsschritte wird vorher geprüft, ob die benötigten Zellen frei sind. Nur dann kann die entsprechende Tätigkeit gestartet werden. Die Transportsteuerung verwaltet die vorhandenen Transportmittel. Eingehende Transportanfragen werden verwaltet und auf ihre Ausführbarkeit hin überprüft (*vgl. König und Beißert 2008, S. 21*).

In der Constraint-Verwaltung werden die ausführbaren Arbeitsschritte generiert. Zur Überprüfung der Constraints kann die Constraint-Verwaltung Anfragen an die Material-, Ressourcen- und Bereichsverwaltung stellen. Technologische Abhängigkeiten werden durch intern generierte Constraints zwischen den Arbeitsschritten berücksichtigt (*vgl. König und Beißert 2008, S. 21*). Die Montagesteuerung steht in Verbindung zu allen vorgenannten Komponenten. So kann sie Transportanfragen stellen und die für die Ausführung der Arbeitsschritte benötigten Ressourcen sperren lassen.

Die für einen Simulationslauf benötigten Parameter müssen zum größten Teil manuell in das Simulationsmodell integriert werden (*vgl. König und Beißert 2008, S. 22*).

Voigtmann und Bargstädt (2008) erweitern den von *König und Beißert* (2008) implementierten Constraints-basierten Simulationsansatz um Aspekte der Baulogistik. Die für die Simulation der Baulogistik im Ausbau notwendigen Funktionen wurden in einem Baulogistik-Baustein zusammengefasst. „*Die Anbindung an vorhandene STS-Bausteine erfolgt über bereitgestellte Schnittstellen in Form fakultativer Methodenaufrufe. Der Baulogistik-Baustein selbst ruft seinerseits Methoden bestehender STS-Bausteine auf* (Voigtmann 2010, S. 36).“ Für die Simulation der Baulogistik müssen aber zusätzliche Daten erfaßt werden. Den Prozessen werden beispielsweise zusätzlich Arbeitsbereichstypen und Abmessungen zugeordnet. Die Arbeitsbereichstypen beschreiben, von welchen Seiten aus die Bauteile bearbeitet werden. Der Arbeitsbereich wird über die Angabe von Maßen, die über das Bauteil hinausgehen, definiert (*vgl. Voigtmann und Bargstädt 2008, S. 137*).

Über die bereits bei *König und Beißert* (2008) erwähnte Montagesteuerung wird die Methode „*Prüfe Arbeitsbereich*“ ausgeführt. Diese berechnet die Abmessungen und Position des Arbeitsbereichs. Für jeden Bereich (Etage oder Bauabschnitt) existiert eine Flächenbelegungsmatrix, über die die Belegung innerhalb des Bereichs ermittelt wird. Materialien, die dort lagern und aktuell nicht benötigt werden, können umgelagert werden, indem ein Transportauftrag an die Transportsteuerung weitergegeben wird. Durch weitere Funktionen lassen sich logistische Details, wie die eingeschränkte Begehbarkeit von Arbeitsbereichen oder die Entsorgung leerer Transporthilfsmittel, simulieren (*vgl. Voigtmann und Bargstädt 2008, S. 139*).

2.2.3 Schwerpunkte der Forschungsarbeiten

Im Folgenden werden die Schwerpunkte der vorgestellten Forschungsarbeiten herausgearbeitet und miteinander verglichen, um Trends in der Bauablaufsimulation zu veranschaulichen. Als wesentliche Punkte werden die Anwendungsbereiche und der Umfang der Anwendung, die Dateneingabe und -ausgabe, der Detaillierungsgrad und die verwendeten Modellierungs-konzepte gegenübergestellt.

Anwendungsbereiche der Simulationssysteme

Die vorgestellten Simulationssysteme unterscheiden sich ganz wesentlich durch die Anwendungsbereiche, in denen sie eingesetzt werden können. *Chahrour und Franz* (2004, S. 333) merken an, dass „*die Vielfalt der Bauprojekte (...) die Entwicklung eines Simulationssystems*

für alle Baubereiche, wie Hochbau, Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau etc. schnell unrealistisch erscheinen“ lassen. Die vorgestellten Forschungsprojekte beschränken sich daher auch meistens auf einen bestimmten Baubereich. Neben dem Anwendungsbereich unterscheiden sich die Simulationssysteme darin, ob sie die Prozessebene oder die komplette Projektebene behandeln. Chahrou und Franz (2004, S. 331) stellen fest, dass zwar theoretisch mit einigen verfügbaren Simulationswerkzeugen die Möglichkeit besteht, komplexe Projekte abzubilden, der praktische Einsatz jedoch aufgrund der Komplexität einer solchen Aufgabe bisher ausbleibt.

Das von Halpin et al. (2006) vorgestellte Simulationssystem „Prosidyc“ lässt sich theoretisch auch auf die komplette Projektebene ausweiten, es wird aber im Regelfall für die fokussierte Untersuchung von kritischen Situationen und Engstellen der Produktion verwendet. Die ebenfalls von Halpin et al. (2006) vorgestellte Simulationsumgebung Simphony wurde im Anwendungsbereich des Tunnelbaus schon erfolgreich auf der Projektebene eingesetzt.

Weber (2007b) legt den Schwerpunkt seiner Arbeit auf die Betrachtung der Baustellen- und Anlieferungslogistik. Ein fester Bauzeitenplan, der den Bauablauf darstellt, ist die Richtschnur für die Anlieferung und damit der Taktgeber für die Baustellenlogistik. Die Wechselwirkungen zwischen Bauablauf und Baulogistik lassen sich anhand des Modells nur schwer erfassen. Weber (vgl. 2007b, S. 137) merkt an, dass noch zu prüfen ist, ob eine Erweiterung des Modells um die Simulation der Fertigungsprozesse zu genaueren Ergebnissen führen würde.

Voigtmann und Bargstädt (vgl. 2008, S. 132) bemerken in Bezug auf die Baustellenlogistik, dass „die Variation einzelner Systemparameter und deren Bewertung nicht losgelöst vom Gesamtsystem erfolgen“ kann. Sie erweitern daher den Ansatz von König und Beißert (2008), bei dem hauptsächlich Belange der Bauproduktion behandelt werden, um baulogistische Komponenten. Der von König und Beißert (2008) beschriebene hohe Detaillierungsgrad des Modells macht einen Einsatz des Simulationssystems auf der Projektebene unwahrscheinlich, obwohl ein solcher Einsatz theoretisch mit einem sehr hohen Aufwand umsetzbar wäre. Das Simulationssystem scheint daher vorwiegend für eine detaillierte Betrachtung einzelner Bauprozesse geeignet.

Die Arbeit von Chahrou (2007) beschränkt sich auf die Simulation von Erdbauprozessen. Die Simulation findet auf der Projektebene statt, so dass komplexe Bauprojekte im Simulator

nachgebildet werden können. Sowohl die logistischen Aspekte, wie auch der Bauablauf in Form des Erdabtrags werden simuliert. *Günthner und Kraul (2008)* sehen die Baulogistik und den Bauablauf ebenfalls als Einheit. Die Baulogistik wird auch hier nur in Verbindung mit dem Bauablauf auf der Projektebene simuliert. Wie in der Arbeit von *Chahrour (2007)* beschränkt sich der Einsatz ihres Simulationssystems auf den Erdbau.

Dateneingabe und Datenausgabe

Die räumlichen Parameter werden in den genannten Arbeiten sehr unterschiedlich in die Simulationsmodelle integriert. *Weber (2007a)* verwendet als Basis für die räumlichen Parameter ein 3-dimensionales CAD-Modell. Die für die Simulation relevanten Parameter werden aus der Zeichnungsdatei extrahiert, in einer Datenbank gespeichert und aus der Datenbank automatisch in das Simulationsmodell übertragen. Die für den Anlieferungszeitpunkt der Materialien maßgebenden Bauzeiten werden über einen Bauzeitenplan festgelegt (*Weber 2007b, S. 70*). Die Transportwege werden in Form von Wegenetzen in der Simulationsumgebung manuell eingetragen. Ob der Aufbau dieses Wegenetzes im CAD-System oder in der Simulationsumgebung stattfindet, hält *Weber (vgl. 2007a, S. 110)* für unerheblich, da er den Aufwand in etwa gleich hoch einschätzt. *Chahrour (2007)* liest die räumlichen relevanten Parameter ebenfalls aus CAD-Daten aus und überträgt diese in ein eigens für die Simulation im Erdbau entwickeltes Produktmodell. Sie verwendet im Vergleich zu *Weber (2007b)* aber 2-dimensionale DXF-Dateien, da diese im Tiefbau am häufigsten zum Einsatz kommen. Während bei *Weber (2007b)* die Mengen direkt aus dem 3-dimensionalen Gebäudemodell ermittelt werden, verwendet *Chahrour (2007)* für die Erdmassenberechnung zusätzlich REB-basierte Dateien (Regelungen für die elektronische Bauabrechnung). Durch die REB sollen die beim Bau anfallenden geometrischen Berechnungsverfahren vereinheitlicht werden. In der Baupraxis findet insbesondere das von der REB festgelegte Datenformat für die Darstellung von Achsen, Gradienten und Querprofilen häufig Anwendung (*Chahrour 2007, S. 45 f.*).

Die Förderwege, Einschnitte, Dämme, Deponien und Zwischenlager der Linienbaustelle werden direkt in die 2-dimensionale Zeichnung eingetragen. Diese Aufbaustruktur der Baustelle wird anschließend in eine MS-Project Datei übertragen, in der anschließend die Ablaufstruktur der Baustelle mit den Anordnungsbeziehungen zwischen den Vorgängen festgelegt wird. Die Parametrisierung der Betriebsmittel erfolgt über Anwendungsfenster, die in die CAD-Umgebung integriert wurden. *Weber (2007b, S. 137)* schlägt in seinem Ausblick auf zukünftige mögliche Arbeiten ebenfalls eine CAD-gebundene Baustelleneinrichtung für den Hoch-

bau vor, „*bei der die geplanten Ressourcen bereits mit simulationsrelevanten Parametern“* versehen werden können. Er sieht den Vorteil, dass ein in dieser Form erweitertes Gebäudemodell sowohl die Systemlast als auch die Lage und die Leistungskenngrößen der Ressourcen liefern würde. Damit könnten „*über eine zu definierende Schnittstelle (...) Simulationsmodelle ,automatisch‘ aus der Baustelleneinrichtungsplanung erstellt werden*“ (Weber 2007b, S. 137).

Die Eingangsdaten für die Simulation werden bei *König und Beißert* (vgl. 2008, S. 25) unter Verwendung von Tabellen verwaltet. In ihrem Ansatz ist die Definition und Generierung der Eingangsdaten sehr aufwändig, da „*ein Großteil der Daten manuell erzeugt werden muss*“ (*König und Beißert* 2008, S. 22). Sie planen für ihr Simulationskonzept daher ebenfalls einen Ansatz für die produktgestützte Modellgenerierung, bei dem CAD-Modelle mit Material- und Leistungsbeschreibungen gekoppelt werden sollen, um Basis-Simulationsmodelle zu generieren (vgl. *König und Beißert* 2008, S. 34). Im Rahmen des MEFISTO³-Projektes wurde diese Idee im SiteSimEditor implementiert (*König und Marx* 2011), der ausführlicher in Kapitel 4.3.1 behandelt wird. Probleme sehen *König und Beißert* (vgl. 2008, S. 22) bei einer produktgestützten Modellgenierung darin, dass CAD-Modelle meistens nicht den benötigten Detailierungsgrad für eine Simulation enthalten. Die Analyse der Simulationsläufe erfolgt über Auswertungsdiagramme, die in dem verwendeten Simulationsbausteinkasten existieren. Die simulierten Ausführungszeiten können aber auch in eine XML-Datei exportiert werden, um diese anschließend in MS-Project als Gantt-Diagramme darzustellen.

Günthner und Kraul (2008) verwenden für die Dateneingabe und die Datenausgabe Excel-Tabellen. Zusätzlich ist die Erstellung eines Projektplans aus den Ergebnissen des Simulationslaufs möglich. Dafür wurde in einem ersten Schritt die Kopplung des Simulationsmodells in eM-Plant mit einem MS-Project-Zeitplan umgesetzt (vgl. *Günthner und Kraul* 2008, S. 9). Sie sehen in diesem Zusammenhang die Simulation in erster Linie als Hilfsmittel für die Unterstützung und Prüfung der Projektplanung. Im weiterentwickelten Ansatz von *Wimmer et al.* (2010) können zusätzlich Projektpläne, Erdkörper, 3-D-Geländemodelle und Baumaschinen-daten in das Modell importiert werden.

³ Management – Führung – Information – Simulation im Bauwesen (MEFISTO), Leitprojekt im Forschungsprogramm „IKT 2020“ – Softwaresysteme und Wissenstechnologien“ des BMBF

Detaillierung

Chahrour (2007) überlässt den Detaillierungsgrad teilweise dem Anwender. Optional können für die Querschnitte der Ablaufabschnitte eigene Erdkörper definiert werden, die sich in Bezug auf ihre Bodenklasse und damit auch in Bezug auf ihren Bearbeitungsaufwand unterscheiden. Die Definition der einzelnen Erdkörper erzeugt einen hohen Arbeitsaufwand in der Modellierungsphase, so dass es sinnvoll erscheint, diesen optional zu übergehen, um die Modellierung beschleunigen zu können.

Das Detaillierungslevel in dem Simulationssystem von *Weber (2007b)* ist sehr hoch angesetzt, die Wege der einzelnen Baustoffe werden von der Anlieferung, über den Transport auf der Baustelle, bis hin zur Verarbeitung am Einbauort dargestellt. Für die Lagerung der Bauelemente müssen Haupt-, Neben- und Etagenlager definiert werden. In der Dissertation wird nicht beschrieben, dass sich der Detaillierungsgrad des Modells verändern lässt. Das Modell ist jedoch auf die Beantwortung von Fragestellungen spezialisiert, die den Bereich der Bauologistik betreffen, so dass eine Einschränkung des Detaillierungsgrades vermutlich keinen Sinn machen würde.

Beißert (2010) strebt ebenfalls ein sehr hohes Detaillierungslevel der Simulation an. Unter anderem können in ihren Modellen Ausführungsstrategien, wie die Vermeidung von Verschmutzungen, Vermeidung von Zerstörungen, die Taktfertigung oder Qualitäts- und Sicherheitsaspekte, berücksichtigt werden. Das Modell ist sehr gut geeignet, Fertigungsabläufe im Detail simulationsgestützt zu betrachten. Der Nachteil des Modells besteht in einem hohen Parametrisierungsaufwand, da für jeden Arbeitsschritt viele zusätzliche Daten erfasst werden müssen, wie z. B. der Verschmutzungsgrad einer Tätigkeit. Außerdem müssen die Tätigkeiten untereinander im Hinblick auf den Verschmutzungsgrad gewichtet werden. Über die Definition der Soft-Constraints wird es dem Anwender jedoch ermöglicht, selbst zu entscheiden, welche Fertigungsstrategien in dem Simulationsmodell Berücksichtigung finden sollen, so dass auch hier das Detaillierungslevel verändert werden kann.

Günthner und Kraul (vgl. 2008, S. 6) erscheint es unmöglich die auf einer Baustelle stattfindende große Zahl von manuellen Tätigkeiten detailliert und realistisch nachzubilden. Sie empfehlen daher den Abstraktionsgrad möglichst hoch anzusetzen, um pseudogenau Abbildungen, die keinen Mehrwert für die Ergebnisse der Simulation bringen, zu vermeiden. Eine gro-

ße Herausforderung sehen sie darin, die Balance zwischen einer zu genauen und einer zu groben Abbildung des Bauprozesses zu halten.

Die meisten Modelle bieten einen mehr oder weniger stark ausgeprägten Einfluss des Anwenders auf den Detaillierungsgrad des Simulationsmodells an. Da die Fragestellungen, die im Rahmen einer Simulationsstudie im Bauwesen behandelt werden, stark variieren können, erscheint die Möglichkeit zur Anpassung des Detaillierungslevels sinnvoll. Der Detaillierungsgrad steht fast immer in direkter Relation zum Aufwand für die Datenbeschaffung, so dass eine höhere Detaillierung auch zwangsläufig die Kosten einer Simulationsstudie erhöht.

Modellierungskonzepte

Als Modellierungskonzepte werden in den betrachteten Projekten fast ausschließlich bauteilorientierte Konzepte verwendet. Die Ansätze unterscheiden sich lediglich durch die eingesetzten Simulationswerkzeuge. Das bausteinorientierte Modellierungskonzept ermöglicht den modularen Aufbau der Simulationsmodelle und damit die Wiederverwendung einzelner Simulationskomponenten in neuen Projekten, wodurch die Modellierungszeit verringert wird. Die Wirtschaftlichkeit von Simulationsstudien kann dadurch erhöht werden.

Eine Ausnahme bildet die Arbeit von *Chahrour (2007)*, die für ihr Simulationsmodell ein petrinetzbasiertes Modellierungskonzept verwendet. Die Abläufe im Tiefbau sind jedoch einfacher strukturiert, da die Komponenten des Systems (Bagger und LKW) klar definierte Beziehungen zueinander haben und im Verlauf einer Tiefbaumaßnahme weniger unterschiedliche Prozesse wie im Hochbau ausgeführt werden, da sich die Abläufe ständig wiederholen. Die eher starre und formalisierte Struktur von Petrinetzen lässt sich bei der Abbildung von Tiefbauprozessen daher einfacher als bei Hochbauprozessen einsetzen.

2.2.4 Zusammenfassung der Entwicklungstrends

Als Zusammenfassung wird in Tabelle 2.1 ein Überblick über die Systemmerkmale der verschiedenen behandelten Simulationssysteme wiedergegeben.

Die meisten Entwicklungstrends in der baubetrieblichen Simulation haben die Beschleunigung der Modellierungs- und der Dateneingabephase zum Ziel. Die Ursache dafür dürfte in dem großen Zeit- und damit auch Kostenaufwand begründet liegen, der durch die schwierige Modellierung der Unikatprojekte im Bauwesen verursacht wird.

Für die Bereitstellung der Eingabeparameter wird daher oftmals auf CAD-Modelle oder EDV-basierte Unterlagen aus der Entwurfsplanung zurückgegriffen. Der variable Detaillierungsgrad vieler Modelle ermöglicht es, das Simulationsmodell den Projekterfordernissen anzupassen und auf unnötige Details zu verzichten.

Die Beispiele aus dem Bereich des Hochbaus beschränken sich in erster Linie auf die Be- trachtung einzelner Prozesse oder der Fokus des Anwendungsbereichs liegt wie bei *Weber (2007b)* ausschließlich auf der Baustellenlogistik. Im Tiefbau gelingt in allen vorgestellten Projekten auch eine Ausweitung auf die Projektebene, was vermutlich auf die weniger komplexe Struktur der dortigen Prozesse zurückzuführen ist.

Alle vorgestellten Ansätze verwenden für die Beschreibung des Zeitablaufs die diskrete ereignisorientierte Simulationsmethode. Als Modellierungskonzept werden fast ausschließlich bausteinorientierte Simulationsmodelle verwendet, die einen modularen Aufbau der Simulationsmodelle ermöglichen. Durch die Wiederverwendung einmal erstellter Komponenten ist es möglich, die benötigte Modellierungszeit in neuen Projekten erheblich zu senken.

Die Ergebnisse der Simulationsläufe werden in den meisten Projekten in Form von Terminplänen dargestellt. Terminpläne gehören zu den wichtigsten Planungsdokumenten in der Arbeitsvorbereitung und dienen als Grundlage für die Bauausführung.

Tabelle 2.1: Zusammenfassung der Systemmerkmale der verschiedenen Simulationssysteme

Systemmerkmale \ Systemmerkmale	Simulations-system	Prosidyc	Simphony	Chahrou	TU-München Günthner et al.	Weber	SIMoFIT (König/Beißert Bargstädt/Voigtmann Steinhauer)
Anwendungsbereich	Hoch- und Tiefbau	vorwiegend Tiefbau		Tiefbau	Tiefbau	(nur Baustatistik)	Hochbau (inkl. Bauökonomik)
Ebene	Prozessebene	Projektebene	Projektebene	Projektebene	Projektebene		vorwiegend Prozess- aber auch Projektebene
Dateneingabe	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	CAD-Modell (DXF) über Produktmodell, REB-Dateien, einzeichnen von Wegenetzen, MS-Project	Excel-Tabellen, Weiterentwicklung: Projektplan, Erdkörper, 3-D-Modelle und Baummaschinendaten	CAD-Modell über Datenbank, manuelles einzeichnen von Wegenetzen und Lagerplätzen	Tabellen, Weiterentwicklung: Dateneingabe per SiteSimEditor über Multimodel-Container für die Simulation
Datenausgabe	keine Angaben	PERT-Diagramme	MS-Project	MS-Project	Excel-Tabellen MS-Project	keine Angaben	MS-Project
Detailierungsgrad	vom Anwender definierbar	vom Anwender definierbar	vom Anwender definierbar	niedriges Detailierungslevel	hohes Detailierungslevel		hohes Detailierungslevel vom Anwender definierbar
Modellierungskonzept	aufbauend auf Micro-Cyclone	bausteinorientiert	Petri-Netze	bausteinorientiert	bausteinorientiert		bausteinorientiert

2.3 Multiagentensimulation

In der vorliegenden Arbeit wurde für den Entwurf und die Implementierung des Simulationsmodells das multiagentenbasierte Modellierungskonzept verwendet. Multiagentenbasierte Simulationsmodelle sind modular aufgebaut und bestehen aus Agenten und Ressourcen, die sich für bestimmte Ausgangssituationen beliebig in einer Umwelt miteinander kombinieren lassen. Die Multiagentensimulation ist ein sehr junges Simulationsparadigma, das erst durch die rasante Entwicklung in der Computertechnologie an praktischer Bedeutung gewonnen hat. Die Multiagentensimulation baut auf dem Konzept der agentenbasierten Softwareentwicklung auf. Sie ist verwandt mit der objektorientierten Simulation, der individuenbasierten Simulation und den zellulären Automaten (*vgl. Herrler 2007, S. 44*).

2.3.1 Erläuterung des Agentenbegriffs

Der in der Informatik verwendete Begriff „Agent“ leitet sich von dem englischen Wort „agent“ ab, das einen Bevollmächtigten, Vermittler oder Akteur bezeichnet. Der Begriff „Agent“ wurde in die Informatik aus der Fachdisziplin der „Verteilten Künstlichen Intelligenz“ übernommen. In den USA wurden in diesem Fachgebiet Ende der 80er Jahre erste Arbeiten veröffentlicht, welche die Kooperation sowie die Koordinierung von Aktionen und Verhandlungen unterschiedlicher, künstlich generierter Akteure zum Inhalt hatten (*vgl. Ferber 2001, S. 44 f.*). In anderen Sachgebieten wird der Fachterminus „Agent“ aber auch für technische oder biologische Systeme in einer realen Umwelt verwendet. Abbildung 2.2 enthält eine Klassifikation der Agenten in Bezug auf ihre jeweilige Umgebung.

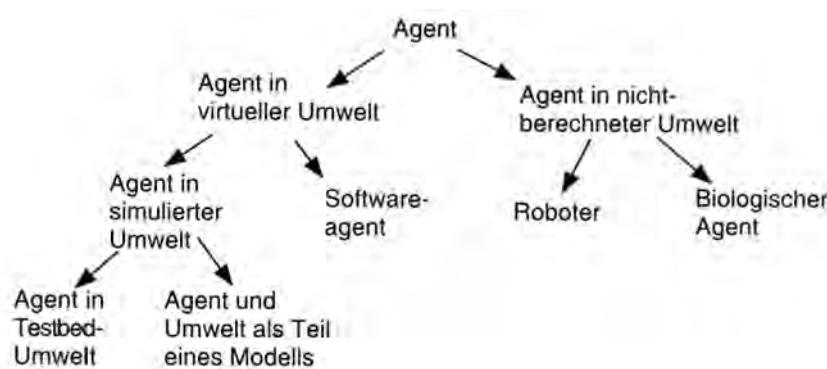


Abbildung 2.2: Taxonomie von Agenten in ihren konkreten Umgebungen (*Klügl 2001, S. 71*)

Bislang existiert in der Softwareentwicklung keine standardisierte und allgemein anerkannte Definition für das Agentenkonzept (*vgl. Weiß und Jakob 2005, S. 4; vgl. Drogoul et al. 2002, S. 2*). In der Literatur finden sich eine Vielzahl unterschiedlicher Charakterisierungen, die sich

teilweise stark voneinander unterscheiden. *Franklin und Graesser* (vgl. 1996, S. 21) nehmen an, dass die große Anzahl unterschiedlicher Definitionen auf die jeweiligen Arbeitsschwerpunkte der Autoren zurückzuführen ist. Des Weiteren stellen sie fest, dass es sich bei dem Agentenkonzept um kein klar abgrenzbares, mathematisches Konzept, sondern eher um eine „Sichtweise“ der realen Welt handelt. Sie selbst bezeichnen einen autonomen Agenten als „*ein System, das sich in einer Umwelt befindet und Teil dieser Umwelt ist, diese Umwelt wahrnimmt und in ihr zeitabhängig agiert, während es seine eigene Zielsetzung verfolgt und dadurch die eigene zukünftige Wahrnehmung beeinflusst*“ (*Franklin und Graesser* 1996, S. 27).

Wooldridge und Jennings (vgl. 1995, S. 115 ff.) sehen durch die fehlende einheitliche Terminologie die Gefahr von Missverständnissen innerhalb der wissenschaftlichen Fachwelt. Sie schlagen eine „schwache“ und eine „starke“ Definition des Agentenbegriffs vor. Die „schwache“ beinhaltet als wesentliche Eigenschaften eines Agenten die Autonomie, die Interaktivität, die Reaktivität und die Proaktivität. Die „starke“ Definition geht davon aus, dass der Agent zusätzlich interne Zustände besitzt, die Einfluss auf die Handlungen des Agenten nehmen.

Klügl (vgl. 2001, S. 14) nennt als Ergebnis einer eigenen Literaturrecherche folgende sechs Merkmale eines Agenten:

- „**Situated**“: Der Agent besitzt Sensoren und Effektoren über die er seine Umwelt wahrnimmt und sie verändern kann.
- „**Reaktiv**“: Der Agent kann flexibel reagieren, d.h. er verfährt nicht nach einer festgelegten Prozessreihenfolge. Sein Verhalten wird vielmehr durch die Situation, in der er sich befindet, beeinflusst.
- „**Autonom**“: Der Agent bestimmt selbst, welche Aktionen als Reaktion auf die empfangenen Sensorenwerte durchgeführt werden.
- „**Sozial**“: Ein Agent kann mit anderen Agenten interagieren.
- „**Rational**“: Der Agent arbeitet zielorientiert.
- „**Anthropomorph**“: Der Agent sollte sich wie ein Individuum verhalten, d.h. er verfolgt bestimmte Ziele oder Wünsche. Weiter sollte er glaubwürdig sein, d.h. ein Beobachter sollte den Agent als das, was er darstellen soll, erkennen können und sein Verhalten sollte dementsprechend plausibel sein.

Agenten lassen sich aber auch in Bezug auf die Komplexität ihres Verhaltens klassifizieren. Von *S. Russel und P. Norvig* (1995) werden vier verschiedene Agententypen definiert, welche

die Agenten nach ihrer Wissensbasis und der daraus resultierenden Steuerung ihres Verhaltens unterscheiden (siehe Abbildung 2.3).

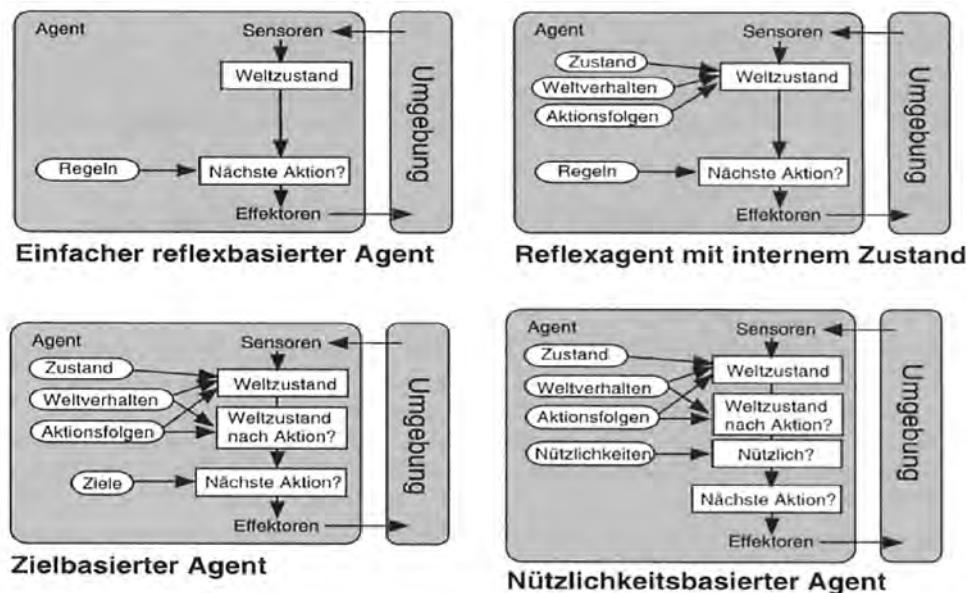


Abbildung 2.3: Agententypen nach Russel und Norvig (Klügl 2001, S. 20)

Schmidt (vgl. 2000, S. 24 ff.) stellt ein eigenes Referenzmodell für die Verhaltenstypisierung von Agenten vor. Er klassifiziert sie in Agenten mit reaktiven und deliberativen Verhaltensweisen (siehe Tabelle 2.2). Reaktives Verhalten wird durch externe oder interne Zustände oder Reize ausgelöst und läuft oft automatisiert oder anhand einer festen Regelbasis ab. Deliberatives Verhalten setzt voraus, dass der Agent ein Bild oder Modell von sich und seiner Umwelt besitzt und aus dem daraus resultierenden Wissen Handlungspläne entwickelt, um sein Ziel zu erreichen (vgl. Kugler und Franz 2007a, S. 74).

Tabelle 2.2: Verhaltenstypisierung von Agenten nach Schmidt (2000, S. 24 ff.)

Reaktives Verhalten	Deliberatives Verhalten
Instinktives Verhalten Durch einen äußeren Reiz wird in Abhängigkeit vom internen Zustand eine automatische Reaktion ausgelöst.	Konstruktives Verhalten Das Ziel des eigenen Verhaltens ist bewusst, kann jedoch nicht verändert werden. Es kann aber ein gedankliches Modell der Umwelt gebildet werden, anhand dessen vorausplanend Aktionen festgelegt werden können.
Erlerntes Verhalten Das Verhalten wird durch eine Regelbasis gesteuert, die durch Lernvorgänge dynamisch erweitert werden kann.	
Triebgesteuertes Verhalten Durch ein inneres Bedürfnis (Trieb) wird eine Reaktion ausgelöst.	Reflektives Verhalten Das Ziel des eigenen Verhaltens kann verändert und frei gewählt werden. Es existiert nicht nur ein Modell der Umwelt, sondern auch ein Selbstbild, welches in Entscheidungen über zukünftige Handlungsweisen mit einfließt.
Emotional gesteuertes Verhalten Eine äußere Anregung setzt einen kognitiven Prozess in Gang, der die Anregung bewertet und zu einer Reaktion führt.	

2.3.2 Multiagentensysteme

Die Bezeichnung Multiagentensystem beschreibt ein System, in dem mehrere Agenten enthalten sind. „*In einem Multi-Agentensystem kooperieren einzelne Agenten miteinander, um Probleme gemeinsam zu lösen, die die Fähigkeiten eines einzelnen Agenten übersteigen würden. (...) Zur Kooperation benötigen die Agenten Kommunikations- und Koordinationsmechanismen (...)* (Denk 2003, S. 10).“ Die einzelnen Agenten eines Multiagentensystems besitzen nur eine eingeschränkte Sicht auf das Gesamtsystem. Jeder Agent verwaltet seine Daten lokal bei sich selbst und die Aktionen, die von den Agenten ausgeführt werden, werden parallel berechnet. Eine zentrale Kontrolle besteht in einem Agentensystem in der Regel nicht (vgl. Klügl 2001, S. 17). Die Agenten können innerhalb des Systems bestimmte Rollen einnehmen. Diese Rollen definieren das normative Verhaltensrepertoire und damit die Fähigkeiten eines Agenten. Agenten mit verschiedenen Fähigkeiten können sich innerhalb eines Multiagentensystems für die Ausführung einer Aufgabe zu einer Gruppe zusammenfinden. Eine Gruppe, bei der die Beziehungen der Gruppenmitglieder untereinander sehr stabil ausgeprägt sind, so dass diese sich wenn überhaupt nur langsam verändern, wird als Organisation bezeichnet (vgl. Odell et al. 2003, S. 3).

Ein Multiagentensystem besteht daher aus zwei Beschreibungsebenen,

- der Ebene der **einzelnen Agenten** mit der Beschreibung ihres Verhaltens
- und der Ebene des **Gesamtsystems** mit einer Darstellung von Organisationen, Konstellationen und Interaktionen (vgl. Klügl 2001, S. 18).

2.3.3 Die multiagentenbasierte Simulation

Das Konzept der multiagentenbasierten Simulation lässt sich nach *Klügl (2001, S. 68 ff.)* wie folgt definieren:

„*Ein agentenbasiertes System ist ein System, dessen Schlüsselabstraktion die eines Agenten ist. (...) ein Multiagentenmodell (ist) ein Multiagentensystem in einer simulierten Umwelt, das zudem nur über seinen Bezug zu einem anderen (i. A. realen) System interpretierbar ist.*“

Die Durchführung von Experimenten auf der Grundlage eines Multiagentenmodells wird als multiagentenbasierte Simulation bezeichnet. Ein multiagentenbasiertes Simulationsmodell besteht im Wesentlichen aus den drei Komponenten **Agenten**, **Ressourcen** und **Umwelt**.

Ein simulierter **Agent** besitzt nach Klügl (2006, S. 412) folgende Eigenschaften:

1. Der Agent „*verändert nicht nur sich selbst, sondern wirkt auf seine Umwelt und bleibt in dieser persistent. Aktionen geschehen nicht nur als passive Antwort auf Umwelteinflüsse.*“
2. Er „*agiert in Relation zu seiner Umwelt – er verändert sie nicht nur, sondern bezieht Informationen aus ihr.*“
3. Er „*besitzt einen beschränkten Wahrnehmungs- und Aktionsradius (Lokalität).*“
4. Er „*verfügt über ein nichtriviales Verhaltensrepertoire.*“

Die **Umwelt** stellt eine Abstraktionsebene dar, die die Umgebungsbedingungen für die Agenten bereitstellt und die Interaktionen und den Zugang zu den Ressourcen vermittelt (vgl. Weyns et al. 2007, S. 15). Die Umwelt strukturiert ein Multiagentensystem, sie ist der gemeinsame „Raum“ für die Agenten und die Ressourcen. Als Strukturen kann die Umwelt physikalische Strukturen, wie räumliche Strukturen und Topologien, Kommunikationsstrukturen, die den Nachrichtentransfer unterstützen und soziale Strukturen, wie Rollen, Gruppen und Gesellschaften, bereitstellen (vgl. Weyns et al. 2007, S. 16).

Weyns et al. (vgl. 2007, S. 10 f.) ordnen die Umwelt eines Multiagentensystems in Bezug auf ihre Funktion verschiedenen Ebenen zu:

- **Basis-Ebene:** Die Umwelt ermöglicht den Agenten den Zugriff auf die Systemressourcen und auf zusätzliche externe Ressourcen.
- **Abstraktions-Ebene:** Die Umwelt überbrückt die Lücke zwischen der Abstraktion der Agenten und dem möglichen niedrigeren Detaillierungsgrad von Ressourcen.
- **Interaktions-Vermittler-Ebene:** Die Umwelt reguliert den Zugriff auf geteilte Ressourcen und sie vermittelt Interaktionen zwischen verschiedenen Agenten. Die Umwelt ist in dieser Ebene ein aktiver Teil des Multiagentensystems.
- **Reflexions-Ebene:** Es existiert eine Schnittstelle, die es intelligenten Agenten ermöglicht, das funktionale Verhalten der Umwelt zu verändern.

Aus der Sicht des Agenten besteht die Umwelt aus den anderen Agenten, globalen Variablen und den Ressourcen. Die globalen Variablen können Informationen beinhalten, die Einfluss

auf das Verhalten aller oder zumindest einer Gruppe von Agenten haben, wie beispielsweise die Wetterinformationen. Je komplizierter die Struktur der Umwelt aufgebaut ist, umso umfangreicher müssen das Verhalten und die Fähigkeiten eines Agenten sein, damit er sich in dieser Umwelt zurechtfinden kann.

Die in einem Simulationsmodell enthaltenen **Ressourcen** können von Agenten, welche sich in einer gemeinsamen Umwelt befinden, wahrgenommen und manipuliert werden. Die Ressource selbst kann die Umwelt aber nicht aktiv verändern, das heißt, sie wirkt nur über ihre Anzahl und ihre Eigenschaften auf das Modellverhalten ein. Ressourcen können aber durchaus eine eigene innere Dynamik besitzen, nach der sie sich selbst über einen Zeithorizont hinweg verändern können (vgl. *Klügl 2006, S. 413*).

2.3.4 Anwendungsfelder der Agentensimulation in der Wissenschaft

Die agentenbasierte Simulation wird in zunehmendem Maß in verschiedenen Forschungsvorhaben verwendet. Das Modellierungskonzept wird vor allen Dingen für Systeme verwendet, bei denen die Prozesse stark von der räumlichen Situation abhängig sind, soziale Interaktionen eine Rolle spielen, Interaktionen mit sehr vielen unterschiedlichen Akteuren stattfinden und die Beziehungen zwischen den Systemkomponenten dynamischer Natur sind. Aber auch für die Beobachtung emergenter Phänomene, bei denen sich das Gesamtsystemverhalten nur aus dem Zusammenwirken vieler unterschiedlicher, unabhängiger Einheiten erklären lässt, wird die agentenbasierte Simulation erfolgreich zum Einsatz gebracht.

In der Raum- und Stadtplanung werden agentenbasierte Modelle für die Simulation komplexer räumlicher Prozesse verwendet, um beispielsweise die Auswirkungen von Planungsentcheidungen zu untersuchen (*Bauriedel et al. 2006*). In ähnlicher Weise werden in der Landschaftsplanung Modelle erstellt, bei denen das Verhalten von Touristenströmen in der Landschaft durch Agenten simuliert wird (*Gloor 2005*).

Im Verkehrswesen werden Agenten verwendet, um das individuelle Verhalten von Verkehrsteilnehmern in Simulationsmodellen abbilden zu können, oder um transportlogistische Probleme zu lösen. So werden beispielsweise die Abläufe in Transport-Logistik-Netzwerken simuliert (*Pawlaszczyk 2006*) oder die tageszeitliche Dynamik der Verkehrsnachfrage anhand von agentenbasierten Modellen abgeschätzt (*Meister et al. 2009*).

Die Klimaforschung verwendet multiagentenbasierte Modelle, um die soziale Dynamik der Gesellschaft in Bezug auf den Klimawandel aus der Risikowahrnehmung einzelner Personen zu bestimmen (*Seidl 2009*).

In der Biologie wird insbesondere das Verhalten großer Insektenvölker, wie Bienen- oder Ameisenkolonien durch agentenbasierte Modelle nachgebildet. Von *Dornhaus et al. (2006)* wird beispielsweise der Nutzen von Anwerbungs-Strategien für die Honigsuche von Bienen unter Berücksichtigung der ökologischen Bedingungen und der Koloniegröße ermittelt.

Die Wirtschaftswissenschaften verwenden agentenbasierte Modelle, um marktwirtschaftliche Abläufe zu simulieren, wie z. B. Verhandlungen zwischen verschiedenen Marktteilnehmern oder die Interaktionen zwischen verschiedenen Mitgliedern einer Wertschöpfungskette (*Eymann und Padovan 1999*). *Herrler (2007)* entwickelte ein agentenbasiertes Simulationsmodell, mit dem die Terminplanung in Krankenhäusern optimiert werden kann. Im Mittelpunkt stehen die Betrachtung der Auslastung verschiedener, verteilter Behandlungs- oder Untersuchungsstationen, wie z. B. der Röntgenabteilung oder dem EKG und die Simulation der Terminverhandlungen, die zwischen den verschiedenen Behandlungsstationen stattfinden.

Die agentenbasierte Simulation wurde aber auch schon für die Planung von Lagerhallen und Produktionsstätten eingesetzt. Als Beispiele seien hier die Entwicklung einer Testumgebung für die Steuerungssoftware eines Hochregallagers (*Triebig et al. 2005*) oder die Simulation der Abläufe in einem Mehlsilo mit integrierter Mischung der verschiedenen Mehlsorten (*Ulbrich et al. September 2009*) genannt.

2.3.5 Anwendungsfelder der Agentensimulation im Bauwesen

In den Fachgebieten der Bauorganisation und der Baubetriebswirtschaft wird die agentenbasierte Simulation bisher nur selten verwendet. Die einfache Integration von Umgebungsbedingungen und Räumlichkeiten in die agentenbasierten Modelle führt jedoch dazu, dass sich auch im Bauwesen eine wachsende Zahl von Forschungsvorhaben mit der agentenbasierten Simulation beschäftigen. Die vielen wechselnden Interaktionen auf einer Baustelle und die große Anzahl an Projektbeteiligten sind weitere Systemeigenschaften, die sich durch das agentenbasierte Modellierungskonzept sehr gut abbilden lassen.

*Sawhney et al. (2003)*⁴ implementierten ein agentenbasiertes Simulationsmodell, in welchem der Bau einer Einfamilienhaussiedlung mit 50 Wohneinheiten simuliert wird. Vereinfachend werden in diesem Modell nur 3 Gewerke mit einer bestimmten Ausbautätigkeit betrachtet. Ein Agent bildet jeweils eine Arbeitsgruppe nach, die einem der Gewerke zugeordnet ist. Für die Dauer der Tätigkeiten und für die Wahrscheinlichkeit einer zufriedenstellenden Ausführung der Arbeit werden stochastische Verteilungen angenommen. Werden Tätigkeiten von den Arbeitsgruppen nur mangelhaft ausgeführt, müssen diese von Reparaturkolonnen nachgearbeitet werden. Anhand des Modells wird von *Sawhney et al. (2003)* der Einfluss der Arbeitsqualität auf die Dauer und die Auslastung der Arbeitsgruppen betrachtet. *Sawhney et al. (2003)* erwägt außerdem den Einsatz der agentenbasierten Simulation, um Sicherheitskonzepte für Baustellen zu erarbeiten.

Der Einsatz interaktiver, agentenbasierter Simulationsmodelle für baubetriebswirtschaftliche Anwendungszwecke wird von *Mukherjee und Rojas (2003)* vorgestellt. Mukherjee entwickelte ein multiagentenbasiertes System (Framework), welches die Entwicklung von situationsbezogenen Simulationen in der Unternehmensplanung ermöglicht (*Mukherjee et al. 2004*). Das Framework beruht konzeptionell auf einer Betrachtung der baubetriebswirtschaftlichen Fragestellungen als Constraint-Satisfaction-Problem (CSP). Basierend auf dem Framework wurde von Mukherjee ein virtueller Trainer (Virtual Coach) erstellt, der insbesondere Bauingenieursstudenten und Berufsanfängern ein Verständnis für die Auswirkungen baubetriebswirtschaftlicher Entscheidungen vermitteln soll (*Mukherjee 2005*). Der Anwender kann während eines Simulationslaufes interaktiv Ressourcenzuweisungen verändern und die Auswirkungen seiner Entscheidungen verfolgen.

In der speziell für die Betrachtung von Bauabläufen konzipierten Simulationsumgebung „*Symphony*“ können ebenfalls Agenten in das Simulationsmodell integriert werden (*Van Tol und Abourizk 2006*). Es handelt sich hierbei aber nicht um eine Multiagentensimulation, bei der die Agenten die Schlüsselabstraktion des Modells darstellen. In „*Symphony*“ fungieren die Agenten innerhalb der Simulationsumgebung als intelligente Echtzeitbeobachter des Simulationsmodells. Während des Simulationslaufes können sie Entscheidungen treffen, welche die Ergebnisse des Simulationslaufes verbessern sollen. Die Entscheidungsbasis der Agenten wird durch so genannte „*belief networks*“ gebildet, in welchen die Beobachtungen des Agenten aufgezeichnet werden (*Kugler und Franz 2008, S. 153 f.*).

⁴ Der Text auf dieser Seite wurde bereits bei *Kugler und Franz (2008, S. 153 f.)* veröffentlicht.

Bergmann (2011) entwickelte ein agentenbasiertes Simulationsmodell für die Prognose der Ausführungszeiten für die Fassadenmodulmontage unter Berücksichtigung unterschiedlicher Randbedingungen. Die Arbeitskräfte und Vorhalte- und Leistungsgeräte werden in dem Simulationsmodell als Agenten modelliert. Die simulierten Arbeiten werden immer in einer aus zwei Agenten bestehenden Kolonne ausgeführt. Ein Monteur-Agent montiert auf einer Hubarbeitsbühne die Fassadenmodule an der Wand, während ein Stapler-Agent die Fassadenmodule von der Anlieferungsstelle zum Montageort transportiert (vgl. *Bergmann 2009, S. 410*). Ein Arbeitsgang wird immer durch einen Monteur-Agenten initiiert. Dieser stellt eine Anfrage zur Anlieferung von Fassadenmodulen an verschiedene Stapler-Agenten. Die Stapler antworten je nach Arbeitsstatus mit einem Angebot oder einer Absage. Der Monteur nimmt eines der Angebote an und montiert mit diesem Teleskopstapler das Fassadenmodul. Sobald der Stapler nicht mehr vom Monteur benötigt wird, kann dieser mit anderen Monteuren zusammenarbeiten, während die restlichen Montagearbeiten von dem Monteur alleine beendet werden (vgl. *Bergmann 2009, S. 411*). „*Durch die flexible Gestaltung der Kooperation aufgrund der Kommunikationsfähigkeit der Agenten ist eine realitätsnahe Modellierung des Ressourceneinsatzes und der Abhängigkeiten von Montage- und Transportkapazitäten möglich*“ (*Bergmann 2009, S. 411*). Ausgewertet werden die Simulationsläufe, indem einzelne Variablenwerte während der Simulation erfasst und in Excel-lesbare CSV-Dateien gespeichert werden. Die Validierung des Modells ergab im Vergleich zu der händisch ermittelten Grundzeit eine vertretbare zeitliche Abweichung von 6 % zwischen errechneter und simulierter Zeit. Bergmann sieht es aufgrund seiner Ergebnisse als belegt an, „*dass eine agentenbasierte Bauablaufsimulation in der Lage ist, technologische und kapazitive Abhängigkeiten realistisch nachzubilden*“ (*Bergmann 2009, S. 416*). Die unterschiedlichen Startszenarien ermöglichen es, unterschiedliche Randbedingungen durchzuspielen und so einen optimierten Ressourceneinsatz zu ermitteln. Agentenbasierte Simulationsmodelle bieten nach Bergmann darüberhinaus den Vorteil einer intuitiven Verständlichkeit des Modells, da die Arbeitskräfte im Modell als Individuen erkennbar sind (vgl. *Bergmann 2009, S. 416*).

2.3.6 Vergleich mit anderen Modellierungskonzepten

Die Verwendung agentenbasierter Simulationsmodelle ist nicht trivial. Ein Anwender muss vor dem Einsatz der multiagentenbasierten Simulation abschätzen, ob der Einsatz dieser Simulationsmethodik wirklich notwendig ist und aus welchem Grund für das zu untersuchende System keine einfachere Modellierungs- und Simulationsmethodik existiert (vgl. Klügl et al. 2002, S. 105).

Um zu rechtfertigen, warum in der vorliegenden Forschungsarbeit ein agentenbasierter Modellierungsansatz gewählt wurde und um darzustellen, welche Vor- und Nachteile das agentenbasierte Modellierungskonzept im Vergleich zu anderen Modellierungskonzepten besitzt, wird die agentenbasierte Modellierung in diesem Kapitel mit anderen Modellierungskonzepten verglichen. Der Vergleich stützt sich analytisch auf eine Literaturoauswertung. Eine eigene empirische Untersuchung fand nur in Bezug auf das agentenbasierte Konzept statt. Behandelt werden das agentenbasierte, das bausteinorientierte und das petrinetzbasierte Modellierungskonzept, sowie zellulare Automaten und Warteschlangennetze.

Chahrour und Franz (2004) verglichen das bausteinorientierte und das petrinetzbasierte Modellierungskonzept in Bezug auf ihre Eignung für bauspezifische Anwendungen. Sie implementierten das Zusammenspiel zwischen Bagger oder Lader und Schwerlastwagen auf einer Erdbauanstelle jeweils mit einem bausteinorientierten (eM-Plant, jetzt Plant Simulation) und einem petrinetzbasierten (PACE) Simulationswerkzeug (vgl. *Chahrour und Franz* 2004, S. 334).

Bausteinorientierte Simulatoren, wie z. B. Plant Simulation oder Enterprise Dynamics, haben in der stationären Industrie einen hohen Verbreitungsgrad. Die Simulationskomponenten werden in Form von Bausteinen definiert, die in Bausteinbibliotheken verwaltet werden. Die „*Bausteine können als Teilmodelle verstanden werden, die in einer Reihe nachfolgender Simulationsstudien wieder verwendet werden*“ (Rabe et al. 2008, S. 130). Neue Simulationsmodelle lassen sich dadurch modular aus bereits bestehenden Bausteinen erstellen, was während der Entwurfs- und Implementierungsphase erhebliche Zeitsparnisse bewirken kann. Die verfügbaren bausteinorientierten Simulatoren sind vorwiegend auf die Darstellung des Materialflusses spezialisiert und bieten in der Regel realitätsgetreue Visualisierungen an.

Dies zeigte sich auch in dem von *Chahrour und Franz (2004)* durchgeführten Vergleich zwischen dem bausteinorientierten- und dem petrinetzbasierten Simulationswerkzeug. Die Visua-

lisierung des Baugeschehens gestaltete sich mit dem bausteinorientierten Werkzeug wesentlich anschaulicher, als unter Verwendung des petrinetzbasierten Werkzeugs. Das petrinetzbasierte Werkzeug ermöglichte allenfalls eine nicht anschauliche symbolische Visualisierung, die wenig über den Ablauf aussagte (*vgl. Chahrour und Franz 2004, S. 335*). Eine wirkliche realitätsgtreue Visualisierung erfordert jedoch eine gleichermaßen detailgetreue Modellierung des Bauablaufs und eine vorhergehende Aufnahme der notwendigen Einzelbewegungen (*vgl. Chahrour 2007, S. 25*). Diese Tatsache führt zu einem erheblichen Modellierungsaufwand, der bei der im Bauwesen vorherrschenden Unikatfertigung nur schwer zu rechtfertigen ist. *Chahrour und Franz* (*vgl. 2004, S. 335*) befürchten, dass sich dadurch der Aufwand und Inhalt der Simulationsstudie von der eigentlichen Problemstellung hin zu einer graphischen Modellgestaltung verlagert. Die Anordnung der Bausteine in einem Grundriss sehen sie darüberhinaus mit großen Einschränkungen verbunden. Da sich der Materialfluss in einer Fabrik meistens an festen Bearbeitungsstationen orientiert, müssen für die Simulationskomponenten in bausteinorientierten Simulationswerkzeugen Wegenetze, Bearbeitungsstationen und Lagerplätze vordefiniert werden (*vgl. Weber 2007a, S. 110*). Eine freie Bewegung und Orientierung der Simulationsbausteine im Raum ist nicht ohne Weiteres möglich. Da sich die Koordinaten der Materialquellen und -senken bei einer Baumaßnahme ständig verändern, muss bei der Festlegung von Lagerplätzen, Wegenetzen und Einbauorten ein hoher Arbeitsaufwand geleistet werden.

Die Modellierung des bausteinorientierten Modells kann auf Grundlage der Bausteine auch durch nicht-Simulationsexperten erfolgen, während sich die Handhabung bei petrinetzbasierten Modellen schwieriger gestaltet und insbesondere die Parametrisierung einen hohen Aufwand verursacht. Durch den modularen Aufbau der bausteinorientierten Modelle können diese der Variabilität auf den Baustellen gerecht werden. Petri-Netze bieten durch ihre Netzstruktur gleichfalls den Vorteil, dass sie eine große Flexibilität beim Modellaufbau ermöglichen. Bei hierarchisch strukturierten Petri-Netzen lassen sich ebenfalls Teilmodelle für bestimmte Bereiche des Simulationssystems bilden, jedoch lassen sich diese nicht so einfach modular zu neuen Szenarien zusammenstellen.

Bausteinorientierte und agentenbasierte Modellierungskonzepte besitzen eine ganze Reihe von Gemeinsamkeiten. Die Simulationsmodelle lassen sich bei beiden Konzepten modular aufbauen. Sowohl Bausteine wie auch Agenten lassen sich daher für neue Szenarien flexibel neu kombinieren. Beide Konzepte besitzen eine räumliche Repräsentationsebene, in der die

Bausteine oder die Agenten angeordnet werden können. Möglichkeiten zu einer direkten Visualisierung der simulierten Abläufe sind bei beiden Konzepten gegeben. Da die meisten bausteinorientierten Simulationswerkzeuge aufgrund ihrer weit verbreiteten Anwendung in der stationären Industrie schon sehr weit entwickelt sind (als Beispiele seien hier Plant Simulation und Enterprise Dynamics genannt), besitzen sie im Vergleich zu den meisten agentenbasierten Simulationswerkzeugen jedoch mehr Möglichkeiten in Bezug auf eine professionelle Visualisierung. Gleiches gilt für die enthaltenen Funktionalitäten zur Auswertung der Simulationsexperimente. Der Quellcode dieser professionell entwickelten Simulatoren ist jedoch nicht frei zugänglich, so dass der Anwender nur die im Programmumfang enthaltenen Werkzeuge für die Entwicklung der Simulationsmodelle nutzen kann. Die Mehrzahl der agentenbasierten Simulatoren wurden im wissenschaftlichen Kontext entwickelt und stehen daher häufig unter der General Public License (GNU), so dass auch eine Weiterentwicklung des Quellcodes möglich ist.

Unterschiede zwischen dem agenten- und dem bausteinbasierten Modellierungskonzept werden besonders in Bezug auf die Schnittstellen der Bausteine und der Agenten deutlich. Da die meisten bausteinorientierten Simulationswerkzeuge auf die Simulation von Materialflüssen spezialisiert sind, die in der stationären Produktion im Mittelpunkt von Simulationsstudien stehen, kommunizieren die Bausteine miteinander über vordefinierte Funktionen und Schnittstellen. Über diese festen Schnittstellen werden Informationen zum bearbeiteten Produkt weitergegeben.

Agenten kommunizieren in der Regel über den Austausch von Nachrichten, die intern von den Agenten verarbeitet werden. Zusätzlich besitzen die Agenten Sensoren, deren Wahrnehmung bei der Auswahl von folgenden Aktionen oder bei der Formulierung von ausgehenden Nachrichten Berücksichtigung finden. Das agentenbasierte Konzept besitzt daher eine größere Flexibilität in Bezug auf das Zusammenwirken verschiedenartiger Komponenten. Während Bausteine auf die aus den festen Schnittstellen eingehenden Informationen mit einem Bearbeitungsskript reagieren, können Agenten ihre Wahrnehmung und eingehende Nachrichten interpretieren. Sie sind daher nicht zwingend auf bestimmte Schnittstellen angewiesen, um mit anderen Komponenten des Simulationsmodells zu interagieren. Der Nachteil dieses Konzepts besteht darin, dass agentenbasierte Modelle weniger stark formalisierbar sind. So können Nachrichten falsch oder gar nicht verarbeitet werden, was zu einem fehlerhaften Simulationsablauf führen kann.

Agenten weisen gegenüber den Bausteinen außerdem eine größere Flexibilität in Bezug auf das Anwendungsspektrum auf. Während Bausteine klar definierte Ein- und Ausgabeparameter besitzen, die das Anwendungsspektrum begrenzen, können Agenten ein sehr umfangreiches Verhaltensrepertoire besitzen, dass Reaktionen auf ganz unterschiedliche Parameter, wie Nachrichten, Veränderungen in der Umwelt und Veränderungen innerhalb der internen Zustände der Agenten, ermöglicht. Durch seine Sensoren kann sich ein Agent zusätzlich in komplexen Raummodellen orientieren. Bausteine besitzen nur feste Schnittstellen und keine Sensoren über die sie die Umwelt erfassen. Agenten können dadurch einfacher und flexibler auf Veränderungen in der Umwelt reagieren und auch mit ganz unterschiedlichen Agenten in Interaktion treten. Je mehr Interaktionsfähigkeiten ein Agent besitzt, um so komplexer wird jedoch auch sein Verhaltensrepertoire, was die Wartung und Weiterentwicklung der Agenten erheblich erschweren kann.

Das Gesamtsystemverhalten eines agentenbasierten Simulationsmodells ergibt sich aus dem Zusammenspiel der einzelnen Agenten. In diesem Zusammenhang sehen auch Wagner *et al.* (2008, S. 47) die Vorteile der agentenbasierten Simulation. Sie stellen fest, dass im Vergleich zur agentenbasierten Simulation „*die Modellierung und Simulation komplexer Systeme, die aus mehreren Subsystemen bestehen, (...) in der traditionellen Diskreten-Ereignis-Simulation schnell an ihre Grenzen (stößt), da es keine Methodik gibt, das Gesamtsystem als Komplex interagierender Subsysteme zu modellieren.*“ Die Aktionen der Agenten werden unabhängig voneinander in Abhängigkeit von ihren internen Zuständen und vom Zustand der Umwelt ausgeführt. Dadurch ist in agentenbasierten Modellen sowohl die Darstellung von nebenläufigen Prozessen, als auch von Prozessen, die in kausaler Abhängigkeit zueinander stehen, möglich. Bausteinorientierte Modelle arbeiten die Prozesse in der Regel sequentiell in einer festgelegten Reihenfolge ab, wobei ebenfalls Verzweigungen und Parallelitäten im Verarbeitungsprozess möglich sind.

Die Multiagentenbasierte Simulation stellt als eigenständiges Modellierungskonzept besondere Anforderungen an die Systemanalyse und den Entwurf des Modells. Der Abstraktionsgrad ist bei agentenbasierten Modellen geringer als bei anderen Modellierungskonzepten, da die Modellkomponenten nach ihrer Entsprechung im realen System modelliert werden. Die Fähigkeiten und Eigenschaften der realen Objekte werden direkt in den Agenten und Ressourcen des Modells abgebildet. Die Abgrenzung des Detaillierungslevels gestaltet sich jedoch in

agentenbasierten Modellen oft schwierig, da die direkte Abbildung der realen Objekte in einem Modell zu einem hohen Detaillierungsgrad verleitet.

Ein weiterer Vergleich verschiedener Modellierungskonzepte wurde von *Klügl et al. (2002)* durchgeführt, die ein Simulationsmodell mit vier unterschiedlichen Modellierungskonzepten implementierten. Zur Anwendung kamen multiagenten- und petrinetzbasierte Modellierungskonzepte sowie zellulare Automaten und Warteschlangennetze. Modelliert und implementiert wurde ein Beispielsystem aus der Biologie. Das Modell sollte in der Lage sein, den Zusammenhang zwischen der Nektareingangsleistung eines Bienenstocks und der Rekrutierungsstrategie der Arbeiterbienen darzustellen. Die Haupteingabeparameter des Modells bestanden aus den in der Umwelt verfügbaren Nektarquellen. Die Anzahl der Bienen, die sich auf Nektarsuche befanden, war abhängig von dem Energilevel der individuellen Bienen sowie von dem gesamten Nektarvorrat des Bienenstocks. Bei der Modellierung des Systems mussten daher interne Zustände der beteiligten Individuen (Energilevel), globale Variablen (Nektarvorrat), Interaktionen mit variablen Partnern (Bienen) und räumliche Parameter (Verteilung der Ressourcen) beachtet werden.

Dieses von *Klügl et al. (2002)* bearbeitete Beispiel ist für die Betrachtung von Bauabläufen insbesondere aufgrund der im Vergleich mit dem Bauwesen ähnlichen Systemeigenschaften von Interesse. Auch bei der Simulation eines Bauablaufes spielen interne Zustände der beteiligten Arbeitskräfte (Ausbildungsstand, Einarbeitungseffekt und Motivation), globale Variablen (Projektparameter und Störungseinflüsse wie das Wetter), Interaktionen mit individuellen Partnern (innerhalb einer Arbeitsgruppe, zwischen verschiedenen Arbeitsgruppen und zwischen verschiedenen Gewerken) und räumliche Parameter (individueller Grundriss und Baufortschritt) eine große Rolle.

Bei den zunächst von *Klügl et al. (vgl. 2002, S. 106 f.)* verwendeten Warteschlangen- und Petri-Netzen zeigte sich, dass insbesondere die bei diesen Konzepten fehlenden Möglichkeiten zur Darstellung des Raums zu Problemen führte. Räumliche Bewegungen konnten nur über deterministische oder stochastische Flugzeiten definiert werden. Bei multiagentenbasierten Modellen lassen sich auch sehr heterogen strukturierte räumliche Situationen in der Umwelt sehr gut darstellen. Agenten besitzen eine direkte Repräsentation ihrer räumlichen Bewegungen in der Umwelt, so dass sich ihre Bewegungen sehr realitätsnah abbilden lassen.

Die ebenfalls untersuchten zellularen Automaten eignen sich besonders für die Darstellung von diskret-dynamisch-räumlichen Systemen. Sie bestehen aus einem Gitternetz von Zellen, welche eine gemeinsame Regelbasis besitzen. Der Zustand einer Zelle bestimmt sich aus dieser Regelbasis sowie aus den Zuständen der Nachbarzellen. *Klügl et al.* (vgl. 2002, S. 108) stellten fest, dass individuelles Verhalten in einem zellularen Automaten nur sehr aufwendig modelliert werden kann, da die Verhaltensregeln in die übergeordnete Regelbasis aller Zellen integriert werden müssen.

Bei Warteschlangennetzen konnten die internen Zustände der Individuen nicht berücksichtigt werden, was bei den Petri-Netzen durch die Verwendung farbiger Token (Marken) und bei dem agentenbasierten Modell über interne Variablen gelang. Sehr kompliziert gestaltete sich bei Warteschlangen- und Petri-Netzen die Integration der notwendigen Umgebungsvariablen, was im Vergleich dazu im multiagentenbasierten Modell über die Variablen der Umwelt sehr einfach umgesetzt werden konnte.

Gegenüber der Multiagentensimulation haben Warteschlangen- und Petri-Netze den Vorteil, dass die Modelle in einer sehr viel stärkeren formalen Prägnanz formuliert werden können, die Mehrdeutigkeiten verhindert. „*Der Preis für diesen Vorteil ist, dass die enthaltenen Informationen verdichtet und abstrahiert werden müssen*“ (*Klügl et al.* 2002, S. 108). Klare, deterministische Prozessabfolgen oder Systeme mit nicht autonomen Verhaltensweisen, mit festen, direkten Beziehungen zwischen den Systemkomponenten, lassen sich daher einfacher in Petri-Netzen oder Warteschlangenmodellen abbilden als in multiagentenbasierten Modellen.

Schwierigkeiten bereitete bei der Verwendung der Multiagentensimulation auch die Modellierung des übergeordneten Systemverhaltens, da dieses sich aus dem Verhalten der vielen beteiligten Individuen zusammensetzt und daher nicht direkt in einem klaren Prozessablauf beschrieben werden kann. Das Verhalten eines simulierten Agenten ergibt sich wiederum als Reaktion auf die Strukturen seiner Umwelt, wodurch sich im Vergleich mit anderen Modellierungskonzepten flexible Entscheidungen einfacher realisieren lassen (vgl. *Klügl* 2006, S. 413). Die räumliche Situation lässt sich in einem Multiagentenmodell sehr gut abbilden und konfigurieren. Interaktionen mit wechselnden, individuellen Partnern lassen sich unter Verwendung eines Multiagentenmodells ebenfalls deutlich einfacher beschreiben als mit festen Netzstrukturen. Die internen Zustände der Individuen lassen sich über das Agentenkonzept bei jedem der beteiligten Individuen sehr einfach darstellen.

Die Darstellung der Vor- und Nachteile in den drei folgenden Vergleichsmatrizen stellt das zusammenfassende Ergebnis der vorhergehenden LiteratURAUSWERTUNG dar. Die Vor- und Nachteile der jeweiligen Modellierungskonzepte lassen sich nicht eindeutig quantitativ erfassen, so dass in den nachfolgenden Tabellen ein qualitativer Vergleich der Vor- und Nachteile der verschiedenen Modellierungskonzepte vorgenommen wird. Die in den Matrizen verwendete Abkürzung „MABS“ steht für „multiagentenbasierte Simulation“.

Tabelle 2.3 enthält einen Vergleich der Eigenschaften der Modellierungskonzepte. Diese sind nur sehr schwer zu vergleichen, da sie sich oftmals auch auf die Möglichkeiten der Simulationswerkzeuge beziehen in denen die Modellierungskonzepte umgesetzt wurden. Die Symbole kennzeichnen wie gut die jeweilige Eigenschaft von dem Modellierungskonzept unterstützt wird: „+“ : sehr gut unterstützt, „+/-“ : unterstützt, „-“ : nur ansatzweise unterstützt.

Tabelle 2.3: Eigenschaften der Modellierungskonzepte

Modellierungs-konzept des Konzepts	Petri - Netze	Warteschlan-gennetze	baustein-orientiert	zellulare Automaten	MABS
modularer Modellaufbau	-	-	+	-	+
Visualisierung	-	-	+	+/-	+
formale Prägnanz des Modells	+	+	+/-	+/-	-
Abstraktionsgrad	sehr hoch	sehr hoch	mittel	hoch	gering
notwendiges Expertenwissen	hoch	hoch	mittel/hoch	sehr hoch	sehr hoch

In Tabelle 2.4 wird die Eignung der Modellierungskonzepte in Bezug auf die Eigenschaften der zu simulierenden Systeme dargestellt. Die verwendeten Symbole haben in dieser Tabelle folgende Bedeutung: „+“ : gut geeignet, „+/-“ : geeignet, „-“ : weniger geeignet.

Tabelle 2.4: Eignung der Modellierungskonzepte für verschiedene Systemmerkmale

Systemmerkmal \ Modellierungskonzept	Petri-Netze	Warteschlangennetze	bausteinorientiert	zellulare Automaten	MABS
nebenläufige Prozesse / nicht-sequentielle Prozessabfolgen	+/-	-	+/-	+	+
Prozesse in kausaler Abhängigkeit	+	+	+	+	+
rein sequentielle Prozessabfolgen	+	+	+	-	-
räumliche Verteiltheit des Systems / ortsveränderliche Produktion	-	-	+/-	+	+
räumliche Repräsentationsebene / Integration räumlicher Parameter	-	-	+	+	+
organisatorische Verteiltheit	-	-	-	-	+
globale Systemvariablen	+/-	-	+	+	+
übergeordnetes Systemverhalten	-	-	+	-	+
heterogene Struktur des Gesamtsystems	+/-	+/-	+/-	-	+
stationäre Produktion	+	+	+	-	-
Logistik	+/-	+/-	+	-	+

In Tabelle 2.5 wird die Eignung der verschiedenen Modellierungskonzepte in Bezug auf das Verhalten der in dem zu simulierenden System enthaltenen Systemkomponenten verglichen. Die verwendeten Symbole haben in dieser Tabelle folgende Bedeutung: „+“ : gut geeignet, „+/-“ : geeignet, „-“ : weniger geeignet.

Tabelle 2.5: Eignung der Modellierungskonzepte in Bezug auf das Verhalten der Systemkomponenten

Modellierungs-Verhalten der Systemkomponenten konzept	Petri - Netze	Warteschlangennetze	baustein-orientiert	zellulare Automaten	MABS
Orientierung der Komponenten im Raum	-	-	+/-	+/-	+
Kommunikation mit anderen Komponenten	-	-	+/-	-	+
Interaktionsfähigkeit der Komponenten mit variablen Partnern/ wechselnde Interaktionen mit anderen Systemkomponenten / Flexibilität	-	-	-	-	+
feste Beziehungen zu anderen Systemkomponenten	+	+	+	-	-
individuelles Verhalten der Systemkomponenten	-	-	+	-	+
Anwendungsspektrum der Komponenten	spezialisiert	spezialisiert	spezialisiert	spezialisiert	sehr umfangreich
hohe Dynamik der Systemkomponenten	+	-	-	+	+
interne Zustände der Systemkomponenten	+/-	-	+	+	+
flexible Entscheidungen	+/-	+/-	+/-	+/-	+

Eignung der agentenbasierten Simulation für die Bauablaufsimulation

Klügl et al. (vgl. 2002, S. 109) empfehlen den Einsatz der agentenbasierten Modellierungs-technik bei folgenden Systemeigenschaften:

- bei inhomogenem Raum (besonders, wenn sich dieser zusätzlich umgestaltet)
- bei Interaktionen mit flexiblen, individuellen Akteuren, deren Beziehungen untereinander dynamisch sind

- wenn das Verhalten der Systemkomponenten abhängig von globalen Eigenschaften oder Werten ist

Als Vorteile der Multiagentensimulation gegenüber anderen Simulationstechniken werden von *Klügl* (2006, S. 414) genannt:

- „*Direkte und intuitive Modellierung flexibler und lokaler Interaktionen zwischen aktiven Einheiten – mit oder ohne expliziter Repräsentation von Raum;*
- *Vergleichsweise einfache Integration von mehreren Modellierungs- und Beobachtungsebenen;*
- *Simulation von emergenten Phänomenen und Nicht-Linearitäten;*
- *Einfache Behandlung von variablen Strukturen;*
- *Beliebiger Detaillierungsgrad des Modells;*
- *Angemessene Modellierung (intelligenten) menschlichen Verhaltens.“*

Herrler (vgl. 2007, S. 45) stellte folgende Kriterien auf, bei denen sich die Anwendung einer agentenbasierten Simulation eignet:

- bei der Simulation räumlich verteilter Umgebungen mit räumlich und organisatorisch verteilten Produktionseinheiten, die nur über eine lokale Wahrnehmung verfügen
- bei aktiven Simulationskomponenten, die ihre Umgebung aktiv umgestalten
- bei der Simulation von abhängigen Prozessen, die sich wechselseitig beeinflussen und bei denen die isolierte Betrachtung einzelner Prozesse nur geringe Rückschlüsse auf das Gesamt-Systemverhalten zulässt

Weiß und Jakob (2005, S. 10) sehen die Vorteile der Agentenorientierung vor allen Dingen bei der Realisierung von Anwendungen, die durch folgende Merkmale gekennzeichnet sind:

- „*Verteiltheit, d.h. Daten, Informationen und Wissen liegen räumlich und oder logisch verteilt vor und werden verteilt verarbeitet;*
- *Offenheit, d.h. die Anzahl und der Typ der Hardware- und Software-Komponenten, die in der Anwendung involviert sind, ist variabel und möglicherweise a priori (zur Designzeit) nicht genau bekannt und*

- *Einbettung in komplexe – dynamische, schwer vorhersagbare, nur beschränkt einsehbare, heterogene, usw. – sozio-technische Umgebungen („situierte Anwendungen“)“*

Obwohl sich diese Auflistung eher auf die Entwicklung agentenbasierter Software als auf agentenbasierte Simulationsmodelle bezieht, werden auch hier ähnliche Systemmerkmale genannt wie in den vorherigen Aufzählungen.

Nach *Wagner et al.* (vgl. 2008, S. 47) sind agentenbasierte Simulationsmodelle besonders für soziale, technische und sozio-technische Systeme, wie z. B. Verkehrs- und Logistik-Systeme, geeignet. Der Logistik kommt auf der Baustelle eine oftmals unterschätzte Rolle zu. Nach *Boenert und Blömeke* (2003) werden etwa 29,9 % der Bauzeit bei Ausbauprojekten für Transporttätigkeiten, zurückzulegende Wege, Materialsuche und Auf- und Umräumarbeiten aufgewandt. Die logistischen Tätigkeiten üben daher einen zeitlich äquivalenten Einfluss auf die Bauarbeit aus, wie die eigentliche Haupttätigkeit am Gewerk, die 30,9 % der Bauzeit beansprucht. Auf einer Baustelle existieren im Gegensatz zu einem stationären Produktionsort aber keine festen Wegenetze, keine festen Lagerplätze und keine festen Materialquellen und -senken. Zusätzlich spielen aber logistische Kapazitäten, wie z. B. die Auslastung von Kranen oder von Lastenaufzügen eine große Rolle.

Agentenbasierte Simulationsmodelle eignen sich besonders für die Simulation von Systemen, bei denen raumbezogenes Handeln in einer inhomogenen und dynamischen Umgebung im Vordergrund steht. Die Möglichkeit der Agenten (Produzenten) sowohl den Produktionsort als auch die Quelle (Lagerplätze) des Materials selbstständig über Sensoren zu erfassen, ermöglicht eine umfassende, detaillierte und realitätsgerechte Berücksichtigung der logistischen Prozesse auf einer Baustelle. Die Agenten können sich im dynamischen, räumlichen Umfeld der Baustelle selbstständig orientieren und eine adäquate Wegfindung vornehmen. Das ermöglicht es außerdem, sie in beliebigen Bauprojekten mit ganz unterschiedlichen räumlichen Grundrissen einzusetzen (vgl. *Kugler und Franz* 2009, S. 188).

Die Offenheit agentenbasierter Modelle in Bezug auf die Anzahl und den Typ der Systemkomponenten eignet sich in besonderem Maße dafür, die Situation auf einer Baustelle mit ständig wechselnder Belegschaft, Arbeitskräften mit unterschiedlichen Qualifikationen und den verschiedenen Betriebsmitteln, realitätsgerecht nachzubilden. Hinzukommt, dass die Beziehungen zwischen den Akteuren auf einer Baustelle dynamischer Natur sind und ständig variieren. So verändert sich aufgrund der jeweiligen Anforderungen der unterschiedlichen

Tätigkeiten auf der Baustelle die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Arbeitskräften innerhalb kurzer Zeiträume oder es werden häufig wechselnde Betriebsmittel eingesetzt.

Dass in Form der unterschiedlichen Qualifikationen verteilte Wissen und die vielen kleinen im Bauwerk verteilten Produktionsorte, die nebenläufig sind oder in kausaler Abhängigkeit zueinander stehen, sind ebenfalls Systemeigenschaften, die sich nach Aussage der zuvor genannten Autoren besonders gut in agentenbasierten Simulationsmodellen abbilden lassen.

Bei einem Bauprojekt sind aber nicht nur die Produktionsorte, sondern auch die Zuständigkeiten, verteilt. So existiert zwar in der Regel eine übergeordnete Bauablaufplanung, die vorgibt, wann mit einer bestimmten Arbeit begonnen werden soll, die konkrete Arbeit am Bauwerk wird aber dezentral von einer Arbeitsgruppe organisiert und ausgeführt. Die Zusammensetzung der Arbeitsgruppe, die Verfügbarkeit der Ressourcen und die Platzverhältnisse bestimmen mit darüber, wie die Arbeiten vor Ort ausgeführt werden. Eigene Zielstellungen der verschiedenen Arbeitsgruppen können zu gegenseitigen Behinderungen und zu einer Konkurrenz um die vorhandenen Ressourcen führen.

Die Interaktionsfähigkeit der Agenten ermöglicht es, diese Konkurrenzsituation auf der Baustelle nachzubilden. Durch den modularen Aufbau eines agentenbasierten Simulationsmodells können in Abhängigkeit von den Projekterfordernissen die Arbeitsgruppen, Betriebsmittel und der Gebäudegrundriss frei miteinander in einem Ausgangsszenario kombiniert werden. Über die Umwelt der agentenbasierten Simulationsmodelle können globale Einflussfaktoren, wie z. B. das Wetter, die Arbeitszeiten und Feiertage, in das Modell integriert werden (*vgl. Kugler und Franz 2009, S. 189*).

3 Analyse des Systems „Hochbau“

In diesem Kapitel sollen durch eine Systemanalyse Gesetzmäßigkeiten innerhalb des Bauablaufs aufgedeckt werden, die sich für die Modellierung von Simulationsmodellen und die Entwicklung eines Prozessmodells verwenden lassen. Es findet daher keine detaillierte Be- trachtung bestimmter, einzelner Fertigungsprozesse statt. Vielmehr werden auf einer höheren Abstraktionsebene die Gemeinsamkeiten der Fertigungsprozesse identifiziert. Außerdem wer- den aufbauend auf die REFA-Methodenlehre und der VOB grundlegende Definitionen für die Elemente des Systems „Hochbaustelle“ beschrieben, aus denen in den Kapiteln 4 und 5 die Terminologie des Prozess- und des Simulationsmodells entwickelt wird.

3.1 Methodisches Vorgehen bei der Systemanalyse

Ein System wird in der *VDI-Richtlinie 3633 (VDI 3633 - Blatt 1 1993, S. 3)* als „*eine abge- grenzte Anordnung von Komponenten, die miteinander in Beziehung stehen*“ bezeichnet. Das System wird in der VDI-Richtlinie im Wesentlichen durch seine **Systemgrenzen**, die **Kom- ponenten**, die **Ablauf- und Aufbaustruktur** und die **Systemdaten** beschrieben.

Die Definition eines „Arbeitssystems“ in der REFA-Methodenlehre bezieht sich konkreter auf die Produktion. „*Das Arbeitssystem dient der Erfüllung einer Arbeitsaufgabe*“ und wird durch folgende sieben Systembegriffe definiert (*REFA 1994, S. 57*):

- „1) *Arbeitsaufgabe*
- 2) *Arbeitsablauf*
- 3) *Mensch*
- 4) *Betriebs- beziehungsweise Arbeitsmittel*
- 5) *Eingabe*
- 6) *Ausgabe*
- 7) *Umwelteinflüsse“*

Für eine abstraktere Beschreibung des Systems „Baustelle“ erscheint der in der VDI- Richtlinie definierte Aufbau eines Systems brauchbarer, während sich die Definition eines Arbeitssystems in der REFA-Methodenlehre besser für die Beschreibung konkreter Ferti- gungsprozesse eignet. In den folgenden Unterkapiteln werden daher die Systemkomponenten, die Systemgrenzen, die Ablauf- und Aufbaustruktur und die Systemdaten des Produktionssys- tems „Hochbaustelle“ auf Basis der Definition der VDI-Richtlinie beschrieben.

Die Systemanalyse beschränkt sich auf die Betrachtung des Bauablaufs aus Sicht der Arbeitsvorbereitung, baubetriebswirtschaftliche Aspekte werden nicht behandelt.

3.2 Systemkomponenten

Die Systemkomponenten beschreiben Subsysteme oder Systemelemente des übergeordneten Systems. Während Subsysteme wiederum eigene Systemkomponenten enthalten können, lassen sich Systemelemente nicht weiter zerlegen (vgl. VDI 3633 - Blatt 1 1993, S. 3). Als Systemkomponenten werden im Folgenden alle Ressourcen beschrieben, die in den Produktionsprozess auf der Baustelle eingebunden sind.

3.2.1 Bauleitung

Die Bauleitung stellt die zentrale Steuerung des Bauablaufs dar. Im Rahmen der Arbeitsvorbereitung ist sie zuständig für die Produktionsplanung in Form der Baustelleneinrichtung und der Auswahl der Bauverfahren, der Organisation des Bauablaufs in Form der Terminplanung und der Bedarfsermittlung für Betriebsmittel, Materialien und Arbeitskräfte.

Aufgabe der Bauleitung ist es außerdem, in Kommunikation mit dem Auftraggeber, mit Lieferanten, mit Nachunternehmern, mit den Arbeitskräften auf der Baustelle und mit der Firmenzentrale zu treten, um alle produktionsrelevanten Fragen zu klären.

3.2.2 Arbeitskräfte

Die Fertigung im Bauwesen wird von vielen unterschiedlich spezialisierten und qualifizierten Arbeitskräften erbracht. Bauleistungen werden in der Regel gewerkeweise vergeben. D. h., dass die Teilleistungen des Bauprojektes von unterschiedlichen Unternehmern erbracht werden, die spezialisierten Handwerksbereichen angehören. In der VOB Teil C wird im Rahmen der Beschreibung der allgemeinen technischen Vertragsbedingungen für Bauleistungen eine Unterteilung in verschiedene Gewerke vorgenommen (*VOB 2009, Teil C*). Die verschiedenen Vorgänge, die an den Bauteilen des Gebäudes ausgeführt werden, lassen sich jeweils einem dieser Gewerke zuordnen.

Die Fertigung auf der Baustelle wird in der Regel in Arbeitsgruppen durchgeführt, da oftmals mit großen Materialien oder Betriebsmitteln hantiert wird. Diese Arbeitsgruppen gehören einem bestimmten Gewerk an und können daher nur die Vorgänge auf der Baustelle ausführen, für die ihr Gewerk spezialisiert ist. Die Zusammensetzung einer Arbeitsgruppe ist bezogen auf die Qualifikation der Arbeitskräfte häufig heterogen. Während angelernte Hilfskräfte für

das Anreichen von Materialien oder für Reinigungsarbeiten zuständig sind, wird die eigentliche Tätigkeit am Gewerk von den Facharbeitern durchgeführt. Arbeitsgruppen können von einem Vorarbeiter geleitet werden, der fertigungsrelevante Anweisungen an die anderen Arbeitsgruppenmitglieder weitergibt.

3.2.3 Betriebsmittel

In der REFA-Methodenlehre werden alle Maschinen, Anlagen, Einrichtungen, Werkzeuge, Organisationsmittel und alle sonstigen Geräte als Betriebsmittel bezeichnet, die an der Erfüllung der Arbeitsaufgabe beteiligt sind (*vgl. REFA 1993, S. 43*).

In Abhängigkeit von der Bauart und dem Bauverfahren werden in der Fertigung eine Vielzahl von verschiedenen Betriebsmitteln eingesetzt. Dabei lassen sich die Betriebsmittel grundsätzlich unterscheiden in Betriebsmittel für den Transport und Betriebsmittel, die direkt in den Fertigungsprozess eingebunden sind.

Betriebsmittel, die dem Transport dienen, sind beispielsweise Krane, Hubwagen oder Aufzüge. Diese Betriebsmittel können häufig alternativ verwendet werden. Steht beispielsweise ein bestimmtes Betriebsmittel für den Transport nicht zur Verfügung, kann soweit vorhanden auf ein anderes Betriebsmittel ausgewichen werden. Transportbetriebsmittel können entweder von den Mitgliedern einer Arbeitsgruppe, die das Material benötigen, betrieben werden (wie z. B. Hubwagen oder Aufzüge) oder aber unabhängig von einer Arbeitsgruppe agieren und lediglich Transportaufträge entgegennehmen (wie z. B. Krane).

Betriebsmittel, die direkt in die Produktion eingebunden sind, werden entweder während der Produktion benötigt (wie z. B. Bohrmaschinen, Hämmer etc.) oder während der Produktion und auch für eine bestimmte Zeit darüber hinaus vorgehalten (wie z. B. Schalungselemente oder Stützen). Die Anzahl oder die Größe der benötigten Betriebsmittel kann proportional zur Fertigungsmenge steigen, sie kann aber auch unabhängig von ihr sein.

3.2.4 Material

In der REFA-Methodenlehre werden mit dem Begriff Material „alle Werk-, Hilfs- und Betriebsstoffe bezeichnet, die zum Erzeugen von Gütern erforderlich sind und dabei ihre ursprüngliche Form, ihre selbstständige Funktion und die Möglichkeit zur anderweitigen Verwendung verlieren“ (*REFA 1993, S. 116*). Für die Fertigung von Bauteilen wird eine große Menge unterschiedlicher Materialien benötigt. Als Mengenangaben für die Materialien sind

im Bauwesen die in der VOB Teil C genannten Abrechnungseinheiten gebräuchlich (vgl. *VOB 2009, Teil C*). Dort werden das Flächenmaß (m^2), das Längenmaß (m), die Anzahl (Stück), das Gewicht (kg) und das Raummaß (m^3) genannt. Die benötigte Materialmenge steht fast immer in direkter Proportionalität zu der Fertigungsmenge. Materialien werden in der Regel in größeren Ladeeinheiten auf die Baustelle angeliefert. Solche Ladeeinheiten können beispielsweise Kartons oder Paletten sein.

3.3 Systemgrenzen

Die Systemgrenzen definieren die Grenzen des Systems, an denen über Schnittstellen ein Austausch von Materie, Energie und Information mit der Umwelt erfolgt (vgl. *VDI 3633 - Blatt 1 1993, S. 3*). Für den Bauablauf spielen insbesondere der Material- und der Informationsfluss eine wichtige Rolle, während die Energieversorgung schon zu Beginn der Baustelleneinrichtung sichergestellt werden muss und danach in der Regel permanent zur Verfügung steht.

3.3.1 Materialfluss

Die für den Bauprozess notwendigen Materialien werden auf dem Beschaffungsmarkt eingekauft und dann mit entsprechenden Transportfahrzeugen im Idealfall termingerecht zur Baustelle geliefert. An ausgewiesenen Anlieferungsflächen werden die Transportfahrzeuge entladen und das Material in einem Zwischenlager auf dem Baustellengelände gelagert oder auch direkt eingebaut.

Von der Bauleitung lassen sich lediglich die Liefertermine der Materialien über termingerechte Bestellungen beeinflussen. Störungen, die auf den Beschaffungsmarkt oder den Verkehr zur Baustelle einwirken, liegen außerhalb des Einflussbereichs der Bauleitung. Da die Arbeitsvorbereitung im Zentrum dieser Arbeit steht, erscheint die in Abbildung 3.1 gesetzte Baustellengrenze als sinnvolle Systemgrenze des Materialzuflusses für die Simulation des Baugeschehens. Während die Menge des Materialzuflusses für die Produktionslogistik über das Gebäudemodell relativ einfach zu bestimmen ist, bereitet die Mengenermittlung für die Entsorgungslogistik größere Probleme.

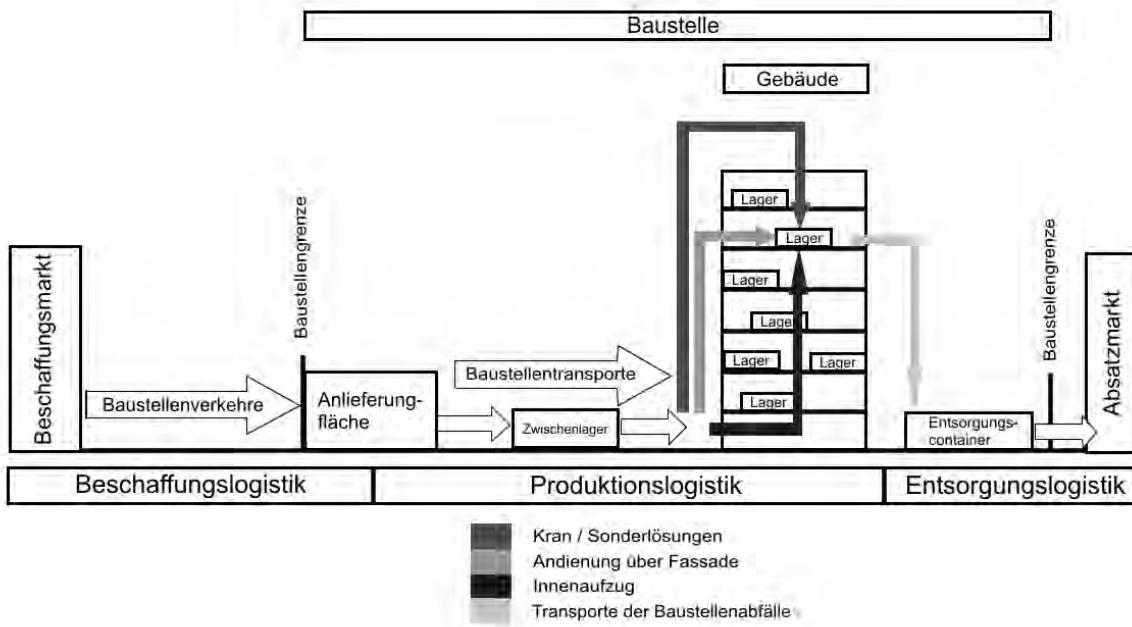


Abbildung 3.1: Beschaffungs-, Produktions- und Entsorgungslogistik einer Baumaßnahme (Boenert und Blömeke 2003)

Die in der Entsorgungslogistik zu transportierenden Abfallmengen können je nach Vorgang, Verpackung der Baumaterialien, dem anfallenden Ausschuss und in Abhängigkeit von Besonderheiten in der Gebäudegeometrie sehr stark variieren. Um den Parametrisierungsaufwand für das Modell gering zu halten, wird daher die Schnittstelle zwischen Produktions- und Entsorgungslogistik als abschließende Systemgrenze für den Materialfluss gesetzt.

3.3.2 Informationsfluss

Der Großteil des Informationsflusses, der den Bauablauf betrifft, wird über die Bauleitung abgewickelt. Die Bauleitung fungiert als Schnittstelle zwischen der Produktionsumgebung auf der Baustelle und der Außenwelt. So ist der Bauleiter z. B. für die Kommunikation mit Lieferanten, dem Auftraggeber, der Firmenzentrale, den Nachunternehmern und den Arbeitsgruppen auf der Baustelle zuständig. Ein Informationsfluss findet jedoch auch zwischen den verschiedenen Arbeitsgruppen auf der Baustelle statt, um z. B. Konflikte in Bezug auf den verfügbaren Lager- und Arbeitsraum zu klären und den Ressourceneinsatz zu koordinieren. Kommuniziert wird aber auch innerhalb der Arbeitsgruppen, um z. B. die Arbeitsaufgaben auf die Arbeitsgruppenmitglieder zu verteilen. Außerdem erfolgt während der Produktion ein ständiger Informationsaustausch zwischen den Arbeitsgruppen und den Geräteführern der

großen Betriebsmittel, wie z. B. Kranen und Betonpumpen.

Für eine reine Simulation des Baugeschehens erscheint es sinnvoll, die Bauleitung als Systemgrenze zu setzen und lediglich den Informationsfluss zu berücksichtigen, der auf der Baustelle zwischen der Bauleitung und den Arbeitsgruppen, innerhalb einer Arbeitsgruppe, zwischen verschiedenen Arbeitsgruppen und zwischen den Arbeitsgruppen und den Betriebsmitteln stattfindet (siehe Abbildung 3.2).

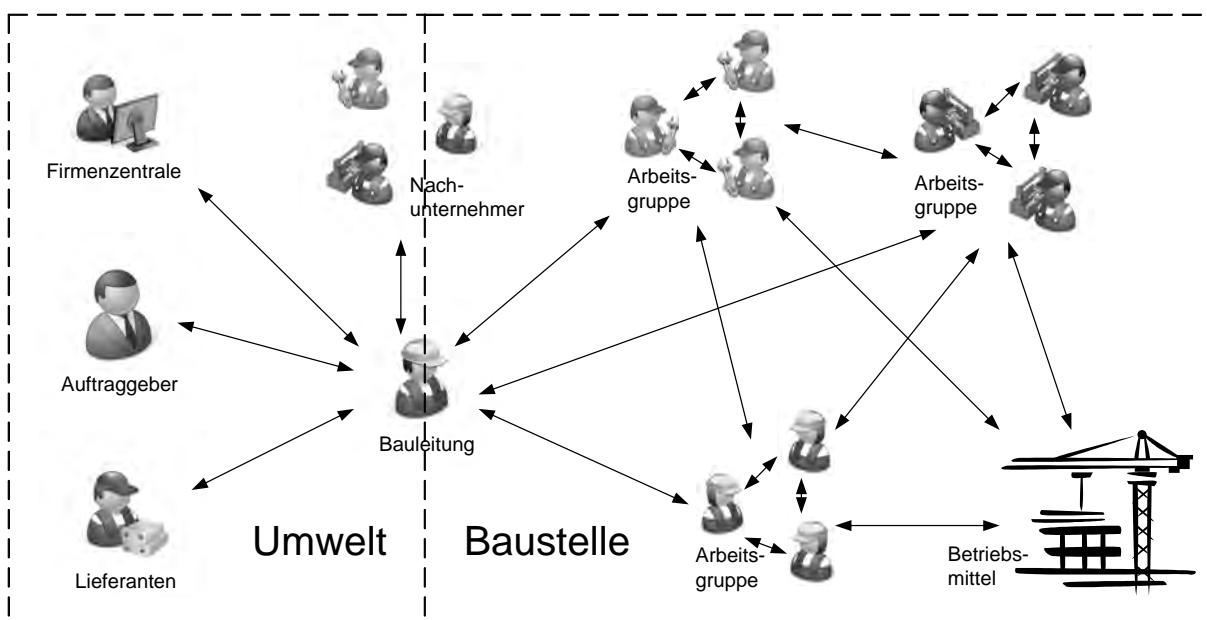


Abbildung 3.2: Informationsfluss in Bezug auf den Bauprozess

3.4 Ablaufstruktur

Die Ablaufstruktur beschreibt nach der REFA-Methodenlehre „*die logische Aufeinanderfolge von Teilaufgaben (Ablaufabschnitten), die zur Erfüllung einer Gesamtaufgabe führen*“ (REFA 1991, S. 90). In der VDI-Richtlinie besteht die Ablaufstruktur aus der „*Beschreibung des Modellverhaltens über die logischen Verknüpfungen der Modellelemente*“ (VDI 3633 - Begriffsdefinitionen 1996, S. 1).

Die Hochbaustelle unterscheidet sich von stationären Produktionsanlagen in erster Linie durch das auf der Baustelle vorherrschende Ablaufprinzip. Unter einem Ablaufprinzip wird in der REFA-Methodenlehre die räumliche Anordnung und Verbindung mehrerer Arbeitsplätze verstanden (vgl. Künstner 1984, S. 114).

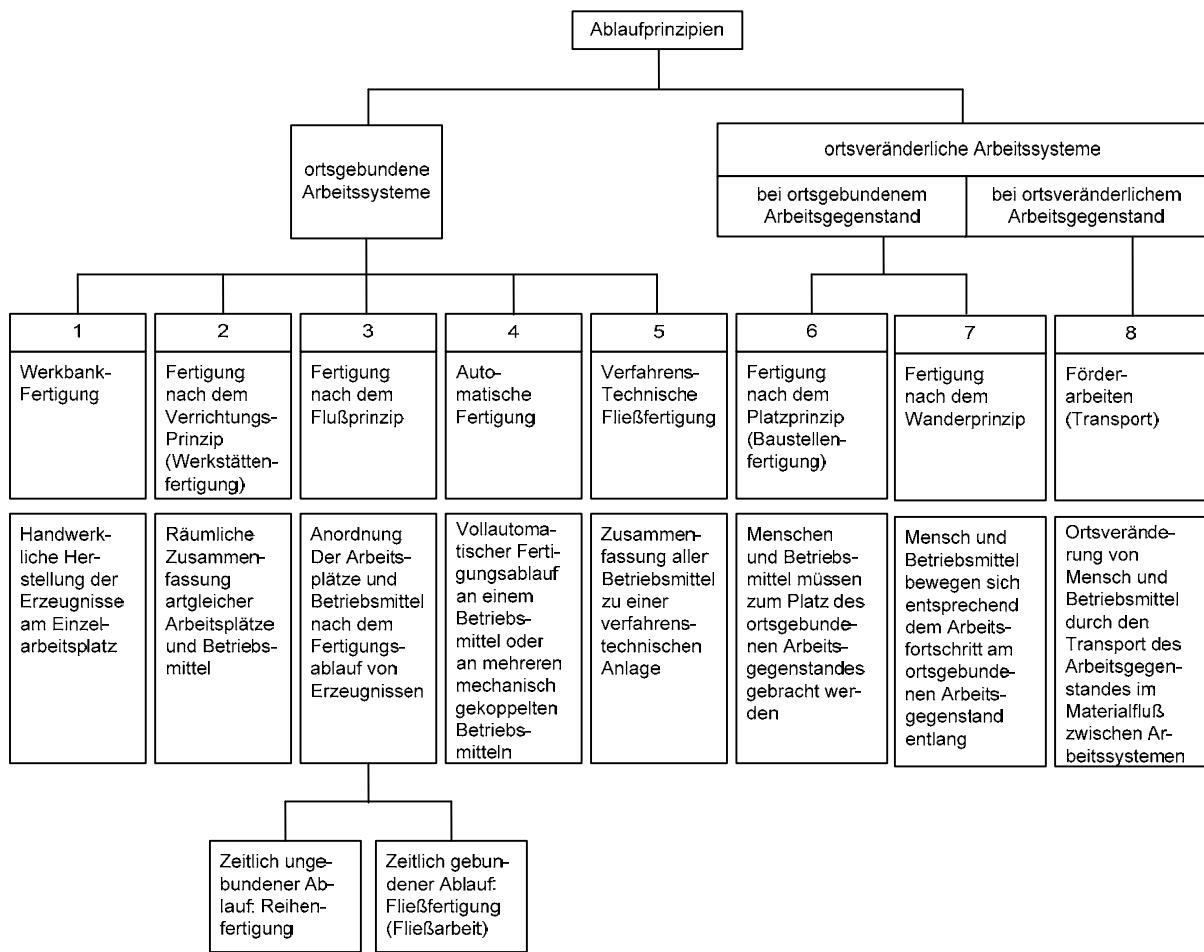


Abbildung 3.3: Ablaufprinzipien (Künstner 1984, S. 115)

Hochbau-Baustellen lassen sich nach REFA dem Ablaufprinzip des ortsveränderlichen Arbeitssystems mit einem ortsgebundenen Arbeitsgegenstand zuordnen (siehe Abbildung 3.3).

Zu unterscheiden sind bei diesem Arbeitssystem die Fertigung nach dem Platzprinzip und die Fertigung nach dem Wanderprinzip. Bei der Fertigung nach dem Wanderprinzip bewegen sich Menschen und Betriebsmittel entsprechend dem Baufortschritt am Arbeitsgegenstand entlang. Dieses Ablaufprinzip ist vorwiegend im Tiefbau bei Linienbaustellen anzutreffen.

Die Fertigung nach dem Platzprinzip ist dadurch gekennzeichnet, dass Menschen, Betriebsmittel und Material zum Platz des ortsgebundenen Arbeitsgegenstandes transportiert werden müssen, wie es bei Hochbau-Baustellen üblich ist (vgl. Künstner 1984, S. 114). Die Logistik auf der Baustelle hat daher neben der Fertigung selbst einen großen Einfluss auf die Arbeitsleistung. In der vorliegenden Arbeit wird die Ablaufstruktur aus diesem Grund in die Beschreibung der Fertigungsabläufe und in die Beschreibung der Abläufe der Produktionslogistik unterteilt.

3.4.1 Fertigungsabläufe

In der REFA-Methodenlehre wird der Arbeitsablauf in Ablaufabschnitte eingeteilt (vgl. Berg 1984, S. 57 f.). Die Aufgliederung des Bauprojektes in Ablaufabschnitte ist insbesondere für die Vergabe von Bauleistungen und die Ausführungsplanung im Bauwesen übliche Praxis. In der Bauablaufplanung werden als kleinste Ablaufabschnitte der Televorgang und der Vorgang verwendet (siehe Abbildung 3.4). Als Beispiel für einen Televorgang werden in der REFA-Methodenlehre das Stellen von Wandschalung, die Absteifung von Wandschalung oder das Einbringen von Beton in eine Schalung genannt. „*Mit Vorgang wird der Abschnitt eines Arbeitsablaufs bezeichnet, der in der Ausführung an einer Mengeneinheit eines Arbeitsauftrags besteht. Der Vorgang wiederholt sich bei der Ausführung eines Auftrages m-mal. Ein Vorgang besteht im allgemeinen aus mehreren Televorgängen*“ (Berg 1984, S. 60).

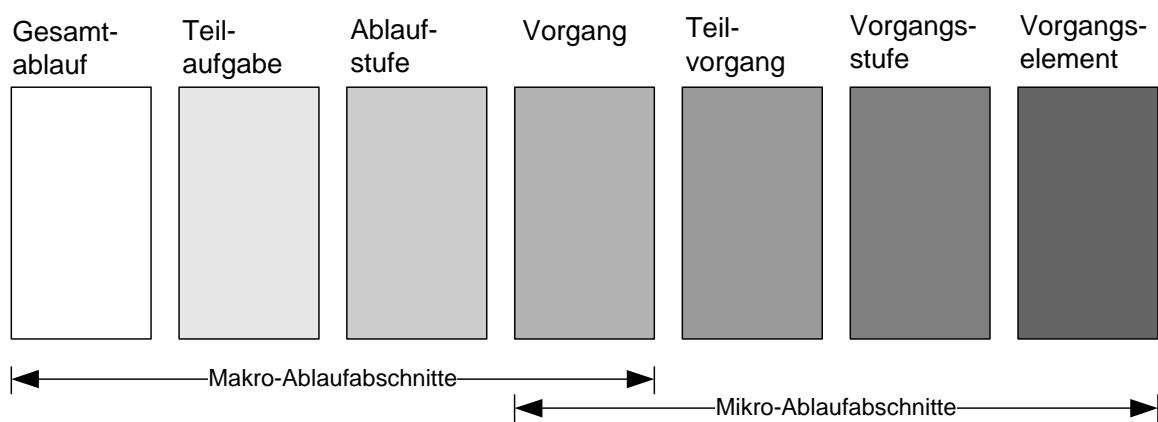


Abbildung 3.4: Ablaufabschnitte nach der REFA-Methodenlehre (Berg 1984, S. 58)

Die Fertigung im Hochbau ist dadurch gekennzeichnet, dass zeitlich meist sehr kurze manuelle Televorgänge ausgeführt werden. Diese Televorgänge sind im Großteil der Fälle direkt oder indirekt mit der Fertigung eines Bauteils verbunden und werden in gleicher Reihenfolge an verschiedenen Bauteilen des Gebäudes ausgeführt. Lediglich der Ort und der Zeitpunkt der Ausführung und die benötigte Material- und Betriebsmittelmenge unterscheiden sich in Abhängigkeit von der Lage und der Größe der Bauteile. Televorgänge, die immer in gleicher Reihenfolge direkt nacheinander ausgeführt werden, lassen sich zu einem Vorgang zusammenfassen. Da ein Vorgang meistens an mehreren Bauteilen eines Gebäudes ausgeführt wird, muss dieser nur einmal für den Bauteiltyp dem diese Bauteile angehören beschrieben werden.

Komplizierter gestaltet sich die Bildung der Reihenfolge, in der die Vorgänge ausgeführt werden. Nur in den seltensten Fällen wird zu einem bestimmten Zeitpunkt nur ein einziges

Bauteil auf der Baustelle bearbeitet. Meistens werden verschiedene Vorgänge parallel und räumlich verteilt an verschiedenen Bauteilen des Gebäudes ausgeführt. Diese Vorgänge können nebenläufig sein, aber auch in einem kausalen Zusammenhang zueinander stehen. Außerdem können die parallel ablaufenden Vorgänge von verschiedenen Gewerken bearbeitet werden, die unterschiedlichen Subunternehmen angehören und zwischen denen dadurch keine direkten organisatorischen Zusammenhänge bestehen. Diese Tatsache kann einen hohen Koordinierungsaufwand seitens der Bauleitung erfordern, um wechselseitige Behinderungen zwischen den Gewerken auszuschließen. Einer exakten Beschreibung der zeitlichen und räumlichen Anordnung eines Vorgangs kommt daher zentrale Bedeutung zu. Im Bauwesen ist es üblich, die Ablaufstruktur in Form von Balkenplänen (Gantt-Plänen) oder Netzplänen darzustellen und so die Abhängigkeiten festzulegen. Die DIN 69900 nennt die für die Netzplan-technik benötigten Ablaufinformationen eines Vorgangs:

- „a) *Vorgang bzw. Ereignis (Text und oder Nummer)*
- b) *Vorgänger und/oder Nachfolger*
- c) *Art der Anordnungsbeziehung“ (DIN 69900 2009, S. 19)*

Der Vorgang selbst wird in der DIN 69900 als „*Ablaufelement zur Beschreibung eines bestimmten Geschehens mit definierten Anfang und Ende*“ bezeichnet (DIN 69900 2009, S. 15). Um eine räumliche Einordnung des Vorgangs in der Terminplanung zu gewährleisten, sollte die Vorgangsbeschreibung Informationen über den Bauabschnitt beinhalten. „*Ein Bauabschnitt ist der kleinste Bereich, der in der Terminplanung ausgewiesen wird, und dient zur Festlegung des Ortes, an dem eine Leistung zu erbringen ist. Den Vorgängen werden die Bauabschnitte zugeordnet, damit die ausführenden Firmen wissen, wo und in welcher Reihenfolge (der Bauabschnitte) sie arbeiten sollen*

Die zeitliche Anordnung eines Vorgangs erfolgt anhand der Angabe seiner Vorgänger. Ein Vorgänger stellt den „*einem Vorgang unmittelbar vorgeordneten Vorgang*“ dar (DIN 69900 2009, S. 15). Für eine korrekte Verknüpfung einer Terminplanung halten es Bielefeld und Feuerabend (2007) für ausreichend, „*wenn für jeden Vorgang bedacht wird, welche anderen Vorgänge direkte Voraussetzungen für dessen Erstellung sind. Indirekte Zusammenhänge müssen nicht zusätzlich erfasst werden, weil diese keine Auswirkungen auf die Terminplanung haben*“ (Bielefeld und Feuerabend 2007, S. 110).

Die zeitlichen Beziehungen, die zwischen einem Vorgang und seinen Vorgängern bestehen, können durch eine Anordnungsbeziehung detailliert definiert werden. Die DIN 69900 beschreibt eine Anordnungsbeziehung als „*quantifizierbare Abhängigkeit zwischen Ereignissen oder Vorgängen*“ (DIN 69900 2009, S. 4). Insgesamt werden vier verschiedene Typen von Anordnungsbeziehungen unterschieden:

- Die **Anfangsfolge** (AF) bzw. **Anfang-Anfang-Folge** (AA) bezeichnet die „*Anordnungsbeziehung vom Anfang eines Vorgangs zum Anfang seines Nachfolgers*“ (DIN 69900 2009, S. 4).
- Die **Endfolge** (EF) bzw. **Ende-Ende-Folge** (EE) bezeichnet die „*Anordnungsbeziehung vom Ende eines Vorgangs zum Ende seines Nachfolgers*“ (DIN 69900 2009, S. 5).
- Die **Normalfolge** (NF) bzw. **Ende-Anfang-Folge** (EA) bezeichnet die „*Anordnungsbeziehung vom Ende eines Vorgangs zum Anfang seines Nachfolgers*“ (DIN 69900 2009, S. 11).
- Die **Sprungfolge** (SF) bzw. **Anfang-Ende-Folge** (AE) bezeichnet die „*Anordnungsbeziehung vom Anfang eines Vorgangs zum Ende seines Nachfolgers*“ (DIN 69900 2009, S. 14).

Der **Zeitabstand** (Z) gibt den Zeitwert einer Anordnungsbeziehung an. Er definiert, welcher zeitliche Abstand zwischen den Anfangs- oder Endzeitpunkten der beteiligten Vorgänge liegt. „*Er kann größer als, kleiner als oder gleich null sein*“ (DIN 69900 2009, S. 15).

Bielefeld und Feuerabend (vgl. 2007, S. 110) unterscheiden die Beziehungen zwischen den Vorgängen in Beziehungen, die aus **fertigungstechnischen Abhängigkeiten** resultieren und die durch **Entscheidungen des Terminplaners** vorgegeben werden. Die fertigungstechnischen Abhängigkeiten bestehen in erster Linie aus den zwingenden Abhängigkeiten, die sich aus den gewählten Bauverfahren ergeben. Die Beziehungen, die sich aus den Entscheidungen des Terminplaners ergeben, haben zum Ziel (*Bielefeld und Feuerabend* 2007, S. 110):

- „*Vorgänge in eine bessere Witterungsperiode zu verschieben (...),*
- „*den Einsatz der Ressourcen zu vereinheitlichen,*
- „*durch den Bauherrn vorgegebene Fristen (...) zu berücksichtigen,*
- „*weitere Aspekte (z. B. Reduzierung der Verschmutzung oder die Zuwegung in einzelne Bauabschnitte) aufzunehmen,*

- *den Terminplan durch den Einbau von Puffern zu entzerren.“*

Scheifele (vgl. 1991, S. 51) unterteilt die Abhängigkeitsbeziehungen zwischen den Vorgängen in **technische, organisatorische, kapazitative** und **weitere Abhängigkeiten**. **Technische** Abhängigkeiten resultieren aus rein sachlichen, funktionellen und technisch nötigen Bedingungen im Bearbeitungsablauf und beinhalten die Übergabe von Informationen oder Objekten zwischen zwei Vorgängen. Sie lassen sich darüberhinaus nur mit umfangreichen und unwirtschaftlichen Maßnahmen ändern. Die **organisatorischen** Abhängigkeiten ergeben sich aus den Bedingungen der Projektorganisation, während die **kapazitativen** Abhängigkeiten durch nur beschränkt zur Verfügung stehende Einsatzmittel entstehen. Sowohl die organisatorischen als auch die kapazitativen Abhängigkeiten können vom Projektverantwortlichen relativ einfach verändert werden. **Weitere** Abhängigkeiten können sich beispielsweise aus Umgebungsbedingungen ergeben (vgl. *Scheifele* 1991, S. 51 u. A.53).

Das in der vorliegenden Arbeit zu entwickelnde Simulationssystem soll den Arbeitsvorbereiter in die Lage versetzen, die Auswirkungen der eigenen Entscheidungen zu prognostizieren. Zu diesem Zweck muss er die fertigungstechnischen Abhängigkeiten zwischen den Vorgängen definieren und gleichzeitig die Abhängigkeiten, die sich aus den eigenen Entscheidungen ergeben, berücksichtigen. Während der Simulation ist es jedoch nicht notwendig, zwischen den verschiedenen Abhängigkeitstypen zu unterscheiden, da sie ja in jedem Fall berücksichtigt werden sollen, um die Auswirkungen der Entscheidungen im Simulationslauf auch beobachten zu können. Unterschieden werden muss lediglich wie die Abhängigkeitsbeziehungen in das Modell integriert werden.

Technische Abhängigkeitsbeziehungen lassen sich in der Regel aus der Gebäudestruktur ableiten. Beispielsweise muss die Deckenplatte zwischen Erdgeschoss und 1. Obergeschoss fertiggestellt sein, bevor die Wände im 1. Obergeschoss gemauert werden können.

Organisatorische Abhängigkeitsbeziehungen betreffen insbesondere die Fertigungsreihenfolge, in der ein Vorgang innerhalb des Gebäudes ausgeführt wird. Über die Geschosse und Bauabschnitte lassen sich diese Abhängigkeitsbeziehungen ebenfalls mit der Gebäudegeometrie assoziieren. So kann z. B. definiert werden, dass zunächst mit den Mauerwerksarbeiten im 1. Bauabschnitt im 1. Geschoss begonnen wird, bevor die Mauerwerksarbeiten im 2. Bauabschnitt im 1. Geschoss ausgeführt werden.

Kapazitative Abhängigkeitsbeziehungen lassen sich nicht direkt mit der Gebäudegeometrie verbinden. Die Anzahl der Arbeitskräfte, der Krane und die Verfügbarkeit der Baumaterialien entscheiden aber ganz wesentlich darüber, in welcher Geschwindigkeit der Bauprozess voranschreitet. Für die Modellierung des Bauprozesses muss daher die Anzahl, die Fähigkeit und gegebenenfalls der Standort der Ressourcen klar definiert werden.

Sind alle Abhängigkeitsbeziehungen beschrieben, kann daraus die Sequenzierung der Arbeitsvorgänge erfolgen und der komplette Fertigungsablauf lässt sich in einem konkreten Terminplan darstellen (siehe Abbildung 3.5).

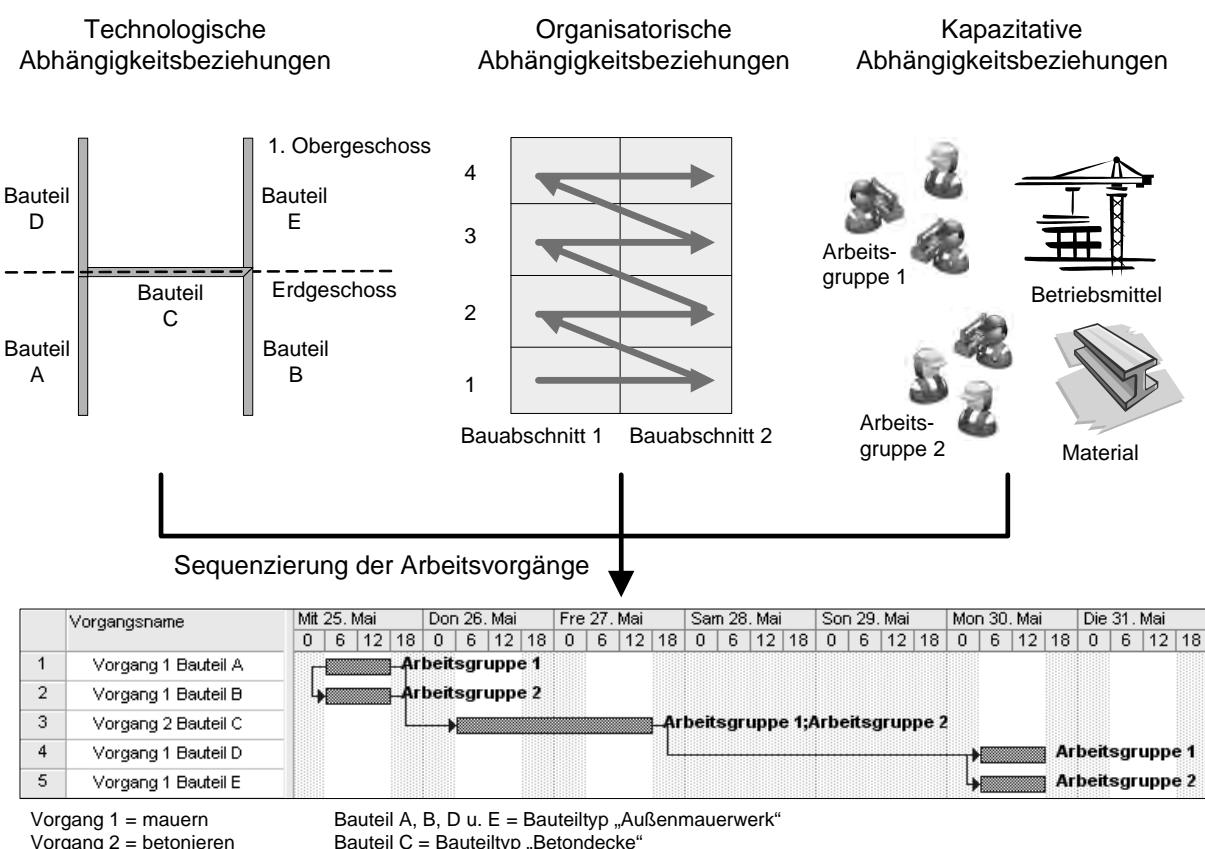


Abbildung 3.5: Sequenzierung der Bauvorgänge durch technische, organisatorische und kapazitative Abhängigkeitsbeziehungen

Die in dem Terminplan aufgeführten Vorgänge lassen sich verschiedenen abstrakten „Grundvorgängen“ zuordnen, die während der Bauwerksfertigung wiederholt ausgeführt werden. Die in dem Terminplan in Abbildung 3.5 aufgeführten Vorgänge 1, 2, 4 und 5 lassen sich dem Grundvorgang „mauern“ zuordnen, während der Vorgang 3 dem Grundvorgang „betonieren“ zugeordnet ist. Die benötigten Ressourcenkapazitäten für die Ausführung der Vorgänge können durch ihre Grundvorgänge identisch beschrieben werden, wenn die Zeitaufwandswerte

und die Materialmengen relativ zur Fertigungsmenge angegeben werden (wie z. B. h/m³, m³/m etc.).

Schwieriger gestaltet es sich, die technischen und organisatorischen Abhängigkeitsbeziehungen für einen Grundvorgang identisch zu beschreiben. Fast alle Bauvorgänge lassen sich mit der Fertigung oder der Bearbeitung eines bestimmten Bauteils in Verbindung setzen. Die konkreten Bauteile wiederum lassen sich in Bezug auf ihren Aufbau und ihre Materialzusammensetzung abstrakten Bauteiltypen zuordnen. In Abbildung 3.5 gehören beispielsweise die Bauteile A, B, D u. E zu dem Bauteiltypen „Außenmauerwerk“. Setzt man die abstrakten „Grundvorgänge“ in Relation zu den abstrakten „Bauteiltypen“, so lässt sich eine Verbindung zwischen dem Gebäudemodell und den Grundvorgängen herstellen.

Da sich die technischen und die organisatorischen Abhängigkeitsbeziehungen ebenfalls mit dem Gebäudemodell assoziieren lassen, ist es möglich, über das Gebäudemodell eine Verbindung zwischen „Grundvorgängen“ und technischen und organisatorischen Abhängigkeitsbeziehungen herzustellen.

Werden die technischen Abhängigkeitsbeziehungen auf die relative Lage des mit einem Grundvorgang verbundenen Bauteils im Gebäudemodell bezogen, so lassen sich die Abhängigkeitsbeziehungen identisch für alle Bauteile des gleichen Bauteiltyps beschreiben. Für eine Wand lässt sich beispielsweise aus der Gebäudegeometrie die technische Abhängigkeitsbeziehung formulieren: „Wenn die Decke, auf der die Wand stehen soll, betoniert wurde und eine ausreichende Festigkeit besitzt, so kann mit dem Vorgang „mauern“ dieser Wand begonnen werden.“ Eine organisatorische Abhängigkeitsbeziehung lässt sich in ähnlicher Weise formulieren: „Wenn die Fertigung der Wand im vorhergehenden Abschnitt begonnen wurde, kann die Fertigung der Wand in diesem Abschnitt angefangen werden.“

Sind die technischen und organisatorischen Voraussetzungen für die Ausführung eines Vorgangs erfüllt, kann die Fertigung beginnen, sofern die für die Produktion benötigten Ressourcen in ausreichender Menge am Einbauort vorhanden sind. Die Menge der benötigten Ressourcen ist in den meisten Fällen von der Größe oder der Stückzahl der zu fertigenden Bauteile abhängig. Eine Mengenermittlung kann daher direkt aus dem Gebäudemodell erfolgen. Die Bereitstellung der Ressourcen erfolgt entweder durch den Transport per Hubwagen oder Rollcontainer, durch Mitglieder, die in die Fertigung involvierten Arbeitsgruppe oder durch einen Transport über Betriebsmittel wie Krane, Bauaufzüge oder Gabelstapler. Über die Bereitstel-

lung der Baumaterialien ergibt sich die Schnittstelle zwischen der Fertigung und der Produktionslogistik.

3.4.2 Produktionslogistik

Die Fertigung nach dem Platzprinzip erfordert einen hohen logistischen Aufwand, da die Materialien und Betriebsmittel zu wechselnden Produktionsorten geliefert werden müssen. Eine einheitliche und standardisierte Beschreibung dieser Transportprozesse ist allein schon aufgrund der sich ständig ändernden Produktionsorte und den sich wandelnden Platzverhältnissen auf der Baustelle unmöglich.

Hinzu kommt, dass sich die Anzahl und der Typ der zur Verfügung stehenden Transportmittel im Verlauf der Baumaßnahme verändern können. Die vielen kleinen logistischen Prozesse in dem dynamischen und inhomogenen räumlichen Umfeld der Baustelle machen aber einen nicht zu unterschätzenden Anteil an der Gesamtbautätigkeit aus. Wie Untersuchungen von *Boenert und Blömeke (2003)* zeigen, werden im Ausbau 29,9 % der gesamten Bauzeit für logistische Prozesse wie Transporttätigkeiten, zurückzulegende Wege, Materialsuche und Auf- und Umräumarbeiten aufgewandt. Die eigentliche Haupttätigkeit am Gewerk geht bei Ausbauarbeiten mit etwa 30,9 % der benötigten Gesamtfertigungszeit ein. Logistische Prozesse haben daher einen zeitlich äquivalenten Einfluss auf die Fertigungsdauer, wie die Haupttätigkeit am Gewerk. Die Modellierung dieser logistischen Prozesse stellt eine große Herausforderung für die baubetriebliche Simulation dar (*vgl. Kugler und Franz 2009, S. 188*). Im Gegensatz zur stationären Industrie, bei der die Orte des Materialverbrauchs und der Anlieferung stets identisch sind, kommt es aufgrund der ortsveränderlichen Produktion auf einer Baustelle zu einer andauernden Veränderung der Koordinaten der Quellen und Senken des Produktionssystems (*vgl. Weber 2006, S. 572*). Die Koordinaten des Einbauortes sind für jedes Bauteil eines Bauwerks in jedem Fall einzigartig. Hinzu kommt, dass die Grundrisse der meisten Bauwerke sehr inhomogen strukturiert sind. Durch diese Faktoren lassen sich für die Produktion auf einer Baustelle keine festen Weggrößen vordefinieren. Aufgrund der räumlichen Unbeständigkeit und der ortsveränderlichen Produktion, ist die Festlegung fester Wege netze nicht sinnvoll. Diese Problematik wird treffend von *Günthner und Kraul (2008, S. 6)* beschrieben:

„Wichtiger und in der Simulation am schwierigsten abzubilden ist jedoch die Tatsache, dass das Werkstück Baustelle gleichzeitig auch den Arbeitsraum darstellt, der sich im Verlauf des

Bauprozesses auch ständig verändert. Im Gegensatz zur Simulation einer Fabrik, bei der die einmal definierten Fahrwege und Positionen der Maschinen im Normalfall nicht verändert werden, muss bei der simulativen Abbildung einer Baustelle dieser Tatsache Rechnung getragen werden.“

Da aber der Großteil der Fertigungsprozesse auf einer Baustelle mit logistischen Vorgängen verknüpft ist, führt eine fehlende adäquate Vereinfachung der Weglängenermittlung zu erheblichen Problemen bei der Modellbildung.

Die eng mit der räumlichen Umgebung verknüpfte Bautätigkeit lässt sich unter Verwendung von herkömmlichen Modellierungskonzepten nur ansatzweise in einem Modell nachbilden. Die Wahl des Simulators und der mit dem Simulator verbundenen Modellierungstechnik entscheidet daher mit darüber, ob eine zufriedenstellende Integration der räumlichen Parameter in das Simulationsmodell gelingen kann. Wie von Franz (1997) dargestellt wurde, eignet sich beispielsweise die petrinetzbasierte Modellierungstechnik hervorragend für die Abbildung komplizierter und dynamischer Abhängigkeiten, wie z. B. für die Steuerung und Kontrolle der Ausführungsplanung. Die Integration räumlicher Randbedingungen in ein petrinetzbasiertes Simulationsmodell bereitet jedoch erhebliche Schwierigkeiten.

Schlimmstenfalls können aus einem Simulationsmodell, bei dem die räumlichen Gegebenheiten nur ungenügend berücksichtigt werden, unbrauchbare Lösungsvorschläge resultieren, wie z. B. wenn der Einbau eines Fertigteils zu einem Zeitpunkt empfohlen wird, an dem aufgrund fertig gestellter Bauabschnitte und den Abmessungen des Fertigteils der Einbauort nicht mehr zugänglich ist.

Die Produktionslogistik findet im Bauwesen vor und/oder parallel zu der Fertigung statt. Der Materialfluss auf einer Baustelle beginnt mit der Anlieferung der bestellten Materialien. Nach der Anlieferung werden die meisten Baumaterialien in Zwischenlagern auf dem Baustellengelände gelagert. Unmittelbar vor Produktionsbeginn werden die Baumaterialien in gebäudeinterne Lager transportiert oder auch direkt zum Einbauort gebracht und dort weiterverarbeitet, wie z. B. beim Einbau von Ortbeton oder der Installation von großen Fertigteilen.

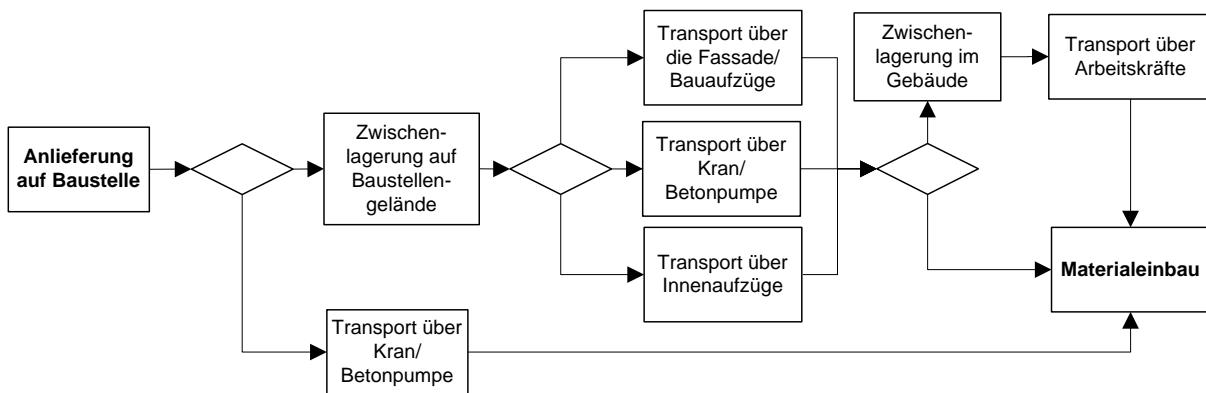


Abbildung 3.6: Materialfluss auf der Baustelle

Der Transport findet entweder innerhalb des Gebäudes über gebäudeinterne Aufzüge, an der Fassade über Bauaufzüge oder durch freistehende größere Betriebsmittel, wie Krane oder Betonpumpen, statt. Nach dem Transport in das gebäudeinterne Lager werden die Baumaterialien während der Fertigung der Bauteile in kleineren Chargen von den Mitgliedern der Arbeitsgruppe zum Fertigungsplatz transportiert (siehe Abbildung 3.6).

Die Materialien werden bei ihrem Transport bis in das gebäudeinterne Lager zu Mengen- oder Ladeeinheiten zusammengefasst. Diese können z. B. aus Paletten oder Behältern bestehen. Für den Transport der Ladeeinheiten können ganz unterschiedliche Betriebsmittel, wie z. B. Hubwagen, Rollcontainer, Gabelstapler, Schubkarren oder Krane verwendet werden. Diese Betriebsmittel unterscheiden sich vor allem in Bezug auf die Transportkapazität, die Transportgeschwindigkeit und den Bewegungsradius.

3.5 Aufbaustruktur

Die Aufbaustruktur veranschaulicht in der REFA-Methodenlehre „*die sachlichen Zusammenhänge zwischen Elementen, ohne daß daraus ein zeitlicher Bezug abgeleitet werden könnte*“ (REFA 1991, S. 96).

Als wichtigste Elemente der Aufbaustruktur werden in der REFA-Methodenlehre die Erzeugnis- und die Aufgabenstruktur genannt (vgl. REFA 1991, S. 96 f.). Die Erzeugnisstruktur beschreibt, aus welchen Einzelteilen und Gruppen ein Erzeugnis aufgebaut ist, während in der Aufgabenstruktur definiert wird, aus welchen Teilaufgaben eine Gesamtaufgabe besteht. Die Beschreibung der Erzeugnisstruktur bezieht sich im Folgenden auf das Produkt „Bauwerk“, während in der Aufgabenstruktur definiert wird, welche Aufgaben während der Fertigung des Bauwerks anfallen und von wem diese ausgeführt werden.

3.5.1 Erzeugnisstruktur

Das Bauwerk stellt das Produkt der Fertigung im Bauwesen dar. Bauwerke bestehen aus einer großen Anzahl unterschiedlicher Bauteile. Die einzelnen Bauteile eines Bauwerks lassen sich in Bezug auf ihre Materialzusammensetzung und ihren Aufbau jeweils einem übergeordneten Bauteiltypen zuordnen. Während des Bauprozesses werden wiederholt verschiedene Arbeitsvorgänge an den Bauteilen des Gebäudes ausgeführt. Für die jeweiligen Bauteiltypen können Bauverfahren definiert werden, die die verschiedenen Vorgänge, die an den zugehörigen Bau teilen ausgeführt werden, zusammenfassen.

Die meisten Bauwerke bestehen aus mehreren Geschossen. Teile eines im Bau befindlichen Gebäudes werden im Rohbau Bauabschnitten zugeordnet, um die Fertigungsablaufplanung festlegen zu können. Im Rohbau lassen sich die Bauteile jeweils genau einem Bauabschnitt zuordnen. Im Ausbau wird über Raumbücher das Aussehen der einzelnen Räume definiert, so dass dort für die Fertigungsablaufplanung der Raum als strukturierende Gebäudeeinheit verwendet werden kann. Für den Ausbau lassen sich die Bauteile des Gebäudes auch zwei verschiedenen Räumen zuordnen, wie z. B. die Ober- und Unterseite einer Decke.

3.5.2 Aufgabenstruktur

Die Produktion eines Bauwerks wird durch die Interaktion vieler individueller Partner, wie dem Bauherrn, den Architekten, dem Generalunternehmer, dem Bauleiter, den Nachunternehmern, verschiedenen Gewerken, Arbeitern mit unterschiedlichen Qualifikationen, den Gerätelführern und deren Baumaschinen, ermöglicht.

In der Entwurfsplanung wird das Gebäude von einem Architekten entworfen. Gleichzeitig wird festgelegt, in welcher Bauweise die Bauteile eines Gebäudes erstellt werden sollen (siehe Abbildung 3.7). Mit dem Gebäudeentwurf steht daher die Gebäudestruktur und die Bauweise schon vor dem Beginn der Ausführungsplanung fest. Aufbauend auf diesem Gebäudeentwurf wird von der Bauleitung in der Arbeitsvorbereitung entschieden, welches Bauverfahren zur Anwendung kommen soll. Die Bauverfahren unterscheiden sich vor allen Dingen hinsichtlich der benötigten Betriebsmittel und Arbeitskräfte.

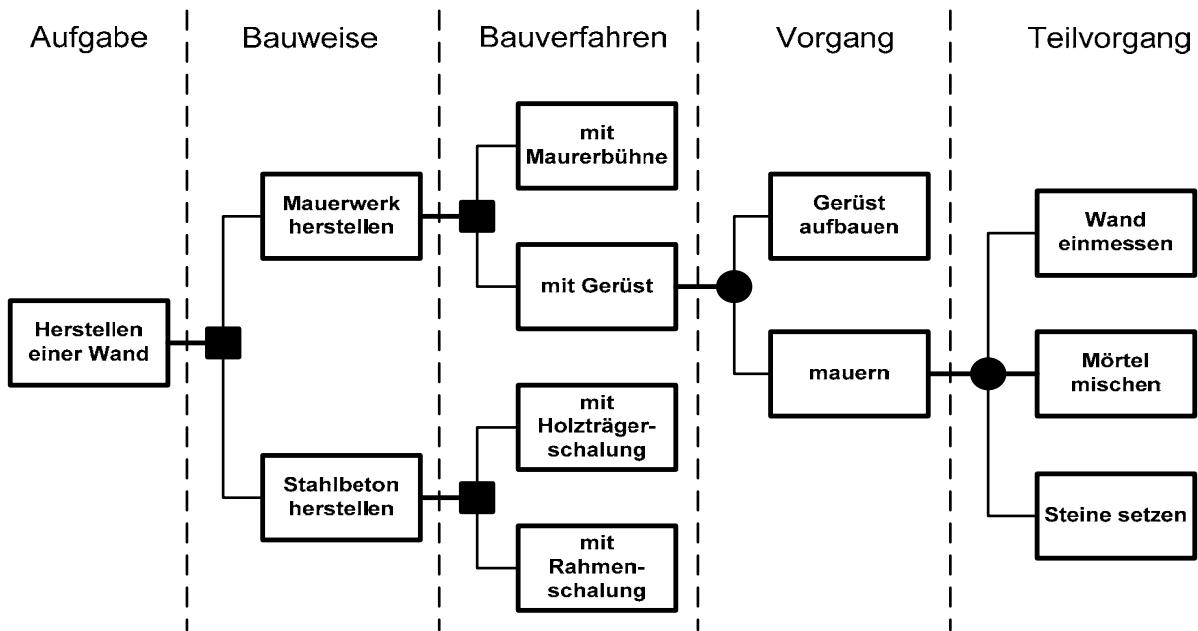


Abbildung 3.7: Exemplarische Aufgabenstruktur im Hochbau

Außerdem wird während der Arbeitsvorbereitung der Ablauf des Baugeschehens von der Bauleitung geplant. In Abhängigkeit von den Anforderungen des Projektes werden dafür Terminpläne in unterschiedlicher Detaillierungstiefe erstellt. Ausgehend von der Terminplanung werden Aufträge an die verschiedenen Gewerke vergeben. In der REFA-Methodenlehre ist ein solcher Auftrag „*eine schriftliche oder mündliche Aufforderung zur Ausführung einer Arbeit*“ (REFA 1994, S. 35). Der Auftrag enthält als Informationen:

- „*die Art des Auftrags und der zu erfüllenden Arbeitsaufgabe*
- „*die geforderte Menge*
- „*die Zeitangaben*
- „*die Gütevorschriften*“ (REFA 1994, S. 35)

Ein Auftrag, der die Ausführung von Arbeitsvorgängen zum Ziel hat, wird in der REFA als „Arbeitsauftrag“ präzisiert, während ein Auftrag, der dem Materialtransport dient, als „Förderauftrag“ bezeichnet wird (vgl. REFA 1994, S. 36).

Der Auftrag wird zum angeforderten Zeitpunkt durchgeführt, wobei der Auftraggeber nach der VOB Teil B §4.1 (1) das „*Zusammenwirken der verschiedenen Unternehmer zu regeln*“ hat (VOB 2009, Teil B). Die Ausführung und Leitung der vertraglich bestimmten Leistung wird aber nach der VOB Teil B §4.2 (1) unter eigener Verantwortung des Auftragnehmers

ausgeführt (vgl. VOB 2009, Teil B). Das bedeutet, dass die Bauleitung maßgeblichen Einfluss darauf hat, wann und wo ein Auftrag bearbeitet wird, während die Ausführung der Vorgänge und Teilvergänge, die mit einem Auftrag verbunden sind, meist selbst von den Arbeitsgruppen des Poliers oder Nachunternehmers organisiert werden. Der Bauleiter gibt daher den kompletten Arbeitsprozess nicht in allen Einzelheiten vor. Die Fertigung wird in der Regel dezentral von der Arbeitsgruppe geplant und durchgeführt, wobei die Verfügbarkeit der Ressourcen und die Platzverhältnisse entscheidenden Einfluss darauf haben, wie die Arbeiten vor Ort bewerkstelligt werden. Die während der Produktion verwendeten Materialien und Betriebsmittel werden in der Regel ebenfalls auf Veranlassung der Arbeitsgruppen zu den Bauabschnitten transportiert, in denen sie benötigt werden. Den Transport kann die Arbeitsgruppe entweder selbst erledigen oder als Förderauftrag an Transport-Betriebsmittel, wie den Kran, vergeben.

Die während der Fertigung stattfindende Gruppenarbeit stellt ein weiteres Merkmal von Hochbauprozessen dar. Die vielen verschiedenen Teilvergänge, die für die Fertigung eines Bauteils durchgeführt werden müssen, werden arbeitsteilig von einer Arbeitsgruppe verrichtet. Die Gruppenstärke sowie die Qualifikation der einzelnen Mitglieder der Arbeitsgruppe bestimmen maßgeblich die Arbeitsdauer sowie die Qualität der ausgeführten Arbeit. Eigene Zielstellungen der verschiedenen Arbeitsgruppen können zu gegenseitigen Behinderungen und zu einer Konkurrenz um die vorhandenen Ressourcen, wie den Arbeitsraum, die Lagerplätze oder Betriebsmittel, führen (vgl. Kugler und Franz 2009, S. 189).

3.6 Systemdaten

Nach der VDI-Richtlinie 3633 dienen die Systemdaten der Beschreibung der Realität. Sie können durch Messungen und Beobachtungen aus dem realen System abgeleitet werden. Die VDI unterscheidet folgende Systemdaten (VDI 3633 - Begriffsdefinitionen 1996, S. 17):

- „technische Daten (z. B. Zeiten, Kapazitäten),
- „organisatorische Daten (z. B. Strategien) und die
- „Systemlast (z. B. Fertigungsaufträge).“

Die Datenbeschaffung gestaltet sich im Bauwesen sehr schwierig. „Ein Hauptgrund ist die Einzelfertigung an temporären Standorten. Daten müssen für jedes Projekt neu aufgenommen werden und sind im Wesentlichen nur für das Projekt gültig. [...] In vielen Fällen wird der

Mangel an Daten durch das Erfahrungswissen („Bauen ist Erfahrungswissenschaft“) der Bauleitung ausgeglichen“ (Weber 2007b, S. 31). Eine zentrale Rolle bei der Daten- und Informationsübermittlung spielen die Zeichnungen des Bauwerks. Aus ihnen können Informationen über das Material, die Menge und den Ort der zu erbringenden Bauleistung gewonnen werden (vgl. Weber 2007b, S. 31). Aus der Zeichnung des Gebäudes, die während der Entwurfsplanung erstellt wurde, kann so insbesondere die Systemlast bestimmt werden.

Organisatorische Daten, die z. B. den Fertigungsablauf, die Baustelleneinrichtung oder die verfügbaren Ressourcenkapazitäten beschreiben, werden vom Arbeitsvorbereiter vorgegeben. Sie müssen daher für eine vollständige Beschreibung des Bauprozesses zusätzlich zu der Zeichnung erfasst werden. Sie lassen sich außerdem nicht – oder nur in begrenztem Umfang – bei neuen Projekten wiederverwenden. Die organisatorischen Daten sollten sich außerdem in einem Modell leicht variieren lassen, um verschiedene Bauablaufvarianten miteinander vergleichen zu können.

Technische Daten, wie z. B. Leistungsdaten von Betriebsmitteln und Zeitaufwandswerte, müssen ebenfalls zusätzlich zu den Zeichnungsdaten erfasst werden. Sie lassen sich jedoch in der Regel für mehrere Projekte wiederverwenden, da sich beispielsweise die Parameter von Betriebsmitteln nur bei Neuanschaffungen verändern. Gleches gilt für Zeitaufwandswerte, die die Dauer von Arbeitsvorgängen beschreiben. Um sie wiederverwenden zu können, sollten sie in einer Datenbank hinterlegt werden, die sich für die Parametrisierung von Modellen verwenden lässt. Aufwandswerte werden auch in der Kalkulation eingesetzt. Diese Werte werden in der Regel nur innerbetrieblich ermittelt und gepflegt. Aber auch der Einsatz von Werten aus der Literatur, wie z. B. aus den ARH-Tabellen (*Arbeitszeit-Richtwerte Hochbau 2010*), ist möglich.

4 CAD-integrierte Simulationsmodellierung

In diesem Kapitel werden die Grundlagen für die CAD-integrierte Simulationsmodellierung erarbeitet und die darauf aufbauende prototypische Implementierung vorgestellt. Zunächst wird in Unterkapitel 4.1 die Motivation für die Verwendung von CAD-Daten für die Bauablaufsimulation erläutert. Danach werden in Unterkapitel 4.2 bereits existierende oder in der Entwicklung befindliche Produktmodelle für den Hochbau betrachtet.

In Unterkapitel 4.3 wird das für die Abbildung der Bauabläufe entwickelte Prozessmodell vorgestellt, dass in Verbindung mit dem bauteilorientierten Gebäudemodell ein eigenes Produktmodell für die Bauablaufsimulation im Hochbau darstellt.

Darauf aufbauend wird in Unterkapitel 4.4 die Systemarchitektur der entwickelten CAD-integrierten Simulationsmodellierung beschrieben. Abschließend werden in Unterkapitel 4.5 die für die Implementierung des prototypischen Simulationssystems verwendeten Informati-onstechnologien erläutert.

4.1 Motivation

Ein CAD-Modell beinhaltet als ein zentrales Dokument der Bauplanung wichtige Informationen über die Struktur eines geplanten oder im Bau befindlichen Gebäudes. Die meisten Fachplaner greifen auf den Inhalt eines CAD-Modells zurück, um die darin enthaltenen Informationen für ihre weitergehenden Planungen zu nutzen. CAD-Zeichnungen werden unter anderem in der Arbeitsvorbereitung verwendet, um die Baustelleneinrichtung zu planen. Aber auch für die Terminplanung, die auf Grundlage von Mengenberechnungen durchgeführt wird, werden die Abmessungen der Gebäudekomponenten aus CAD-Zeichnungen entnommen. Viele Daten, die in der Bauablaufsimulation benötigt werden, sind in den CAD-Zeichnung bereits enthalten.

Die Bedeutung von CAD-Modellen für die Parametrisierung von Simulationsmodellen wurde in diesem Zusammenhang schon in verschiedenen Arbeiten erkannt. Weber (2007a) sieht in 3-D CAD-Daten eine gute Grundlage zur Erzeugung von Systemlasten einer Simulation. „*Sie liefern die Informationen von Material, Menge und Ort der Bauteile, aus denen ein Gebäude besteht*“ (Weber 2007a, S. 107). Chahrour (2007, S. 1) bemängelt, dass CAD-Systeme zwar bei der Planung von Bauwerken eine zentrale Rolle spielen, die im CAD-Modell gespeicher-ten Daten aber in der Ausführungsphase nur noch eingeschränkt Verwendung finden. Sie sieht

daher die produktmodellbasierte Integration von CAD und Simulation als wichtigen Ansatz, um den Datenaustausch im Bauwesen zu verbessern. Ein ähnlicher Ansatz wird von *König und Beißert* (vgl. 2008, S. 34) vertreten, die die Entwicklung einer produktgestützten Modellgenerierung als Vision zukünftiger Forschungsarbeiten sehen. Sie merken an, dass dieser Ansatz eine Kopplung der CAD-Modelle mit Material- und Leistungsbeschreibungen erfordert.

Nach *Chahrour* (2007, S. 1) stellt die CAD-Umgebung eine für den Ingenieur vertraute und anwenderfreundliche Arbeitsumgebung dar, „*die die Einführung der Simulation in die baubetriebliche Praxis erleichtern kann.*“ In dieser Arbeit wird daher der Ansatz vertreten, dass sich eine CAD-Umgebung in besonderer Weise als Modellierungsumgebung für Simulationsmodelle im Bauwesen eignet. Die Integration einer Modellierungsumgebung für Simulationsmodelle in eine CAD-Umgebung macht die Simulation auch für Personen zugänglich, die zwar über Expertenwissen innerhalb ihrer Domäne, aber nicht über Expertenwissen in Bezug auf die Simulation verfügen. Gleichzeitig bietet die CAD-Umgebung einen vollumfänglichen Zugriff auf das Gebäudemodell und damit auf die Struktur, die Materialien und die Mengen des Endproduktes.

Für den Erdbau (*Chahrour* 2007) und für die Baulogistik im Hochbau (*Weber* 2007b) wurden bereits erfolgsversprechende, prototypische Simulationssysteme entwickelt, welche die CAD-Daten als Systemlast für die Ablaufsimulation verwenden. Während in dem von *Chahrour* (2007) entwickelten Simulationssystem die CAD-Daten über ein eigenes Produktmodell in das Simulationsmodell übertragen werden, verwendet *Weber* (2007b) eine Datenbank, die der Speicherung der wichtigsten bauteilbezogenen Daten dient (für eine detaillierte Betrachtung der Datenhaltung bei *Weber* (2007b) und *Chahrour* (2007) siehe auch Kapitel 2.2.3).

Mit der direkten Bearbeitung des Simulationsmodells im CAD-System wird in dieser Arbeit ein schnittstellenfreier Weg der Integration von CAD und Simulation beschritten. Die CAD-Daten werden ohne zusätzliche Datenbank direkt in das Simulationsmodell übertragen. Lediglich die für die Bauablaufsimulation notwendigen Prozessdaten werden projektunabhängig – und damit wiederverwendbar – in einer eigenen Datenbank gespeichert (siehe Abbildung 4.1). Die Bearbeitung der Prozessdaten findet aber ausschließlich in der CAD-Umgebung statt. Das CAD-System wird dadurch zur Modellierungsumgebung für die Simulationsmodelle.

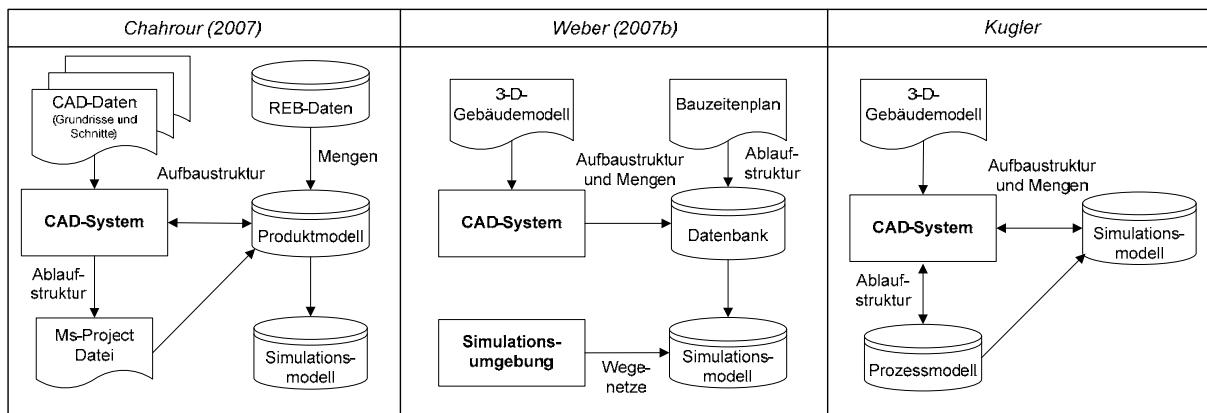


Abbildung 4.1: Datenhaltung in der Dissertation von Chahrour, Weber und der vorliegenden Arbeit

Der konkrete Forschungsbedarf orientiert sich an der Untersuchung von Ansätzen, mit denen Prozess- und Gebäudemodell zu einem simulationsrelevanten Produktmodell verbunden werden können. Als Ergebnis dieser Untersuchungen soll schließlich ein eigener Ansatz eines simulationsspezifischen Produktmodells entwickelt werden.

Die in dieser Arbeit angestrebte CAD-integrierte Simulationsmodellierung wird von der so genannten 4-D-Simulation abgegrenzt. „*In einer 4-D-Simulation werden die Objekte eines 3-D-Modells mit den Vorgängen eines Terminplans verknüpft. In einer Visualisierung über die Zeit kann dann der Baufortschritt dargestellt werden*“ (Hanff 2009, S. C1-3). Eine 4-D-Simulation beinhaltet aber nicht den Materialfluss auf der Baustelle und die Simulation des eigentlichen Baugeschehens in Bezug auf das Zusammenspiel von Arbeitskräften und Betriebsmitteln. Die 4-D-Simulation beschränkt sich lediglich auf die Visualisierung eines statischen Terminplans und beinhaltet daher auch keine stochastischen Einflussgrößen.

4.2 Produktmodelle im Hochbau

Auf dem Markt existieren eine Reihe von Simulationsumgebungen, wie z. B. Plant Simulation oder Enterprise Dynamics, die in der Lage sind CAD-Daten einzulesen und dadurch eine Integration von Gebäudedaten in ein Simulationsmodell ermöglichen. Während in der Automobilindustrie eine CAD-Zeichnung lediglich das Layout der Produktionsumgebung und die Anordnung der Produktionsmittel darstellt, wird in der Bauindustrie das Produkt selbst durch die CAD-Zeichnung beschrieben. Die Daten der CAD-Zeichnung müssen also nicht nur Koordinaten und Aussehen der Produktionsumgebung beschreiben, sondern zusätzlich fertigungsrelevante Informationen enthalten.

Eine Integration von Gebäudedaten und fertigungsrelevanten Informationen kann über ein sogenanntes Produktmodell erfolgen. Produktmodelle enthalten eine Sammlung von Informationen, die den gesamten Lebenszyklus eines Produktes beschreiben. Grundsätzlich können Produktmodelle auch aus verschiedenen Teilmodellen bestehen, die verschiedene Eigenschaften und Funktionen des Produktes beschreiben. Die aktuellsten Umsetzungen von Produktmodellen für das Bauwesen werden unter dem Begriff „Building Information Modelling“ (BIM) von verschiedenen CAD-Werkzeugen, wie z. B. Revit von Autodesk oder Tekla Structures von Tekla, unterstützt.

Eastman et al. (2008, S. 13) fassen die BIM-Definition der M.A. Mortenson Company – eines der führenden amerikanischen Bauunternehmen – zusammen. Das Gebäudemodell muss nach dieser Definition in folgender Form vorliegen:

- digital
- räumlich (in 3-D)
- messbar (quantifizierbar, dimensionierbar und abfragbar)
- allumfassend (Gebäudeentwurf, Gebäudefunktion, Konstruierbarkeit, beinhaltet sequentielle und finanzielle Aspekte)
- zugreifbar für das gesamte Projektteam
- beständig (verwendbar in allen Projektphasen)

Von dem weltweit führenden Anbieter von CAD-Software, der Firma Autodesk, wird unter BIM ebenfalls ein Modellierungsansatz und nicht eine konkrete Technologie verstanden. *Autodesk (2010)* hebt hervor, dass sich BIM mit verschiedenen CAD-Technologien auf unterschiedlichem Niveau und mit unterschiedlichem Aufwand umsetzen lässt. Zu diesen CAD-Technologien zählen sie (*Autodesk 2010, S. 1*):

- **CAD** (z. B. AutoCAD)

In der ursprünglichen **CAD**-Technologie wird ein Gebäude nur durch Linien repräsentiert. Es enthält keine weitergehenden Informationen zu den Objekten, die durch die Linien der Zeichnung dargestellt werden.

- **Object CAD** (z. B. Architecture)

Ein Modell, das auf der **Object CAD**-Technologie basiert, besteht aus Zeichnungsob-

ekte, die Elemente aus der realen Welt repräsentieren. Diese Zeichnungsobjekte „wissen“ was sie darstellen. Zusätzlich können weitere Daten mit diesen Objekten verknüpft werden. Ein Object-CAD Modell kann sehr einfach durch die Integration von Daten, die Beziehungen zwischen den Objekten beschreiben, zu einem Building Information Modell erweitert werden.

- **Parametric Building Modelling** (z. B. Revit)

Die **Parametric Building Modelling**-Technologie kombiniert ein Datenmodell, welches aus der Gebäudegeometrie und weiteren Daten besteht, mit einem Verhaltensmodell. Das bedeutet, dass Beziehungen, die zwischen Objekten oder Beziehungen, die zwischen Daten und Objekten bestehen, beschrieben werden können. So „weiß“ beispielsweise ein Fenster, dass es zu einer bestimmten Wand gehört (*vgl. Autodesk 2010, S. 3 ff.*). Die Definition von Beziehungen kann aber beispielsweise auch für die 4-D-Simulation verwendet werden, um Terminpläne mit den Objekten einer Zeichnung zu verknüpfen.

Aktuelle Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf die Entwicklung von Produktmodellen, die auch für die Belange der Simulation verwendet werden können.

Im Forschungsverbund „Virtuelle Baustelle“ (**ForBau**) wurde an einem ganzheitlichen digitalen Baustelleninformationsmodell für den Tiefbau gearbeitet, das in allen Projektphasen Anwendung finden kann. Die Daten für die Bauablaufsimulation, die Visualisierung der Planung, das Baustellencontrolling und für die digitale 3-D-Vermessung werden in einem Baustelleninformationsmodell integriert, auf das die jeweiligen Fachplaner zugreifen können (*Günthner et al. 2010*). Im Rahmen des Projektes wurde der ForBAU-Integrator entwickelt, der verschiedene 3-D-Teilmodelle – wie Trassenmodell, Bauwerksmodell, Geländemodell, Baugrundmodell und Baustelleneinrichtungsmodell – integriert (*vgl. Günthner et al. 2010, S. 20 f.*).

Ein ähnlicher Ansatz wird in dem Projekt **MEFISTO** (Management – Führung – Information – Simulation im Bauwesen) verfolgt (*BMBF 2009*). Ziel von MEFISTO ist die Entwicklung eines Managementführungssystems, welches anhand von Simulationen Prognosen als Entscheidungshilfe für unterschiedliche Führungsebenen ermöglichen soll. Als Vorbild für das Projekt wird die im Maschinenbau etablierte digitale Fabrik gesehen. Die Bauplanung und -ausführung soll unter Verwendung von MEFISTO durchgängig digital abgebildet werden.

Zu diesem Zweck wird eine interoperable Plattform entwickelt, die beispielsweise die Sichtweise von Bauunternehmer und Auftraggeber gleichermaßen berücksichtigt (BMBF 2009). Zusätzlich werden Methoden und Softwarewerkzeuge für die Visualisierung von Modellabhängigkeiten, die Simulation von Planungsvarianten und für das Risikomanagement entwickelt (vgl. Schapke und Fuchs 2011, S. 13).

Von Chahrour (vgl. 2007, S. 50) wird der Trend zu vollumfänglichen Produktmodellen kritisch betrachtet. Sie stellt fest, dass solche Projekte zur Komplexität neigen, weil immer neue Aspekte in das Modell integriert werden müssen. Die zunehmende Komplexität macht die Modelle jedoch unwirtschaftlich. Zudem gibt es im Bauwesen keine Beteiligten, die sich für den gesamten Inhalt eines Produktmodells interessieren und verantwortlich fühlen. Um die Probleme, die mit einem vollumfänglichen Produktmodell verbunden sind, zu umgehen, werden im Projekt MEFISTO die verschiedenen operativen Fachmodelle nicht zentral in einem Produktmodell integriert, sondern für einzelne Aufgaben in Multimodellen zusammengeführt. MEFISTO stellt zu diesem Zweck eine semantische Dienstplattform bereit, mit der bestehende Softwaresysteme verschiedener Fachplanungsbereiche vernetzt werden können (vgl. Schapke und Fuchs 2011, S. 12).

Chahrour (vgl. 2007, S. 50) sieht zusätzlich die Gefahr von Kompatibilitätsproblemen zwischen einem vollumfänglichen Produktmodell und den verschiedenen Werkzeugen, die auf das Produktmodell zugreifen. Wird das Produktmodell aktualisiert, muss die Schnittstelle zeitgleich an allen beteiligten Werkzeugen aktualisiert werden. Ähnlich beurteilen Abolghasemzadeh und Rätzke (vgl. 2009, S. 16 f.) die Verwendung von Produktmodellen als Schnittstelle. Sie integrieren ihren Simulator zur Evakuierungssimulation daher in die BIM-basierte CAD-Umgebung Revit von Autodesk, wodurch sie direkten Zugriff auf alle relevanten Informationen eines BIM erhalten. Sie bemängeln, dass Schnittstellen wie die IFC⁵ (Industrial Foundation Classes) meist nicht alle relevanten Informationen enthalten oder angepasst werden müssen.

Ein wesentlicher Unterschied zur Automobilindustrie, in der sich Produktmodelle, die das Produkt in seiner Gesamtheit erfassen können, schon etabliert haben (Stichwort: digitale Fabrik), besteht im Bauwesen nicht nur im Unikatcharakter der Projekte, sondern auch in der Vielzahl der am Projekt beteiligten Unternehmen. Die unterschiedlichen Sichtweisen auf das

⁵ Die IFC wurden als herstellerunabhängiger Standard für den Austausch von objektorientierten Gebäudemodellen Mitte der 90er Jahre von der International Alliance for Interoperability (IAI) entwickelt.

Projekt und die unterschiedlichen Interessen der Beteiligten erschweren die Entwicklung eines Produktmodells, welches für alle im selben Umfang nutzbar ist. Im Vergleich zum Bauwesen werden in den großen Automobilkonzernen die meisten Projektphasen intern abgewickelt, weshalb sich die unterschiedlichen Planungsabteilungen auch verantwortlich für den Gesamteinheitinhalt eines Produktmodells fühlen. Im Bauwesen werden die Fachplanungen und die Ausführungsplanung oftmals von unterschiedlichen Unternehmen durchgeführt. Einem Fachplaner ist daher nur schwer zu vermitteln, dass er für die Vollständigkeit von Daten zuständig sein soll, die in einer nachfolgenden Projektphase von einem anderen Unternehmen benötigt werden. *Eastmann et al. (2008, S. 8)* bemerken daher, dass der Nutzen eines BIM davon abhängig ist, in welcher Phase des Projektes das Modell erstellt wird und wie gut die Zusammenarbeit zwischen den Projektbeteiligten funktioniert. Sie heben ebenfalls hervor, dass BIM in erster Linie dann gewinnbringend eingesetzt werden kann, wenn nur ein Unternehmen für den Gebäudeentwurf und die komplette Bauausführung zuständig ist. Aufgrund der geringen Größe der meisten deutschen Bauunternehmen, dürfte es sich bei solchen Projekten jedoch um Ausnahmefälle handeln.

Bei mehreren Beteiligten kann die Vollständigkeit der Daten nur über entsprechende Sanktionen oder neue Vergütungsmodelle gewährleistet werden. Bauunternehmen haben außerdem ein besonderes Interesse daran, dass Daten, auf deren Grundlage sie Angebote oder Ausführungsplanungen erstellen, nicht in die Hände von Mitbewerbern gelangen.

4.3 Das Prozessmodell des Simulationssystems

Neue Informationstechnologien lassen sich einfacher in die Praxis überführen, wenn sie den vorherrschenden Unternehmensstrukturen angepasst sind und sich dadurch einfach in die Arbeitsabläufe der Unternehmen integrieren lassen. In der vorliegenden Arbeit wird daher ein Prozessmodell für die Ausführungsplanung entwickelt, welches lediglich für die Simulation und die Terminplanung verwendet werden kann und nicht in ein umfangreicheres Produktmodell integriert wird. Dieses Prozessmodell soll in Kombination mit einem 3-D-Gebäudemodell ein simulationsrelevantes Produktmodell für den Hochbau bilden. Diese Insellösung hat den Vorteil, dass nur das mit der Ausführungsplanung betraute Unternehmen für die Konsistenz und Vollständigkeit der Daten zuständig ist und nur die unmittelbar für die Ausführungsplanung benötigten Daten zu erfassen sind. Der Nachteil dieser Lösung besteht darin, dass die Daten für andere Planungsphasen nicht ohne Weiteres wiederverwendet werden können.

Unter einem Prozessmodell wird in der vorliegenden Arbeit ein Modell verstanden, das die mit einer Aufgabe verbundenen Vorgänge beschreibt. Die Darstellung der Vorgänge beinhaltet zum einen die für die Ausführung des Vorgangs benötigten Ressourcen und zum anderen die Beziehungen oder Abhängigkeiten, die zwischen den Vorgängen des Modells existieren.

Die Simulation von Bauabläufen im Hochbau setzt als Grundlage für die Ablaufstruktur der Simulation ein gültiges Prozessmodell voraus. Unter Verwendung des Prozessmodells werden die Ausführungsreihenfolge der Vorgänge und die für die Ausführung eines Vorgangs benötigten Ressourcen ermittelt. Im Zuge der Entwicklung eines eigenen Prozessmodells für die Bauablaufsimulation wurden verschiedene Ansätze zur Prozessmodellierung im Bauwesen untersucht. Das Hauptaugenmerk lag hierbei auf Ansätzen zur Prozessmodellierung, die die Bauprozessdaten mit CAD-Daten in Form von bauteilorientierten Gebäudemodellen verbinden (vgl. *Kugler 2009, S. 34 f.*). Im folgenden Unterkapitel werden zunächst die für das entwickelte Prozessmodell grundlegenden Arbeiten im Bereich der Prozessmodellierung im Hochbau vorgestellt (*Aalami und Fischer 1998, Huhnt und Enge 2007*). Zusätzlich werden aktuelle und parallel zu dieser Arbeit entwickelte Ansätze zur Prozessmodellierung betrachtet (*Günthner et. al 2010, König und Marx 2011*). Darauf aufbauend werden die Semantik und das Datenmodell des entwickelten Prozessmodells erläutert.

4.3.1 Prozessmodelle für die Terminplanung und die Bauablaufsimulation

*Fischer und Aalami (1996)*⁶ spezifizierten eine Bauverfahrensmodell-Vorlage (Construction Method Model Template - CMMT), die zur formalen Beschreibung der Vorgänge eines Bauverfahrens dient (*Aalami und Fischer 1998*). Die Bauvorgänge werden in Form eines sogenannten <CARS>-Tupel beschrieben, indem die beteiligten Bauteile <C>, Aktionen <A>, Ressourcen <R> und Abhängigkeitsbeziehungen <S> definiert werden (siehe Abbildung 4.2). Aufbauend auf dieser Bauverfahrensmodell-Vorlage wurde ein Bauverfahrensmodellierer (Construction Method Modeler - CMM) entwickelt, mit dem ein 4-D-Produktionsmodell erstellt werden kann. Als CAD Grundlage kann der CMM Zeichnungsdateien laden, die IFC kompatibel sind.

Den Zeichnungselementen können anschließend unter Verwendung der Informationen aus dem CMMT geeignete Bauverfahren zugeordnet werden. Von dem CMM werden anschließend die benötigten Vorgänge automatisch generiert und sequenziert. Für die Sequenzierung

⁶ Teile des in diesem Unterkapitel folgenden Textes wurden bereits bei *Kugler (2009, S. 34-35)* veröffentlicht.

werden unter anderem Informationen aus dem Produktmodell verwendet, die die Beziehungen zwischen den Bauteilen beschreiben (vgl. Kuhne et al. 2000, S. 18). In dem vorgestellten Konzept existieren die zwei Beziehungsarten „Decomposes_Into“ (gliedert_sich_in) und „Supported_By“ (unterstützt_von, gegründet_auf). Darauf aufbauend ist es möglich, 4-D-Visualisierungen, Netzpläne, Balkendiagramme oder Ressourcen-Histogramme zu erstellen.

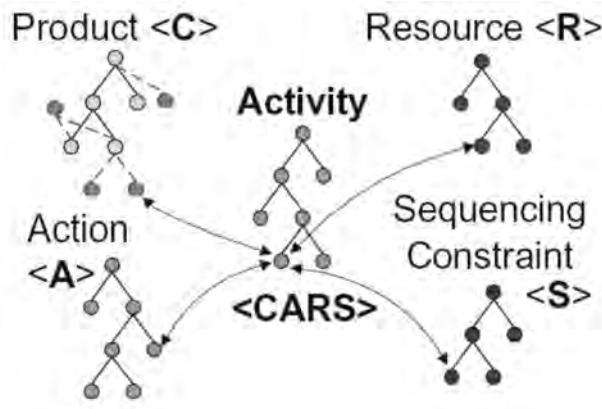


Abbildung 4.2: <CARS>-Tupel der Bauverfahrensmodellvorlage Fischer et al. (1999)

Der CMM unterstützt außerdem die gleichzeitige Ausarbeitung des Produkt- (Gebäude)- und des Prozessmodells. Wird beispielsweise ein bestimmtes Bauverfahren ausgewählt, so prüft der CMM, ob die mit den Vorgängen im CMMT verbundenen Bauteile im Produktmodell vorhanden sind. Ist das nicht der Fall, so werden automatisch die mit den Vorgängen verbundenen Bauteile im Gebäudemodell neu generiert. Dieser Automatismus trägt der Tatsache Rechnung, dass digitale Gebäudemodelle oftmals nicht in dem für eine automatisch generierte Ablaufplanung notwendigen Detaillierungslevel vorliegen. So fehlt beispielsweise in der Regel in einem CAD-Modell die Angabe, wie die Oberfläche einer Wand beschaffen ist (z. B. Putz, Tapete oder Anstrich).

Huhnt und Enge (2007) entwickelten eine formale Beschreibung des Bauprozesses auf der Bauteilebene. Sie beschreiben den Bauprozess als eine Folge von Vorgängen und Bauteilzuständen. Für die Sequenzierung der Prozesse wird jedem Vorgang als zwingende Voraussetzung ein bestimmter Bearbeitungszustand eines anderen Bauteils zugewiesen.

Wurde der Vorgang ausgeführt, so liefert er wiederum als Ergebnis einen Bauteilzustand, der die Voraussetzung für nachfolgende Vorgänge darstellen kann (siehe Abbildung 4.3). Vorgänge und Bearbeitungszustände werden so in eine feste Relation zueinander gesetzt. Der Bauprozess lässt sich auf diese Weise als gerichteter, azyklischer Graph darstellen. Den Vor-

gängen werden außerdem Personen und den Bearbeitungszuständen der Bauteile Equipment zugewiesen, um so den Ressourcenbedarf der Vorgänge zu berücksichtigen (*Kugler 2009, S. 34-35*). Durch diese Form der Prozessmodellierung lassen sich jedoch nur zwingende Abhängigkeiten zwischen den Bauvorgängen modellieren.

Eingangsgrößen:

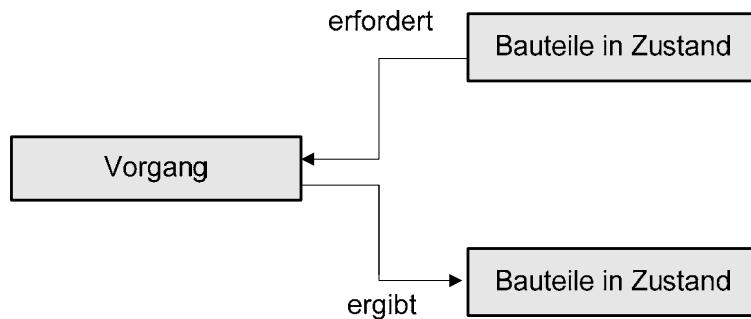


Abbildung 4.3: „Vorgang mit Voraussetzungen und Ergebnissen“ (Huhnt und Enge 2007, S. 34)

Huhnt und Richter (vgl. 2010, S. 26) entwickelten dieses Modell weiter, indem sie Aktivitäts-Zustandspaare als projektunabhängige Teilprozessvorlagen beschrieben. Werden diese Teilprozessvorlagen Bauteilen zugeordnet, so können davon projektabhängige Teilprozesse instanziert werden. Bei einer vollständigen Menge der Bauteile eines Bauwerks können so alle Aktivitäten des Bauprojekts vom Gebäudemodell und den Teilprozessvorlagen abgeleitet werden.

König und Marx (vgl. 2011, S. 96) fassen im Projekt MEFISTO verschiedene Datenmodelle zu einem Multimodell-Container für die Simulation (MMC-Sim) zusammen. Diese beinhalten ein Bauwerksmodell im IFC-Step-Format, Leistungen im GAEB⁷-XML-Format, eine Mengenermittlung und Aufwandswerte für die Leistungen, die aus der Software iTWO der Firma RIB importiert werden. Diese Datenmodelle werden über ein Linkmodell miteinander verknüpft. Die Informationen des MMC-Sim werden in einem eigens entwickelten SimSiteEditor mit zusätzlichen Informationen zu Prozessen, Ressourcen und Reihenfolgen ergänzt (vgl. *König und Marx 2011, S. 97*). Für die Beschreibung der Prozesse werden Referenzprozesse als Vorlagen definiert. Den verschiedenen Bauelementen und Bauwerksgruppen können diese Referenzprozesse zugeordnet werden. Um die Reihenfolge zu beschreiben, können Anordnungsbeziehungen sowie technologische und strategische Beziehungen zwischen den Prozessen des Referenzprozesses definiert werden. Den Referenzprozessen lassen sich aber nur

⁷ Gemeinsamer Ausschuss Elektronik im Bauwesen

Anordnungsbeziehungen der beinhaltenden Prozesse zuweisen (*vgl. König und Marx 2011, S. 98*).

Im Projekt ForBAU (*vgl. Günther et al. 2010, S. 45*) wurde die Software ForBAU-Preparator implementiert, die Materialmengen, Ressourcen, technologische Abhängigkeiten und Bauprozesse als Eingangsdaten für die Simulation generiert. Die Software importiert ein 3-D-Brückenmodell dessen einzelnen Bauteilen vom Anwender Konstruktionsmethoden zugewiesen werden. Die Konstruktionsmethoden können von bereitgestellten Process-Patterns⁸ abgeleitet werden. Das System schlägt danach technologische Reihenfolgebedingungen vor, die vom Nutzer manuell entfernt oder bearbeitet werden können. Nach abgeschlossener Definition aller Konstruktionsmethoden werden atomare Prozessbausteine generiert und in einer XML-Datei gespeichert, die in der Simulationsumgebung Plant Simulation eingelesen werden kann.

Die Möglichkeiten für die Terminplanung, die sich durch eine Verbindung von Gebäude- und Prozessdaten ergeben, wurden von *Fischer und Aalami (1996)* schon früh erkannt. Aktuelle Arbeiten – wie MEFISTO und ForBau – konzentrieren sich auf eine Verknüpfung der Prozessdaten mit den Bauteilen von 3-D-Modellen, um die für die Ausführungsdauer der Prozesse relevanten Mengen zu bestimmen und atomare Prozessbausteine zu generieren, aus denen sich der Bauablauf zusammensetzt. Probleme bereitet nach wie vor die Sequenzierung der Prozesse. Die Beziehungen zwischen verschiedenen Referenzprozessen müssen beispielsweise bei *König und Marx (2011, S. 103 f.)* entweder benutzerspezifisch oder durch zusätzliches Verknüpfungswissen spezifiziert werden.

4.3.2 Semantik des entwickelten Prozessmodells

Die Semantik des entwickelten Prozessmodells lehnt sich an die von *Huhnt und Enge (2007)*, von *Fischer und Aalami (1996)* und der von der REFA verwendeten Semantik an. Die Semantik wird außerdem um wesentliche Punkte erweitert, um eine automatische Sequenzierung der Prozesse durch eine Berücksichtigung der Gebäudestruktur und der Bauablaufplanung zu ermöglichen.

Das Modellierungskonzept geht davon aus, dass zwar jedes Bauprojekt ein Unikatprojekt darstellt, es sich aber in atomare Prozesse zerlegen lässt, die sich innerhalb eines Projektes in geänderter Anordnung wiederholen. Die Anordnung der Prozesse untereinander ist in erster

⁸ dt.: Prozess-Muster

Linie von konstruktiven Bedingungen abhängig, die sich aus der Gebäudestruktur ergeben. Zusätzlich spielt die Bauablaufplanung eine große Rolle bei der Sequenzierung der Prozesse. Die in der Bauablaufplanung festgelegte Fertigungsrichtung kann über die Bauabschnitte mit der Gebäudegeometrie assoziiert werden. Die Gebäudestruktur nimmt daher in diesem Modellierungskonzept eine zentrale Rolle ein, um die Anordnung der Prozesse untereinander zu automatisieren. In Anlehnung an die Prozessmodellierung von *Fischer et al.* (1999) wird der Vorgang (Activity) als zentrales Element des Prozessmodells gesehen (siehe Abbildung 4.2). Um die Verknüpfung zwischen Gebäude- und Prozessmodell zu vereinfachen, wird jedoch nicht der Vorgang, sondern ein Verfahren mit einem Bauteiltypen (Component) verknüpft. Dem Verfahren werden mehrere Vorgänge zugeordnet, so dass sich die Anzahl der Verknüpfungspunkte zwischen Gebäude- und Prozessmodell verringert. Dem Vorgang werden weiterhin die Sequenzierungsbedingungen in Form von Voraussetzungen zugeordnet. Eine Voraussetzung definiert in Anlehnung an die Sequenzierungsmethodik von *Huhnt und Enge* (2007) einen Bearbeitungszustand eines anderen Bauteils, bzw. das Ergebnis eines anderen Vorgangs.

Verwendbare Gebäudemodelle müssen als Voraussetzung für die Kombination mit dem Prozessmodell aus 3-D-Bauteilen bestehen, die sich jeweils einem Bauteiltyp zuordnen lassen und deren Eigenschaftsdatensätze sich um benutzerdefinierbare zusätzliche Einträge erweitern lassen. Abbildung 4.4 zeigt die wichtigsten Elemente des Gebäude- und des Prozessmodells als UML-Klassendiagramm. Die UML (Unified Modelling Language) ist eine in der ISO/IEC 19501 standardisierte Modellierungssprache für die Beschreibung von Systemen. Ursprünglich wurde die UML von einem Zusammenschluss namhafter Unternehmen (wie z. B. Microsoft, Oracle und IBM) entwickelt, die eine einheitliche Modellierungssprache für die Softwareentwicklung durchsetzen wollten. Später wurde die UML dann von dem Standardisierungsgremium OMG (Object Management Group) zertifiziert und freigegeben. UML-Diagramme haben sich mittlerweile auch außerhalb der Softwareentwicklung für die Darstellung von statischen und dynamischen Aspekten beliebiger Systeme durchgesetzt (*vgl. Kecher 2007, S. 15 ff.*). Klassendiagramme gehören zu den Strukturdiagrammen der UML, die für die Beschreibung der statischen Struktur eines Systems verwendet werden. In einem Klassendiagramm können die Attribute und die Operationen von Systemkomponenten und die Assoziationen zwischen diesen Systemkomponenten beschrieben werden.

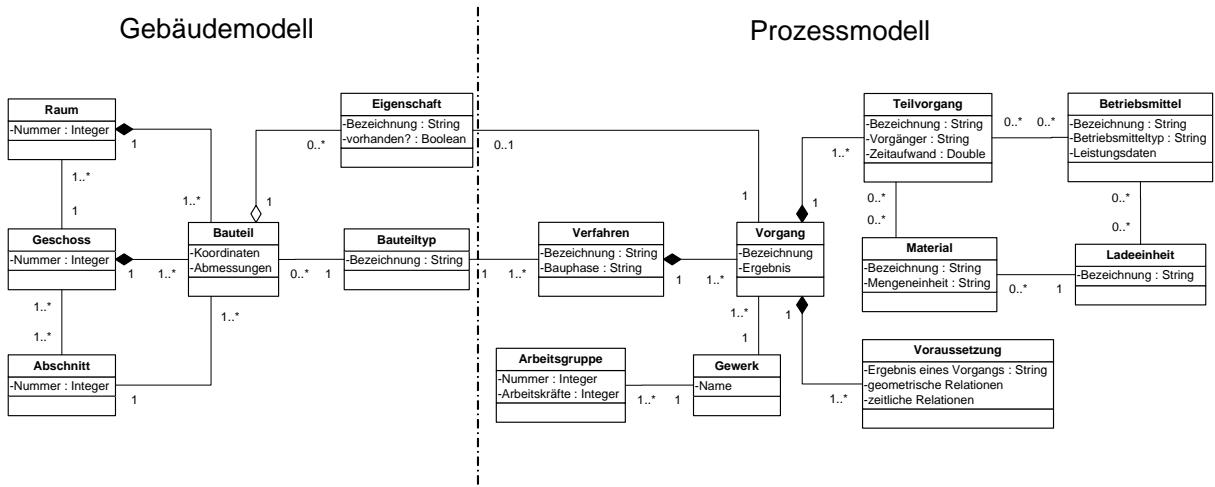


Abbildung 4.4: UML-Klassendiagramm des Gebäude- und des Prozessmodells

Die Bestandteile des Gebäude- und des Prozessmodells werden im Folgenden anhand des Beispiels der Herstellung einer gemauerten Innenwand mit einer Wandstärke von 11,5 cm erläutert.

Bestandteile des Gebäudemodells

Bauteil

Das Bauteil ist die kleinste Einheit des Gebäudemodells. Ein Bauteil kann z. B. eine Innenwand, ein Unterzug, eine Stütze oder ein Deckenelement sein. Das Bauteil besitzt 3-D-Koordinaten und Abmessungen, die seine Lage im Bauwerk beschreiben. Jedes Bauteil ist einem Bauteiltypen zugeordnet und besitzt einen erweiterten Eigenschaftsdatensatz, der ebenfalls dem Bauteiltypen zugeordnet ist. Die Werte dieser Eigenschaften sind objektbezogen und können daher bei den einzelnen Bauteilen eines Bauteiltyps unterschiedlich sein.

Bauteiltyp

Ein Bauteiltyp fasst eine größere Menge von einzelnen Bauteilen zusammen, die sich in ihrem Aufbau und ihrer Materialzusammensetzung gleichen und dadurch mit denselben Bauverfahren hergestellt werden können. Dadurch lassen sich beispielsweise alle Innenwände eines Gebäudes mit der Wandstärke von 11,5 cm dem Bauteiltypen „Innenwand 11,5 cm“ zuordnen. Die Bauteile eines Bauteiltyps unterscheiden sich nur durch die Werte der Eigenschaften, ihre Koordinaten und ihre Abmessungen. Jedem Bauteiltyp können mehrere Verfahren zugeordnet werden, die den Herstellungsprozess der Bauteile des Bauteiltypen beschreiben (z. B. ein Verfahren für die Herstellung des Bauteilkerns und ein anderes Verfahren für die Behandlung der

Oberfläche des Bauteils). Dem Bauteiltypen können außerdem erweiterte Eigenschaften zugeordnet werden.

Eigenschaften

Bauteile eines Bauteiltyps gleichen sich zwar im Aufbau des Bauteilkerns der im Rohbau hergestellt wird, doch auf den Ausbau bezogen kann sich die Oberflächenstruktur der Bauteile erheblich voneinander unterscheiden. Beispielsweise können einige Innenwände des Gebäudes verputzt und andere unverputzt und nur gestrichen werden. Um diese verschiedenen Innenwände trotzdem zu einem gemeinsamen Bauteiltypen zusammenfassen zu können, wird das Gebäudemodell um Bauteileigenschaften erweitert. Jedem Bauteiltyp wird ein Eigenschaftsdatensatz zugewiesen, der aus mehreren Eigenschaften besteht. Eine Eigenschaft besitzt den Datentyp Boolean und kann nur 2 Werte annehmen: *True* (Wahr) oder *False* (Unwahr). Soll ein Vorgang nicht an allen Bauteilen eines Bauteiltyps ausgeführt werden, so kann dieser mit einer Eigenschaft verknüpft werden. Der Vorgang wird dann nur an Bauteilen ausgeführt, bei denen diese Eigenschaft zutrifft. Beispielsweise wird der Vorgang „verputzen“ dann nur an den Innenwänden ausgeführt, bei denen die Eigenschaft „Putz“ den Wert *True* besitzt.

Geschoss

Das Geschoss bezeichnet eine komplette Ebene des Gebäudes. Jedes Bauteil ist genau einem Geschoss zugeordnet.

Abschnitt

Ein Abschnitt bezeichnet einen Bereich des Gebäudes in einem Geschoss. Die Bezeichnung Abschnitt wird in der Rohbauphase für einen Produktionsbereich verwendet. Jedes Bauteil ist genau einem Abschnitt zugeordnet. Alle Bauteile eines Bauteiltyps, die sich in einem Abschnitt befinden, werden zeitgleich oder direkt aufeinander folgend produziert. Beispielsweise werden alle Innenwände, die sich in einem Abschnitt befinden, nacheinander oder zeitgleich gemauert.

Raum

Ein Raum ist ein abgeschlossener Bereich des Gebäudes in einem Geschoss. Die Bezeichnung Raum wird in der Ausbauphase für einen Produktionsbereich verwendet. Jedes Bauteil kann ein bis zwei Räumen zugeordnet werden. Alle Bauteile eines Bauteiltyps, die sich in einem Raum befinden, werden zeitgleich oder direkt aufeinander folgend bearbeitet. So wird bei-

spielsweise der Vorgang „tapezieren“ an allen Innenwänden eines Raums nacheinander durchgeführt.

Bestandteile des Prozessmodells

Verfahren

In Anlehnung an die Definition der REFA-Methodenlehre wird unter einem Verfahren eine Technologie verstanden, „*die zur Durchführung einer Arbeitsaufgabe angewendet wird*“ (Künstner 1984, S. 95). Das Verfahren wird durch die eingesetzten Betriebs- und Arbeitsmittel spezifiziert. In diesem Prozessmodell wird jedes Verfahren mit einem Bauteiltypen verknüpft. Das Verfahren besteht aus mehreren Vorgängen, die zur Produktion des Bauteiltypen ausgeführt werden. Eine Innenwand kann z. B. mit dem Verfahren „Innenwand mauern mit Maurerbühne“ hergestellt werden. Das Verfahren wiederum setzt sich aus den Vorgängen „Maurerbühne ausrichten“ und „Innenwand mauern“ zusammen.

Vorgang

Der Vorgang ist einem Verfahren und damit einem konkreten Bauteiltyp zugeordnet. Dem Vorgang werden außerdem ein Gewerk und ein Ergebnis zugewiesen. Beispielsweise gehört der Vorgang „Innenwand mauern“ zu dem Gewerk „Mauerarbeiten“. Das Ergebnis dieses Vorgangs ist die „gemauerte Wand“. Definiert werden kann außerdem, ob die Ausführung des Vorgangs von einer Eigenschaft des Bauteils abhängig ist.

Jedem Vorgang muss mindestens eine Voraussetzung und ein Teilvergäng zugeordnet werden. Eine weitere Beschränkung der Anzahl der Voraussetzungen und der Teilvergänge besteht nicht.

Teilvorgang

Ein Teilvorgang ist immer einem bestimmten Vorgang zugehörig. Die Teilvergänge eines Vorgangs werden in einer festgelegten Reihenfolge abgearbeitet. Mit dem Teilvorgang wird der für die Ausführung der Arbeitsleistung benötigte Ressourcenbedarf in Form von Zeitaufwandswerten, Material und Betriebsmitteln verknüpft. Teilvergänge des Vorgangs „Innenwand mauern“ sind z. B. „Wand einmessen“ oder „Steine setzen“.

Jedem Teilvorgang muss wahlweise ein stochastischer oder ein deterministischer Zeitaufwandswert zugewiesen werden. Dieser Zeitaufwandswert wird auf die Fertigungsmenge bezogen (min/Fertigungsmenge). Als Mengeneinheiten werden die Abrechnungseinheiten der

VOB Teil C verwendet (m^3 , m^2 , m, Stück und Masse). So kann z. B. definiert werden, dass die Ausführung des Teilarbeitsvorgangs „Wand einmessen“ zwischen fünf bis zehn Minuten pro Wand (Stück) benötigt.

Dem Teilarbeitsvorgang wird außerdem Material zugewiesen, das für die Ausführung des Teilarbeitsvorgangs benötigt wird. Die notwendige Materialmenge wird ebenfalls auf die Fertigungsmenge bezogen (Materialmenge/Fertigungsmenge). Mit jedem Teilarbeitsvorgang können beliebige unterschiedliche Materialien verknüpft werden. Für die Ausführung des Teilarbeitsvorgangs „Steine setzen“ werden z. B. 32 Hochlochziegel (2 DF) und 13,2 Liter Mörtel pro m^2 gefertigter Wand benötigt.

Die für die Ausführung des Teilarbeitsvorgangs benötigten Betriebsmittel werden entweder mit einer festen Anzahl pro Arbeitsgruppe (Stück/Arbeitsgruppe) oder ebenfalls relativ bezogen auf die Fertigungsmenge (Stück/Fertigungsmenge) mit dem Teilarbeitsvorgang verknüpft. So wird z. B. für die Ausführung des Teilarbeitsvorgangs „Steine setzen“ eine Maurerbühne pro Arbeitsgruppe benötigt, während für den Teilarbeitsvorgang „einschalen“ 2 m^2 Schalung pro m^2 gefertigter Stahlbetonwand bereitstehen müssen.

Voraussetzung

Durch die Voraussetzungen lässt sich die Reihenfolge, in der die Vorgänge ausgeführt werden, exakt beschreiben. Die Voraussetzungen, die für einen Vorgang formuliert werden, gelten für alle Bauteile des Bauteiltyps, dem der Vorgang zugewiesen ist. Die in dem Prozessmodell verwendeten Voraussetzungen lassen sich in zwei Typen unterscheiden:

- Der **Fertigungsrichtung**, die eine organisatorische Abhängigkeitsbeziehung darstellt und die festlegt, in welcher Reihenfolge ein Vorgang im Bauwerk ausgeführt wird und
- den **Abhängigkeitsbeziehungen**, die alle technischen und sonstigen organisatorischen Abhängigkeitsbeziehungen zwischen den Vorgängen beschreiben.

Die **Fertigungsrichtung** des Vorgangs „Innenwand mauern“ beschreibt beispielsweise, dass zunächst die Innenwände im ersten Bauabschnitt im ersten Geschoss, dann die Innenwände im zweiten Bauabschnitt des ersten Geschosses und dann die Innenwände im ersten Bauabschnitt des zweiten Geschosses gefertigt werden. Mit den **Abhängigkeitsbeziehungen** lässt sich definieren, dass bevor der Vorgang „Innenwand mauern“ begonnen werden kann, die

Decke, auf der die Wand steht, betoniert sein muss und das der Vorgang „Außenwand mauern“ in dem gleichen Geschoss abgeschlossen sein soll.

Die Voraussetzungen für einen Vorgang oder ein Verfahren können vom Anwender selbst festgelegt werden. Die Voraussetzungen können zum einen durch räumliche und zum anderen durch zeitliche Relationen zu anderen Vorgängen definiert werden. In Tabelle 4.1 werden die Bestandteile einer Voraussetzung benannt.

Tabelle 4.1: Bestandteile einer Voraussetzung

Ergebnis eines Vorgangs oder Verfahrens:	gibt an, welcher Vorgang oder welches Verfahren abgeschlossen sein muss, damit die Voraussetzung erfüllt ist.
Geschoss:	gibt das Geschoss an, in dem der zuvor spezifizierte Vorgang abgeschlossen sein muss.
Abschnitt/Raum:	gibt in der Rohbauphase den Abschnitt und in der Ausbauphase den Raum an, in dem der Vorgang abgeschlossen sein muss.
Anordnungsbeziehung:	spezifiziert eine zeitlich Abhängigkeit, die zwischen dem Vorgang und seiner Voraussetzung besteht.

Die räumlichen Relationen beziehen sich auf die Gebäudegeometrie, die im Prozessmodell durch Geschosse, Abschnitte, Räume und Bauteile repräsentiert wird. Die zeitlichen Relationen werden durch die in der DIN 69900 definierten Anordnungsbeziehungen modelliert (*DIN 69900 2009*). Im Prozessmodell stehen folgende Anordnungsbeziehungen zur Auswahl:

- Ende-Anfang-Folge inkl. Zeitabstand (Normalfolge)
- Anfang-Anfang-Folge inkl. Zeitabstand (Anfangsfolge)

Für die Beschreibung der räumlichen Relationen stehen eine Reihe vordefinierter Begriffe zur Verfügung, die sich auf die Geschosse und die Abschnitte oder Räume des Gebäudes beziehen und die miteinander kombiniert werden können (siehe Tabelle 4.2).

Im Prozessmodell muss außerdem definiert werden, ob es sich bei der Voraussetzung um eine Abhängigkeitsbeziehung oder um eine Fertigungsrichtung handelt.

Tabelle 4.2: Begriffe zur Beschreibung der räumlichen Relationen

Geschosse:	Abschnitte/Räume:
dieses Geschoss	dieser Abschnitt/Raum
vorhergehendes Geschoss	vorhergehender Abschnitt/Raum
nachfolgendes Geschoss	nachfolgender Abschnitt/Raum
Geschossnummer X	Abschnitts-/Raumnummer Y
alle Geschosse	alle Abschnitte/Räume

Die Fertigungsrichtung kann grundsätzlich mit den gleichen Begriffen wie die Abhängigkeitsbeziehungen beschrieben werden, jedoch wird bei der Definition der Fertigungsrichtung keine Anordnungsbeziehung benötigt.

In dieser Arbeit werden die räumlichen Relationen als relative – und nicht als absolute – Laagebezeichnungen angegeben.

Beispiel:

- *Wenn die Bodenplatte in dem Geschoss (beschrieben durch: „dieses Geschoss“, „alle Abschnitte/Räume“), in dem der Vorgang „Außenmauerwerk mauern“ ausgeführt werden soll, zwei Tage abgebunden hat, kann das Außenmauerwerk erstellt werden.*

Eine Beschreibung bezogen auf die absolute Lage des Bauteiltypen würde folgendermaßen lauten:

- *Wenn die Bodenplatte in Geschoss 1 zwei Tage abgebunden hat, dann kann das Außenmauerwerk in Geschoss 1 erstellt werden.*
- *Wenn die Bodenplatte in Geschoss 2 zwei Tage abgebunden hat, dann kann das Außenmauerwerk in Geschoss 2 erstellt werden etc.*

Durch die relative Festlegung der räumlichen Relationen können die Abhängigkeitsbeziehungen und die Fertigungsrichtung eines Vorgangs allgemeingültig für alle Bauteile, an denen der Vorgang ausgeführt werden soll, definiert werden.

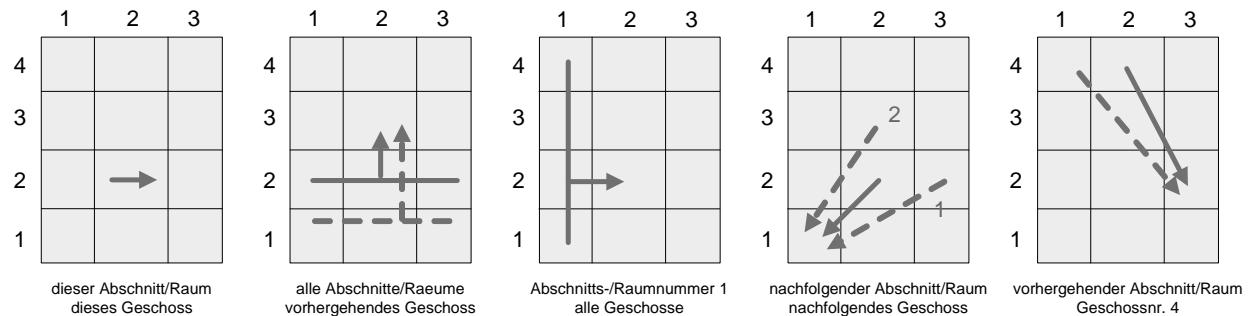


Abbildung 4.5: Verschiedene räumliche Abhängigkeitsbeziehungen

Abbildung 4.5 enthält exemplarisch fünf räumliche Abhängigkeitsbeziehungen. Die Pfeile beginnen in dem Segment, in dem die Voraussetzung erfüllt sein muss und sie enden jeweils in dem Segment, in dem der Vorgang ausgeführt werden soll. Müssen beispielsweise in einem Raum erst die Heizungsrohre für die Fußbodenheizung montiert sein, bevor in dem gleichen Raum der Estrich verlegt werden kann, so lässt sich diese Voraussetzung durch die erste räumliche Abhängigkeitsbeziehung in Abbildung 4.5 und das Ergebnis „Heizungsrohre verlegt“ beschreiben.

Die gestrichelten Linien geben an, auf welches Gebäudesegment sich die Voraussetzung alternativ bezieht, falls sich das mit der Voraussetzung verknüpfte Ergebnis nicht im angegebenen Gebäudesegment findet (weil der mit dem Vorgang verknüpfte Bauteiltyp in dem Segment nicht existiert). Die Beschriftungen unterhalb der jeweiligen Zeichnung geben die Bezeichnungskombination an, die die jeweilige Abhängigkeitsbeziehung im Prozessmodell bezeichnet. Insgesamt lassen sich im Prozessmodell 25 verschiedene räumliche Abhängigkeitsbeziehungen darstellen.

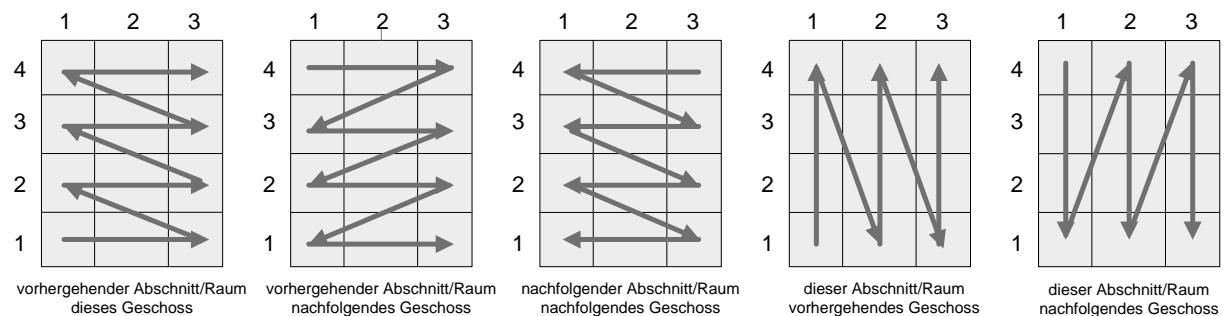


Abbildung 4.6: Alternative Fertigungsrichtungen

Abbildung 4.6 enthält als Beispiel fünf Fertigungsrichtungen die organisatorische Abhängigkeitsbeziehungen darstellen und durch räumliche Relationen beschrieben werden können. Die

Pfeile geben die Richtung vor, in der die Vorgänge innerhalb des Gebäudes ausgeführt werden. Insgesamt können anhand des Prozessmodells neun verschiedene Fertigungsrichtungen beschrieben werden.

Damit eine Voraussetzung erfüllt ist, muss das Ergebnis des Vorgangs, der die Voraussetzung repräsentiert, in einer Etage, einem Abschnitt oder in einem Raum an allen dort befindlichen Bauteilen eines Bauteiltyps abgeschlossen sein. So muss beispielsweise das Ergebnis „Decke betoniert“ in allen Abschnitten des Geschosses in dem eine Innenwand gemauert werden soll vorliegen, damit der Vorgang „Innenwand mauern“ ausgeführt werden kann. Soll eine Fertigungsrichtung definiert werden, so wird das Ergebnis des eigenen Vorgangs angegeben.

Als Beispiel werden in Tabelle 4.3 die bereits zuvor genannten drei Voraussetzungen des Vorgangs „Innenwand mauern“ in der Schreibweise des Prozessmodells dargestellt.

Tabelle 4.3: Drei Voraussetzungen des Vorgangs "Innenwand mauern"

Voraussetzung:	Erst Innenwände im 1. Abschnitt, dann im 2. Abschnitt etc.	Die Decke in diesem Geschoss muss betoniert sein.	Die Außenwände in diesem Geschoss müssen gemauert sein.
Voraussetzungstyp:	Fertigungsrichtung	Abhängigkeitsbeziehung	Abhängigkeitsbeziehung
Ergebnis:	Innenwand gemauert	Decke betoniert	Außenwand gemauert
Geschoss:	dieses Geschoss	dieses Geschoss	dieses Geschoss
Abschnitt/Raum:	vorhergehender Abschnitt/Raum	alle Abschnitte/Räume	alle Abschnitte/Räume
Anordnungs-Beziehung:	-	Ende-Anfang-Folge Zeitabstand: 2 Tage	Ende-Anfang-Folge Zeitabstand: 0 Stunden

Material

Materialien werden in diesem Prozessmodell für die Ausführung bestimmter Teilvergänge benötigt. Jedem Materialtyp wird eine Mengeneinheit (m^3 , m^2 , m, Stück oder kg) und eine Ladeeinheit (z. B. Palette oder Karton) zugewiesen. Die Mengeneinheit orientiert sich an der gebräuchlichen Abrechnungseinheit des Materials. Es wird zusätzlich definiert, wie viel Material eine Ladeeinheit enthält. Außerdem wird für das Material angegeben, ob ein einzelner

Arbeiter in der Lage ist, das Material zu transportieren und welche Menge er gegebenenfalls transportieren kann.

Ladeeinheit

Die Ladeeinheit fasst eine größere Materialmenge für den Transport zusammen. Ladeeinheiten können z. B. Paletten, Kartons und Betonkübel sein.

Betriebsmittel

Im Prozessmodell können die bei der Produktion benötigten Betriebsmittel von vordefinierten Betriebsmitteltypen abgeleitet werden. Jeder dieser Betriebsmitteltypen besitzt einen eigenen Parametersatz, dessen Werte sich zwischen Betriebsmitteln des gleichen Betriebsmitteltyps unterscheiden. Als Betriebsmitteltypen stehen zur Verfügung:

1. Gerüst/Schalung/Stützen
2. Personenaufzug
3. Materialaufzug
4. Gabelstapler
5. Hubwagen/Rollcontainer
6. stationärer Kran
7. mobiler Kran
8. Betonpumpe

Die Parameterwerte der jeweiligen Betriebsmitteltypen enthalten die für die Produktion benötigten Angaben, wie z. B. Geschwindigkeiten und Endladezeiten. Für bestimmte Betriebsmittel, wie z. B. den Kran, kann angegeben werden, welche und wie viele Ladeeinheiten er zeitgleich transportieren kann. Andere Betriebsmittel, wie Schalungen und Stützen, können einer Ladeeinheit zugewiesen werden, in der sie transportiert werden.

Gewerk

Mit dem Begriff „Gewerk“ werden alle Arbeiten zusammengefasst, die von einem spezialisierten Handwerksbetrieb ausgeführt werden. Die Ausführung einer Bauleistung in Form eines Vorgangs ist jeweils einem bestimmten Gewerk zugeordnet.

Arbeitsgruppe

Die Produktion am Gebäude wird von Arbeitsgruppen durchgeführt. Jeder Arbeitsgruppe lässt sich ein Gewerk zuweisen und sie besteht aus verschiedenen Arbeitsgruppenmitgliedern

(Vorarbeiter, Gesellen, Hilfsarbeiter). Einem Gewerk können mehrere Arbeitsgruppen zugeordnet werden, die ihre Arbeit zeitgleich an verschiedenen Stellen des Gebäudes ausführen.

4.3.3 Datenmodell

Die Daten des Prozessmodells werden in einer relationalen Datenbank verwaltet. In relationalen Datenbanken werden die Datensätze in Form von Zeileneinträgen in Tabellen gespeichert. Ein bewährtes Konzept für den Entwurf und die Darstellung von relationalen Datenstrukturen ist das Entity-Relationship Diagramm (E-R-Diagramm). Das Konzept des E-R-Diagramms wurde 1976 von *Peter Chen* (1976) veröffentlicht und in den folgenden Jahren von verschiedenen Wissenschaftlern weiterentwickelt.

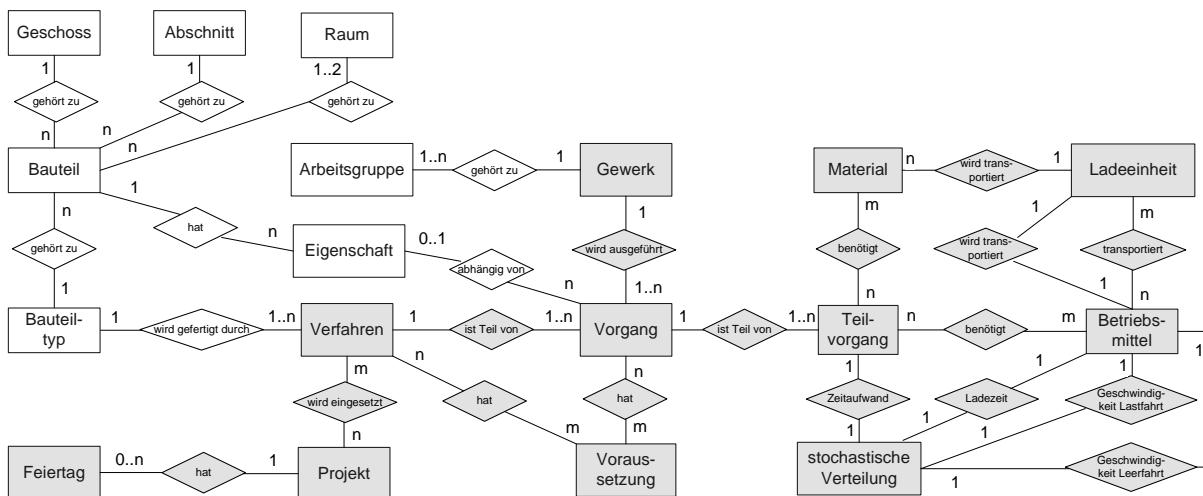


Abbildung 4.7: Entity-Relationship-Diagramm des Datenmodells

In Abbildung 4.7 wird das Datenmodell des Prozessmodells als E-R-Diagramm dargestellt. Das Diagramm besteht aus Entity-Typen und Relationship-Typen. Entity-Typen (symbolisiert durch die Rechtecke des Diagramms) beschreiben Objekte der realen Welt, die in ein Datenmodell überführt werden sollen (vgl. Stolzenberg 2002, S. 1 f.). In dem Diagramm werden außerdem die Verbindungen beschrieben, die zwischen den verschiedenen Entity-Typen des Datenmodells existieren. In Abbildung 4.7 werden diese Verbindungen durch Relationship-Typen realisiert, die sich in den Rauten des E-R-Diagramms wiederfinden.

Aus dem Entity-Relationship-Diagramm wird anschließend ein entsprechendes relationales Datenbank-Schema entwickelt. Ein relationales Datenbank-Schema besteht aus verschiedenen Relationenschemata. Ein Relationenschema ist folgendermaßen definiert (vgl. Stolzenberg 2003, S. 1 ff.):

$$R(A_1:D_1, A_2:D_2, \dots, A_n:D_n)$$

R bezeichnet den Namen des Relationenschemas, *A* einen Attributnamen und *D* den zugehörigen Domänenbereich des Attributs. Durch Attribute werden die Eigenschaften der Entities beschrieben, die als Daten in Verbindung mit den Entities gespeichert werden sollen. Unter einem Domänenbereich kann im Allgemeinen der Datentyp eines Attributs verstanden werden. Für jeden Entity-Typen des E-R-Diagramms wird im relationalen Datenbank-Schema ein Relationenschema angelegt. Für den Namen des Relationenschemas (*R*) kann der Name des Entity-Typen übernommen werden. Im Folgenden werden exemplarisch die Relationenschemata der Entity-Typen „**Teilvorgang**“ und „**Material**“ dargestellt:

Teilvorgang (*teilvorgang:string, teilvorgangs_id:string,*

tv_vg_id:string, vorgaenger:string, tv_vt_id:string)

Material (*materialname:string, material_id:string, mengeneinheit_material:integer,*

mt_ladeeinheit_id:string, menge_ladeeinheit:double, transport_moeglich:boolean, trans-

port_kap_person:double)

Die Primärschlüssel der Relationenschemata „**Teilvorgang**“ und „**Material**“ sind neben dem Namen des jeweiligen Relationenschemas fett gedruckt. Primärschlüssel dienen dazu, einen Tupel (Datensatz) eindeutig zu identifizieren. Tabelle 4.4 stellt eine relationale Datenbank dar, die auf Grundlage des Entity-Typen Material implementiert wurde. Die Spalten enthalten die einem Attribut zugeordneten Daten und die Zeilen jeweils ganze Tupel, die einen Materialtyp beschreiben. Das dem Datensatz „Beton“ zugehörige Tupel wurde exemplarisch farbig hervorgehoben. Das Attribut *material_id* ist in dieser Tabelle durch den kleinen weißen Schlüssel als Primärschlüssel der Datenbank-Tabelle gekennzeichnet. Die Attributwerte von Tupeln, die zu einem Primärschlüssel gehören, müssen in einer Tabelle einer Datenbank jeweils einzigartig sein, um alle Tupel voneinander unterscheiden zu können.

Tabelle 4.4: Relationale Datenbank-Tabelle mit verschiedenen Datenbankeinträgen (Tupeln)

materialname	material_id	mengeneinheit_material	mt_ladeeinheit_id	menge_ladeeinheit	transport_moeglich	transport_kap_person
Zement	{39DF523E}		4{B7E742AB-04C2}	50	False	0
Beton	{6850417B}		2{8D475BC6-F54A}	3,4	False	0
Hochlochhohlz	{ASD3A3342}		2{8F588FC9-4941}	1,2	True	0,2
Elektrokabel	{E042658E}		2{165DA820-B49D}	50	True	2
Stahl	{E9CC146D}		4{8F588FC9-4941}	150	True	5

Um einen Teilvorgang mit einem bestimmten Material zu verknüpfen, muss der Relationship-Typ „benötigt“ zwischen den beiden Entity-Typen mit einbezogen werden (siehe Abbildung 4.7). Die Kardinalität des Relationship-Typs „benötigt“ wird im E-R-Diagramm mit m:n angegeben. Die Kardinalität beschreibt die Anzahl an Beziehungen, die ein Entity zu Entities eines anderen Entity-Typen haben kann (*vgl. Stolzenberg 2002, S. 5*). Im vorliegenden Beispiel bedeutet das, dass ein Teilvorgang mit beliebig vielen Materialien und ein Material mit beliebig vielen Teilvorgängen verknüpft werden kann. Bei einer m:n-Beziehung ist es notwendig, für den Relationship-Typ ein eigenes Relationenschema anzulegen, welches die Primärschlüssel der zu verbindenden Relationenschemata enthält:

benötigt (**teilvorgangs_id:string, material_id:string**)

Bei einer 1:n-Beziehung ist es ausreichend, dass mit der Kardinalität n eingehende Relationenschema um einen Fremdschlüssel für den Primärschlüssel des jeweils anderen Relationenschemas zu erweitern. Deutlich wird dieses Vorgehen an dem Relationenschema „Material“. Dieses enthält das Attribut mt_ladeeinheit_id, dass den Primärschlüssel der Ladeeinheit enthält, mit der das Material transportiert werden kann. Der dunkle Schlüssel neben dem Attribut mt_ladeeinheit_id symbolisiert, dass es sich bei diesem Attribut um einen Fremdschlüssel für eine Relation zu einem anderen Entity handelt.

Aus dem relationalen Datenbank-Schema wurde die Datenbank für das Prozessmodell direkt implementiert. Die in Abbildung 4.7 grau hinterlegten Entities sind als Tabellen in einer MySQL-Datenbank enthalten. Die helleren Entities werden innerhalb der Zeichnungsdatei gespeichert.

4.4 CiSmo

Das Modellierungswerkzeug CiSmo (**CAD-integrierte Simulationsmodellierung für die Bauablaufsimulation im Hochbau**) wurde im Rahmen dieser Arbeit entworfen und als Prototyp implementiert.⁹ CiSmo ermöglicht die Entwicklung kompletter agentenbasierter Simulationsmodelle in der CAD-Umgebung Architecture von Autodesk. Architecture basiert auf dem CAD-Programm AutoCAD und wurde speziell für das Bauwesen entwickelt. Die Bauwerke werden innerhalb von Architecture in Form von bauteilorientierten 3-D-Gebäudemodellen dargestellt. Über ein im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes Menüsysteem wird innerhalb von

⁹ Teile des Textes in diesem Unterkapitel wurden bereits bei *Kugler et al. (2011, S. 159 ff.)* veröffentlicht.

Architecture der Zugriff auf Anwendungsoberflächen ermöglicht, die der Parametrisierung des zuvor beschriebenen Prozessmodells dienen. Außerdem ermöglicht CiSmo die für die Bauablaufsimulation benötigten Bauteilparameter automatisiert aus dem bauteilorientierten CAD-Modell auszulesen und in das Simulationsmodell zu übertragen. Die komplette Modellierung und Parametrisierung des Simulationsmodells findet im CAD-System statt. Das CAD-System wird dadurch zu einem Editor für Simulationsmodelle erweitert.

4.4.1 Softwarearchitektur des entwickelten Modellierungswerkzeugs

Die Struktur des Simulationssystems wird in Abbildung 4.8 in Form eines UML-Komponentendiagramms dargestellt. Komponentendiagramme werden vorwiegend für die Spezifikation von Softwarearchitekturen eingesetzt (*vgl. Kecher 2007, S. 145*). Die Komponenten des Diagramms symbolisieren die modularen Bestandteile des Simulationssystems, die ihr Inneres kapseln und über vordefinierte Schnittstellen miteinander kommunizieren.

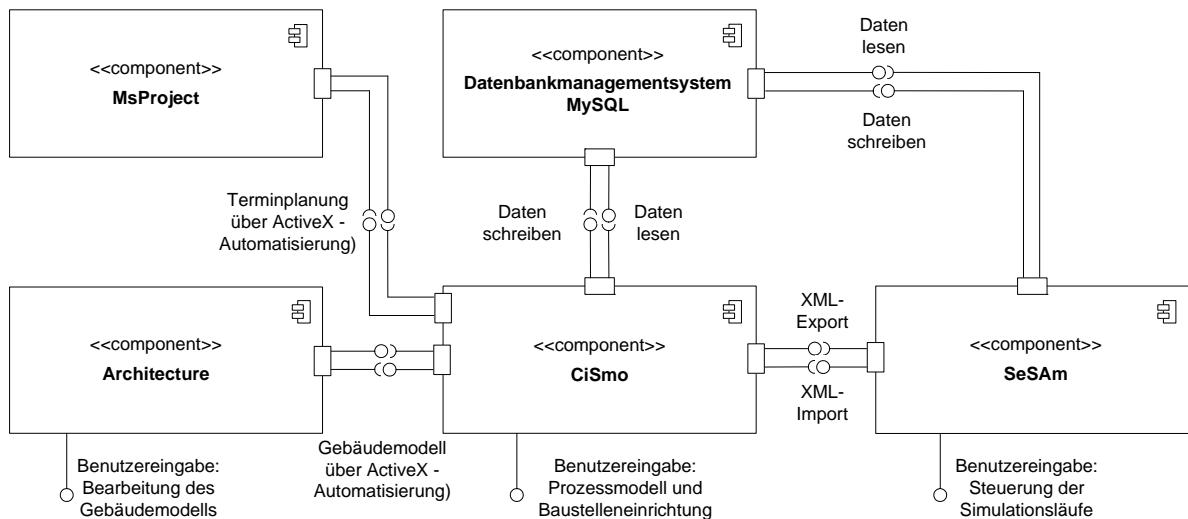


Abbildung 4.8: Komponentendiagramm des Simulationssystems (*Kugler et al. 2011, S. 160*)

Schnittstellen werden im Komponentendiagramm durch Kreise und Halbkreise (Ball- und Socket-Symbole) dargestellt, während die Komponenten selbst durch Rechtecke mit einem kleinen Komponenten-Symbol in der rechten oberen Ecke abgebildet werden.

Die Daten des Prozessmodells werden separat in einer MySQL-Datenbank gespeichert und nicht in das CAD-Modell integriert. Die Speicherung der Prozessdaten in einer externen Datenbank hat den Vorteil, dass diese Daten mit allen gängigen 3-D-Gebäudemodellen verbunden werden können, ohne auf ein gemeinsames CAD-Format oder bestimmte Schnittstellenstandards angewiesen zu sein. Gleichzeitig können das Gebäude- und das Prozessmodell völ-

lig unabhängig voneinander bearbeitet werden. Durch die getrennte Speicherung können die Daten des Prozessmodells außerdem für neue Projekte wiederverwendet werden.

Die Durchführung der Experimente geschieht in der agentenbasierten Simulationsumgebung SeSAM (**S**hell for **S**imulated **A**gent **S**ystems, siehe Kapitel 5.2.2). Die Agenten des Simulationsmodells greifen über eine SQL-Schnittstelle zur Laufzeit des Simulationsmodells direkt auf die MySQL-Datenbank zu und haben dadurch Zugang zu dem Wissen, das sie für die Ausführung der Arbeitsvorgänge benötigen (*vgl. Kugler und Franz 2009, S. 191*). Für die Simulation stehen dadurch immer die aktuellsten Daten zur Verfügung.

Das Simulationsmodell wird in dem offenen Datenformat XML gespeichert. Dadurch können die Bauteilparameter und die Baustelleneinrichtungselemente aus dem Gebäudemodell direkt in die XML-basierte Datenstruktur des Simulationsmodells integriert werden.

Die Bearbeitung des Simulationsmodells im CAD-System hat den Vorteil, dass sich eine weitere Schnittstelle in der Simulationsumgebung erübriggt. Gleichzeitig entfallen die mit einer Schnittstelle einhergehenden Probleme wie z. B. Versionsinkompatibilitäten, beiderseitiges Upgrade auf neue Versionen der Schnittstelle und Interpretationsfehler. Der Anwender muss sich außerdem nicht mit einer zusätzlichen Modellierungsumgebung vertraut machen und er kann auf anwenderfreundliche Anwendungsfenster für die Entwicklung des Simulationsmodells zurückgreifen. Die Simulationsumgebung wird nur noch als Laufzeitumgebung für die Simulation verwendet. Dieses Konzept lässt sich ohne Weiteres aber nur für Simulationsumgebungen umsetzen, deren Simulationsmodelle in einem offen zugänglichen Format, wie beispielsweise XML, gespeichert werden.

Als Ergebnisse der Simulationsläufe und zur Prüfung der Konsistenz des Prozessmodells ermöglicht CiSmo die Erstellung von Terminplänen. CiSmo verwendet die Struktur des Gebäudemodells, das Prozessmodell und die vorgegebenen Bauabschnitte aus der Baustelleneinrichtung, um automatisch Terminpläne zu generieren. Anhand dieser Terminpläne kann der Anwender die abstrakt in Form von Voraussetzungen erfolgte Definition der Sequenzierung der Vorgänge überprüfen, bevor Simulationsläufe durchgeführt werden.

Die Ergebnisse der Simulationsläufe werden aus SeSAM heraus in einer eigenen MySQL-Datenbank gespeichert. Über CiSmo werden diese Ergebnisse in Form eines Terminplans aufgearbeitet. Die automatische Generierung der Terminpläne ist Teil einer weiteren Arbeit und wird deshalb an dieser Stelle nicht vertieft.

4.4.2 Programmablauf und Anwendungsoberflächen

Der Programmablauf wird anhand einiger ausgewählter Anwendungsoberflächen beschrieben. Für eine ausführliche Beschreibung aller Anwendungsoberflächen wird auf *Kugler et al. (2011)* verwiesen.

Das für Architecture entwickelte Menüsystem von CiSmo wurde in die obere Menüleiste des CAD-Programms integriert. Der zusätzliche Menüpunkt trägt den Namen „Simulation“ und öffnet ein Dropdown-Menü über das sich die Anwendungsfenster von CiSmo öffnen lassen (siehe Abbildung 4.9). Das Dropdown-Menü ist so angelegt, dass die Menüpunkte von oben nach unten dem Standard-Programmablauf folgen (siehe Abbildung 4.10).



Abbildung 4.9: Menüleiste von Architecture mit dem zusätzlichen Menüpunkt „Simulation“

(*Kugler et al. 2011, S. 166*)

Zunächst wird eine 3-D-Zeichnungsdatei des Bauprojektes über die von Architecture bereitgestellten Menüpunkte (Datei → öffnen) geladen. Diese Zeichnungsdatei muss alle Bauteile des Gebäudes enthalten, deren Bau simuliert werden soll. Als Standard-Datenformat wird in Architecture das dwg (**Drawing**)-Format verwendet. Das dwg-Format ist ein proprietäres Datenformat, d.h. dass die Dokumentation der Dateistruktur von Autodesk nicht freigegeben ist.

In dem UML-Ablaufdiagramm in Abbildung 4.10 wird der Datenzugriff durch Ein- und Ausgabeparameter in Form von Objektknoten dargestellt, die als Rechtecke am Rand der Aktivitätsknoten angebracht sind.

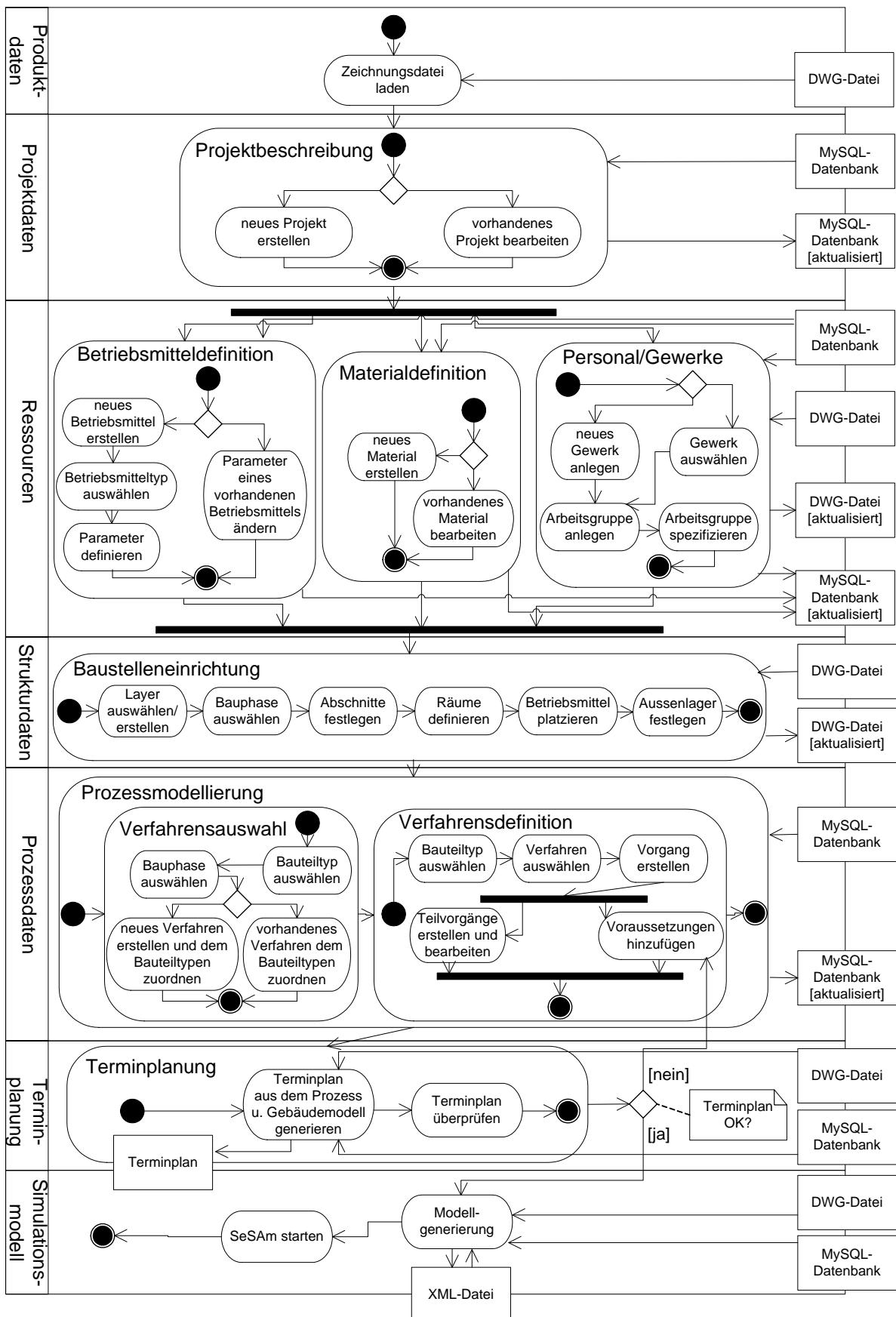


Abbildung 4.10: UML-Aktivitätsdiagramm des Programmablaufs (Kugler et al. 2011, S. 167)

Der nächste Arbeitsschritt besteht in der Definition der allgemeinen Projektparameter. Diese erfolgt über die Anwendungsoberfläche „Projektbeschreibung“, die über das Drop-down Menü von CiSmo gestartet werden kann. Die Anwendungsoberfläche ermöglicht es, zunächst ein neues Projekt anzulegen oder alternativ ein bestehendes Projekt zur Bearbeitung auszuwählen (siehe Abbildung 4.11).

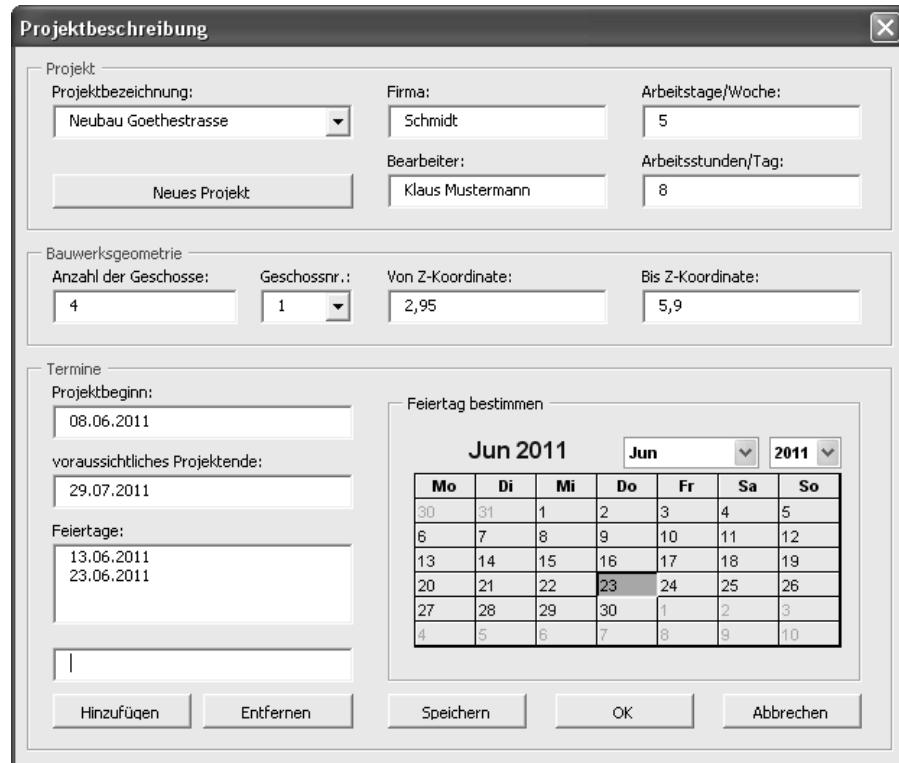


Abbildung 4.11: Anwendungsoberfläche der Projektbeschreibung (Kugler et al. 2011, S. 168)

Nach der Definition der Projektparameter erfolgt die Beschreibung der für den Bauprozess notwendigen Ressourcen. Dazu zählen die Betriebsmittel, die Materialien und die Arbeitskräfte.

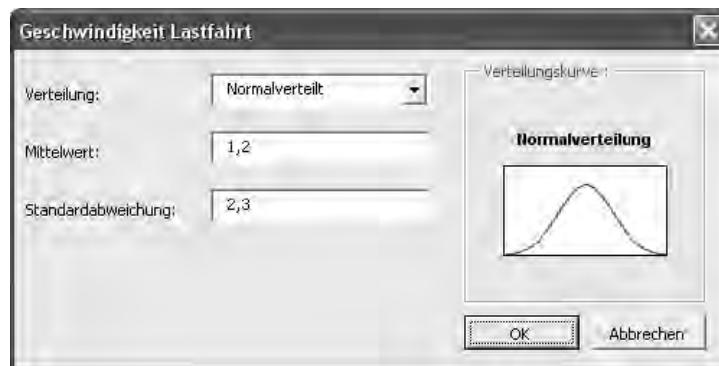


Abbildung 4.12: Anwendungsoberfläche für die Definition eines stochastischen Wertebereichs

Für jeden Ressourcentyp existiert eine eigene Anwendungsoberfläche, die über das Menü von CiSmo aufgerufen werden kann und in denen die Parameter der jeweiligen Ressourcen definiert werden. Für einige Parameter besteht die Möglichkeit, stochastische Wertebereiche in einer separaten Anwendungsoberfläche zu definieren (siehe Abbildung 4.12).

Die Baustelleneinrichtungsplanung wird nach der Definition der für den Bauprozess notwendigen Ressourcen durchgeführt. Die Baustelleneinrichtungselemente werden direkt in die Zeichnungsdatei auf einem eigenen Layer eingezeichnet (siehe Abbildung 4.13). Für die Rohbauphase können geschossübergreifende Bauabschnitte in die dwg-Datei eingezeichnet werden. Für die Ausbauphase werden die Räume im Gebäudemodell automatisch erkannt und nummeriert. Danach können die stationären Betriebsmittel (wie Krane, Aufzüge etc.) im Gebäudemodell manuell platziert werden. Abschließend wird ein Außenlager definiert, das als Schnittstelle für den Eintritt der Materialien in das Simulationsmodell verwendet wird.

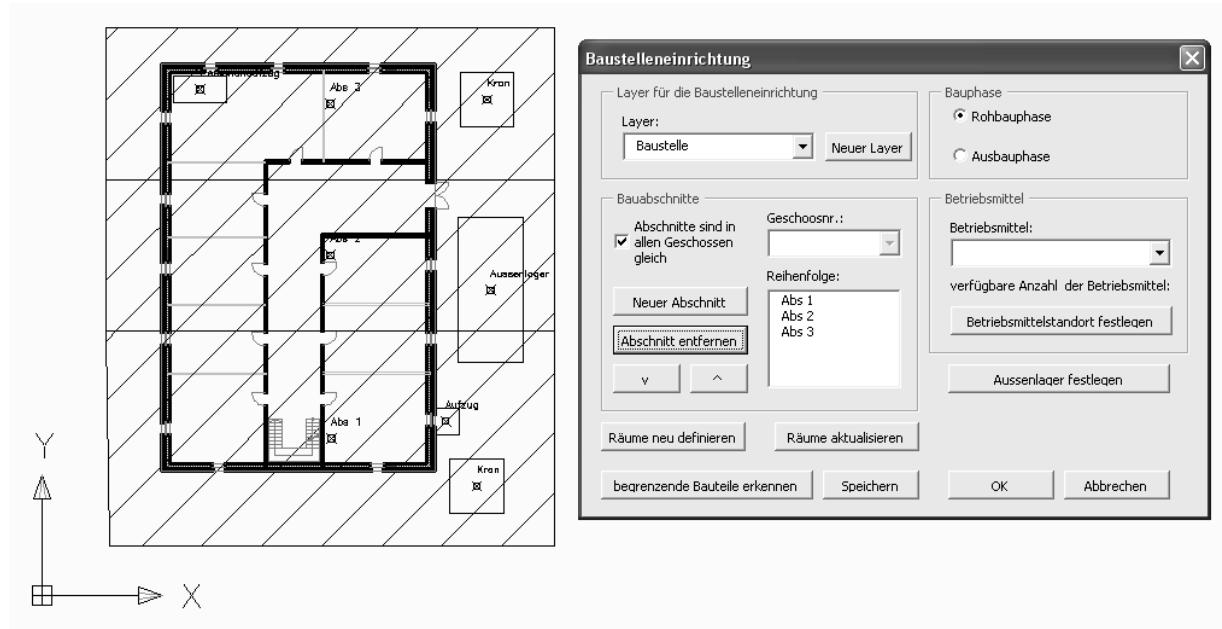


Abbildung 4.13: Zeichnungsdatei mit den Baustelleneinrichtungselementen und Anwendungsoberfläche zur Baustelleneinrichtung (Kugler et al. 2011, S. 172)

Die für die Prozessmodellierung der Abläufe notwendigen Daten werden in den Anwendungsoberflächen „Verfahrensauswahl“ und „Verfahrensdefinition“ erfasst. In dem Anwendungsfenster zur Verfahrensauswahl wird zunächst eine Grobdefinition des Bauprozesses durchgeführt, indem den Bauteiltypen des Gebäudemodells Bauverfahren zugewiesen werden (siehe Abbildung 4.14). Der Anwender hat die Möglichkeit, neue Verfahren selbst anzulegen oder bereits bestehende Verfahren für den Bauteiltypen aus der Datenbank auszuwählen.

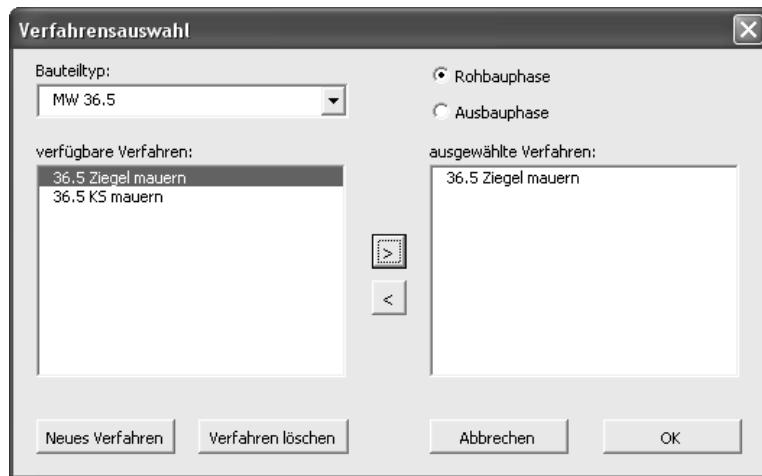


Abbildung 4.14: Anwendungsoberfläche zur Verfahrensauswahl (Kugler et al. 2011, S. 173)

Nach der Zuweisung der Verfahren zu den Bauteiltypen, werden die einzelnen Vorgänge des Verfahrens in der Anwendungsoberfläche „Verfahrensdefinition“ im Detail ausgearbeitet. Die Vorgänge werden im Wesentlichen durch ihre Voraussetzungen und ihre Teilvergänge definiert. Anhand der Voraussetzungen wird festgelegt, in welcher Reihenfolge die Vorgänge ausgeführt werden. Dies geschieht, indem die technischen und organisatorischen Abhängigkeitsbeziehungen zwischen den Vorgängen definiert werden. Den Teilvergängen können in einem separaten Anwendungsfenster der Arbeitszeitaufwand und die benötigten Materialien und Ressourcen zugewiesen werden.

Die im Zuge der Prozessmodellierung gespeicherten Informationen werden im Folgenden für die automatische Generierung eines Terminplans verwendet. Die Daten des Prozessmodells werden zu diesem Zweck mit den Daten des Gebäudemodells und den Daten aus der Baustelleneinrichtung kombiniert, so dass ein Terminplan entsteht, der die technischen und die organisatorischen Abhängigkeitsbeziehungen, die Gebäudestruktur, die Bauabschnitte und die zur Verfügung stehenden Ressourcen berücksichtigt. Anhand des Terminplans kann der Anwender die zuvor eher abstrakt definierten Voraussetzungen überprüfen und gegebenenfalls verändern. Die automatische Terminplanung wird im Rahmen einer weitergehenden Arbeit behandelt und daher in der vorliegenden Arbeit nicht detailliert beschrieben.

Im letzten Anwendungsfenster erfolgt schließlich die automatische Modellgenerierung des Simulationsmodells. In der verwendeten agentenbasierten Simulationsumgebung SeSAM setzen sich die Simulationsmodelle aus drei verschiedenen Modellierungselementen zusammen. „*Passive Bestandteile des Modells werden als Ressourcen (Resources) modelliert, aktive Be-*

standteile als Agenten (Agents) und übergeordnetes Systemverhalten wird in die Umwelt (World) des Modells integriert. Zusätzlich lassen sich Ausgangszenarien (Situations) für Simulationsläufe definieren, in denen die Ressourcen und die Agenten räumlich angeordnet werden können“ (Kugler und Franz 2010, S. 153). Da das Modell in dem Datenformat XML vorliegt, kann CiSmo auf die komplette Modellstruktur zugreifen. Die Agenten und Ressourcen des Simulationsmodells werden von vordefinierten Agenten- und Ressourcentypen instanziert und von CiSmo parametrisiert. Als Agenten werden in dem Modell die Arbeitsgruppen und die selbst aktiven Betriebsmittel dargestellt. Als Ressourcen werden die Gebäudestruktur (in Form der Bauteile, der Abschnitte, der Geschosse und der Räume), die passiven Betriebsmittel und die Materialien in das Modell integriert.

Alle Elemente des Gebäudes werden mit den Betriebsmitteln, den Arbeitskräften und den Materialien in ein neues Ausgangsszenario (Situation) übertragen. Da die Simulationsumgebung SeSAM nur über eine 2-D-Visualisierung verfügt, wird das Gebäude von CiSmo in eine 2-D-Struktur umgewandelt, in dem alle Geschosse nebeneinander in der Situation platziert werden.

4.5 Technologische Umsetzung der Modellierungsumgebung

4.5.1 VBA

Die zusätzlichen Anwendungsfenster und das Menüsystem im CAD-System wurden mit der VBA-IDE (Visual Basic for Applications – Integrated Development Environment) von Architecture implementiert (vgl. Suthpin 2005, S. 1).¹⁰ VBA stellt eine von der Programmiersprache Visual Basic (VB) abgeleitete Makrosprache dar, die am häufigsten für die Automatisierung von Abläufen in den Microsoft-Office-Anwendungen eingesetzt wird. VBA ist keine eigenständige Entwicklungsumgebung, sondern immer in ein Wirtsprogramm integriert.

VBA wurde als Programmiersprache ausgewählt, da sie gegenüber anderen Programmierschnittstellen für Architecture – wie ObjectARX und AutoLISP – die Vorteile einer höheren Geschwindigkeit bei der Programmausführung, einer hohen Benutzerfreundlichkeit, der Kompatibilität mit Windows und anderen Microsoft Anwendungen (z. B. MS Office) und der Möglichkeit einer schnellen Prototypenerstellung bietet (AutoCAD 2009). Unter Verwendung der ActiveX Automation ist es in VBA möglich, auf die Eigenschaften und Methoden der

¹⁰ Teile des Textes in diesem Unterkapitel wurde bereits bei Kugler und Franz (2008, S. 157) und bei Kugler et al. (2011, S. 162 ff.) veröffentlicht.

Elemente einer Architecture Zeichnung zuzugreifen. Bei der ActiveX Automation handelt es sich um eine von Microsoft entwickelte Technologie, welche eine standardisierte Kommunikation zwischen verschiedenen Programmen ermöglicht. Dadurch können die Inhalte eines in einem Programm geöffneten Dokuments und bestimmte Funktionen des Programms für externe Anwendungen nutzbar gemacht werden. Das Programm, das die Inhalte bereitstellt, wird als Automation-Server bezeichnet, während das Programm, das die Inhalte nutzt, den Automation-Client darstellt. Um die Funktionen einer Anwendung nutzen zu können, muss die Anwendung, die als Automation-Server fungiert, im Hintergrund laufen, da der Automation-Client nur über die ActiveX Schnittstelle auf die Funktionen der Server-Anwendung zugreift und kein eigenes Wissen über die Funktionsweise des Programms besitzt (*vgl. Rudolph 2000, S. XXIVf.*).

Dass im Rahmen dieser Arbeit implementierte prototypische Programm CiSmo kann daher als Automation-Client nur auf die Objekte und Funktionen von dem Automation-Server Architecture zugreifen, wenn dieser ebenfalls ausgeführt wird. Auf die gleiche Weise ist es möglich, MS-Project mit in die Anwendung einzubinden.

Datenhaltung innerhalb der Zeichnungsdatei

In einer Architecture- oder AutoCAD-Zeichnungsdatei wird grundsätzlich zwischen graphischen (Entities) und nicht graphischen Elementen (Objects) unterschieden. Jeder Entity-Instanz können in Architecture eigene erweiterte Daten zugewiesen werden.

Außerdem können für eine Zeichnungsdatei xRecord-Objekte erzeugt werden. In xRecord-Objekten können beliebige Daten gespeichert und verwaltet werden. Beispielsweise können in xRecord-Objekten Verweise auf andere Zeichnungsobjekte hinterlegt werden. Die xRecords werden in einem Dictionary-Objekt verwaltet. Ein Dictionary-Objekt besitzt ähnliche Eigenschaften wie eine VBA-Collection, d.h. dass ein solches Dictionary-Objekt beliebige andere Objekttypen enthalten kann. Die Daten oder Objekte, die ein Dictionary enthält, werden persistent in der Zeichnungsdatei gespeichert (*AutoCAD 2009*).

Die Nutzung dieser Technologie erlaubt es, einzelnen graphischen Elementen der Zeichnung zusätzliche Attribute hinzuzufügen. Gleichzeitig können Informationen, die das gesamte Projekt betreffen, in einem Dictionary hinterlegt werden. Auf diese Weise kann die Zeichnungsdatei für die persistente Speicherung von projektspezifischen Daten verwendet werden (*Kugler und Franz 2008, S. 157*).

Die Attribute, der in Abbildung 4.7 hell hinterlegten Entities, können auf diese Weise in die Zeichnungsdatei integriert werden. So kann beispielsweise für einen Abschnitt, der direkt in die Zeichnungsdatei eingezeichnet wurde, ein zusätzliches Attribut wie die Abschnittsnummer, gespeichert werden.

4.5.2 Programmstruktur und interner Programmablauf

Die in VBA programmierte Anwendung CiSmo setzt sich aus Formularen, Modulen und Klassenmodulen zusammen. Die Formulare beschreiben den visuellen Aufbau der Anwendungsoberflächen und die Behandlung der Ereignisse, wenn bestimmte Elemente der Anwendungsoberfläche (wie Schalter, Auswahllisten etc.) bedient werden. Die in Tabelle 4.5 aufgelisteten Formulare entsprechen den zuvor beschriebenen Anwendungsoberflächen von CiSmo.

In den Modulen werden die Prozeduren beschrieben, die beim Eintritt eines Ereignisses ausgeführt werden. Dazu zählt insbesondere die Steuerung des Datenzugriffs auf die SQL-Datenbank, auf die Zeichnungselemente und auf die XML-Datei des Simulationsmodells. Die Daten werden zur Laufzeit der Anwendungsoberflächen objektorientiert gehalten. In den Prozeduren werden daher Objekte erzeugt, die auf der Grundlage von „Bauplänen“ erstellt werden, die in den Klassenmodulen beschrieben werden. Tabelle 4.5 enthält eine Auflistung aller Formulare, Module und Klassenmodule von CiSmo.

Tabelle 4.5: Formulare, Module und Klassenmodule von CiSmo

Formulare	Modules		Klassenmodule	
frm1_Projektbeschreibung	ModAPIOpen	ModSQLProjekt	ClsAbschnitte	ClsRaum
frm2_1_Betriebsmittel	ModAPISave	ModSQLTeilvorgang	ClsArbeitsgruppe	ClsRaumVerfahren
frm2_2_Neues_Betriebsmittel	ModDBFunctions	ModSQLVerfahren	ClsBauteil	ClsStandort
frm2_3_Neue_Ladeeinheit	ModDrawingFunctions	ModSQLVerfahrenRaum	ClsBauteiltyp	ClsTeilvorgang
frm3_Materialdefinition	ModMacros	ModSQLVerteilung	ClsBetriebsmittel	ClsTvBetriebsmittel
frm4_Personal_Gewerke	ModMenu	ModSQLVorgang	ClsEigenschaft	ClsTvMaterial
frm5_Baustelleneinrichtung	ModPropSets	ModXDataAbschnitte	ClsGeschoss	ClsVerfahren
frm6_Verfahrensauswahl	ModPublicVariables	ModXDataBauteile	ClsGewerk	ClsVerteilung
frm7_1_Verfahrensdefinition	ModSQLBauteiltyp	ModXDataGeschosse	ClsKoordinaten	ClsVfProjekt
frm7_2_Teilvorgaenge	ModSQLBetriebsmittel	ModXDataGewerke	ClsLadeeinheit	ClsVoraussetzung
frm7_3_Verteilung	ModSQLEigenschaft	ModXDataLagerplaetze	ClsLager	ClsVorgang
frm8_Terminplanung	ModSQLGewerk	ModXDataRaeume	ClsMaterial	ClsXMLBodyvariable
frm9_3_Modellgenerierung	ModSQLGewerk	ModXDataStandorte	ClsProjekt	
	ModSQLLadeeinheit	ModXMLSituation		
	ModSQLMaterial			

Projektabhängige Daten werden direkt in der Zeichnungsdatei gespeichert, um sie mit dem Gebäudemodell zusammen verfügbar zu haben. Unterschieden wird hierbei zwischen bauteil-abhängigen Daten, die direkt in Verbindung mit den Bauteilen gespeichert werden (wie z. B. die Eigenschaften) und allgemeinen Projektdaten, die in sogenannten „Dictionary-Objekten“ der Zeichnungsdatei abgelegt werden. Eine Beschreibung der notwendigen Technologien wird in Unterkapitel 4.5.1 durchgeführt. Die projektunabhängigen Daten des Prozessmodells werden in einer gesonderten MySQL-Datenbank gespeichert, um sie für neue Projekte wieder verwenden zu können. Die notwendige Technologie wird in Unterkapitel 4.5.2 beschrieben. Die Module in Tabelle 4.5, die mit der Vorsilbe „ModSQL“ beginnen, dienen dem Lesen und der Speicherung in der Datenbank, während durch die Module mit der Vorsilbe „ModXData“ Daten in der Zeichnungsdatei gelesen und gespeichert werden.

Werden Daten geladen oder neu erstellt, so werden unter Verwendung der Klassenmodule neue Datenobjekte erzeugt. Diese Datenobjekte werden zur Laufzeit der Anwendung in einem Collection-Objekt gespeichert. Collection-Objekte können Sammlungen von Objekten enthalten, auf die über das Collection-Objekt zugegriffen werden kann. Über die Anwendungsoberfläche lassen sich die Datenobjekte in den Collections bearbeiten, neu erzeugen oder löschen.

Der Vorteil dieses Programmaufbaus besteht darin, dass die Anwendungsoberflächen und deren Funktionen vollkommen unabhängig von der Datenhaltung sind, da sie nur Objekte manipulieren. Ein Wechsel des Datenbankmanagementsystems ist dadurch mit geringem Aufwand möglich.

Die Aufteilung zwischen der Gestaltung der Anwendungsoberflächen in den Formularen, der Steuerung des Datenzugriffs durch die Prozeduren in den Standardmodulen und durch die Generierung von Objekten aus den Klassenmodulen, ist bei allen Anwendungsoberflächen bewusst einheitlich strukturiert, um eine Wartung und Weiterentwicklung des Programms zu vereinfachen. Als Beispiel für diese Struktur werden im Folgenden die Module beschrieben, die an der Speicherung der Projektdaten beteiligt sind. In Abbildung 4.15 werden im Überblick die Abläufe dargestellt, die während der Bearbeitung der Projektdaten stattfinden.

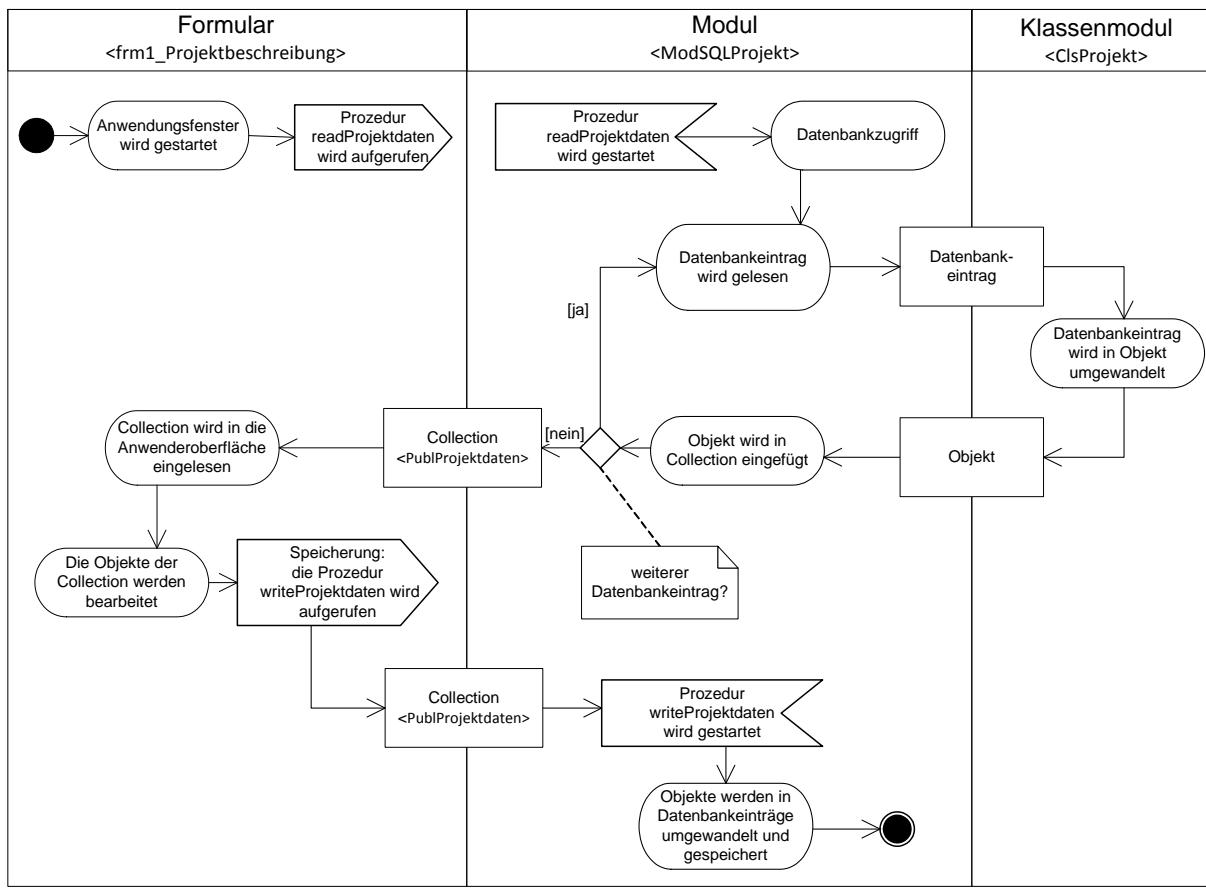


Abbildung 4.15: UML-Aktivitätsdiagramm der Abläufe während der Datenmanipulation

Beim Öffnen der Anwendungsoberfläche „frm1_Projektbeschreibung“ wird automatisch die Prozedur „readProjektdaten“ aus dem Modul „ModSQLProjekt“ aufgerufen. In dem Modul „ModSQLProjekt“ sind zwei Prozeduren enthalten, die die Projektdaten aus der Datenbank auslesen, in Objekte umwandeln und in eine Collection einfügen (readProjektdaten) und die die Objekte zum Speichern wieder in Datenbanksätze umwandeln (writeProjektdaten) (siehe Abbildung 4.16).

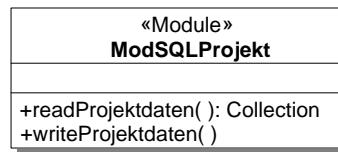
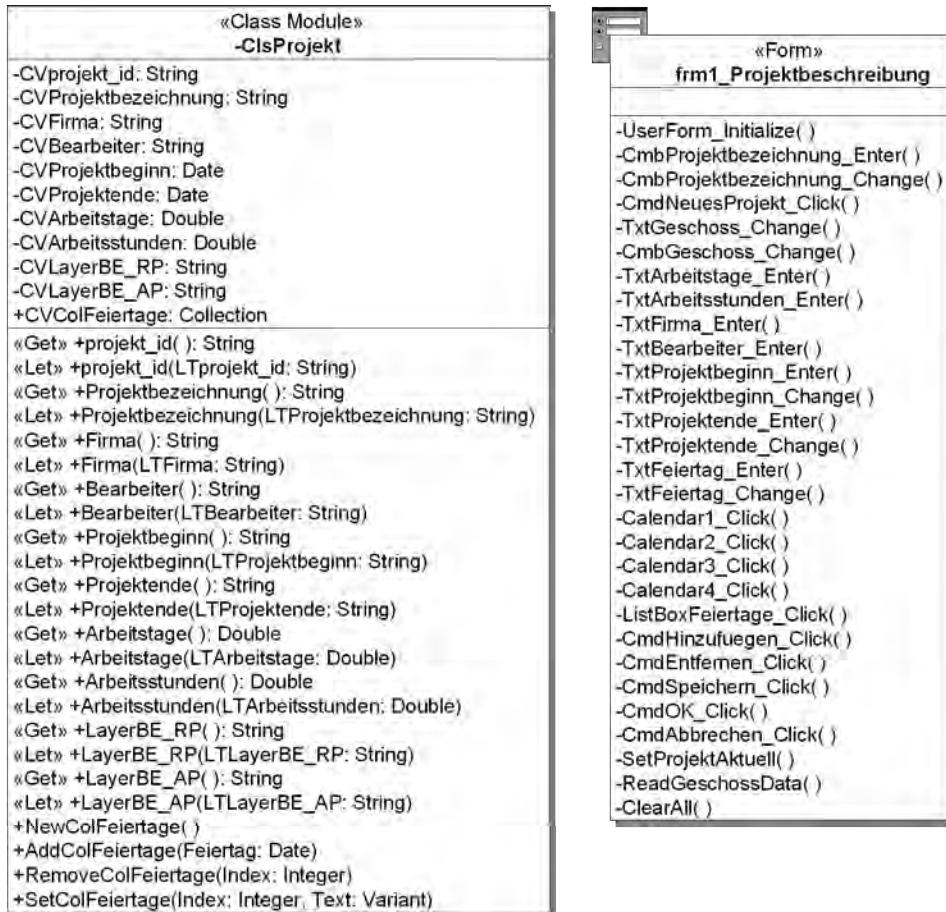


Abbildung 4.16: Klassendiagramm des Moduls ModSQLProjekt

Die Objekte werden auf der Grundlage des Klassenmoduls „ClsProjekt“ erstellt, in dem alle Variablen und Prozeduren beschrieben werden, die die Objekte des Typs „ClsProjekt“ besitzen (siehe Abbildung 4.17).



**Abbildung 4.17: UML-Klassendiagramm des Klassenmoduls ClsProjekt und des Formulars
frm1_Projektbeschreibung**

Die Variablen werden im Klassendiagramm unterhalb des Klassennamens aufgelistet. Im vorliegenden Projekt beginnen sie alle mit dem Kürzel „CV“ (Class Variable). Im Kasten unterhalb der Klassenvariablen werden die Prozeduren aufgelistet, die hauptsächlich der Manipulation der Klassenvariablen dienen. Außerdem enthält das Klassenmodul „ClsProjekt“ die Collection „CVColFeiertage“, in der eine Sammlung von Feiertagen angelegt werden kann, die dem Projekt zugeordnet sind. Mit den Prozeduren „NewColFeiertage“, „AddCollFeiertage“, „RemoveColFeiertage“ und „SetColFeiertage“ kann auf diese Collection zugegriffen werden.

Die aus der Datenbank ausgelesenen Objekte werden in das Collection-Objekt „PublProjektdaten“ eingefügt. Die Objekte in diesem Collection-Objekt können von der Anwendungsoberfläche „frm1_Projektbeschreibung“ direkt manipuliert werden. Die Manipulation der Daten erfolgt dort über Eingabefelder, Listen und Schalter, mit denen konkrete Ereignisprozeduren verknüpft sind. Diese Prozeduren sind in Abbildung 4.17 im rechten Klassendiagramm „frm1_Projektbeschreibung“ dargestellt. Die Prozedur „CmdSpeichern“ behandelt

zum Beispiel das Ereignis, das ausgeführt wird, wenn die „Speichern“-Schaltfläche des Formulars betätigt wird.

Eine Ausnahme von der zuvor beschriebenen Struktur bildet das Formular und das Modul zur Generierung des Simulationsmodells. In dem Formular zur Modellgenerierung werden zunächst alle erfassten projektrelevanten Daten aus der Datenbank und der Zeichnungsdatei ausgelesen und in Collections gespeichert (wie z. B. Bauteile, Abschnitte, Geschosse, Räume, Projektdaten, Betriebsmittel und deren Standorte). Danach werden der Reihe nach Prozeduren gestartet, die diese Daten in die XML-Datei des Simulationsmodells übertragen. Die benötigten Prozeduren sind alle in dem Modul „ModXMLSituation“ enthalten.

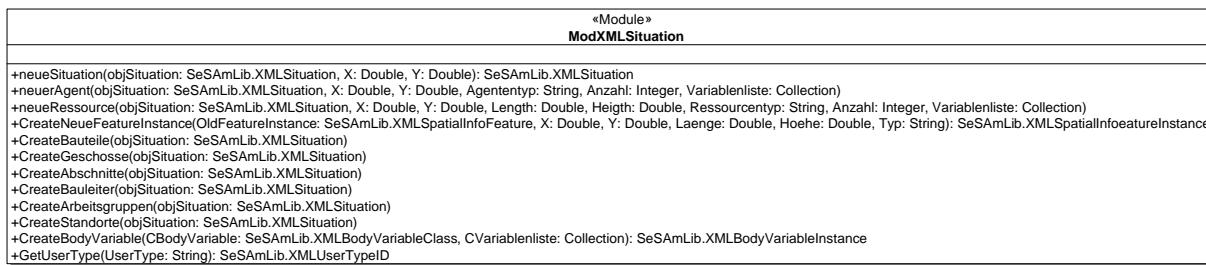


Abbildung 4.18: UML-Klassendiagramm des Moduls ModXMLSituation mit den enthaltenen Prozeduren

Das Klassendiagramm in Abbildung 4.18 gibt einen Überblick über die implementierten Prozeduren des Moduls. Zunächst wird während der Modellgenerierung eine neue „Situation“ (Ausgangsszenario für einen Simulationslauf, siehe dazu auch Unterkapitel 4.4.2) erzeugt. Die Situation wird in ein Objekt eingefügt, dass die komplette Struktur des Simulationsmodells mit allen verfügbaren Agenten- und Ressourcentypen enthält („PublModell“).

Die Situation enthält die Umwelt der Simulation, die insbesondere die Ausdehnung der Simulationskarte vorgibt. Die Ausdehnung wird der Prozedur „neueSituation“ in Form von Längenangaben (Übergabeparameter X und Y) übermittelt. Außerdem berücksichtigt die erzeugte Situation die Anzahl der Geschosse, die in der 2-D-Karte der Situation parallel nebeneinander angeordnet werden. In die Situation werden in den folgenden Prozeduren alle Agenten und Ressourcen eingefügt, die für die Simulation benötigt werden. Die Agenten und Ressourcen werden dabei von den Agenten- und Ressourcentypen instanziert, die in dem übergeordneten Objekt „PublModell“ enthalten sind.

Neue Agenten werden unter Verwendung der Prozedur „neuerAgent“ und neue Ressourcen mit der Prozedur „neueRessource“ erstellt. Diese beiden Prozeduren sind nicht weiter spezia-

lisiert und können Agenten und Ressourcen beliebigen Typs erzeugen. Den Prozeduren werden daher bei ihrem Aufruf Informationen über die Koordinaten, die Länge und Höhe der Agenten und Ressourcen, der Agenten- oder Ressourcentyp, die zu erzeugende Anzahl und eine Collection der zu setzenden Variablen mit übergeben.

Die Prozedur „CreateBauteile“ verwendet beispielsweise die Prozedur „neueRessource“ durch die sie für alle Bauteile, die in der Collection „PublBauteile“ enthalten sind eine eigene Ressource im Simulationsmodell erstellt. Für die Prozedur wird bei ihrem Start als Übergabeparameter die Situation als Objekt angegeben, in die die Ressourcen eingefügt werden sollen. Die Bauteil-Ressource besitzt im Simulationsmodell eine Reihe von Variablen, wie z. B. den Bauteiltyp, das Geschoss und den Abschnitt, in dem sich das Bauteil befindet. Die Werte für diese Variablen werden der Prozedur „neueRessource“ in Form einer Collection übergeben.

In ähnlicher Weise verwendet die Prozedur „CreateArbeitsgruppen“ die Prozedur „neuerAgent“, um die Arbeitsgruppen in das Simulationsmodell einzufügen.

Die Situation, die Agenten und die Ressourcen werden zunächst als Objekte erzeugt, die auf der Grundlage von Klassenmodulen aus der Dynamic Link Library (dll) „SeSAMlib“ gebildet werden. Die Objekte werden danach durch die Funktion „ToXmlFile“, die ebenfalls in dieser Bibliothek enthalten ist, in XML-Code übertragen und gespeichert. Die Bibliothek „SeSAMlib“ wurde durch die Databinding-Technologie erzeugt, die in Unterkapitel 4.5.4 beschrieben wird.

4.5.3 MySQL

Die Speicherung der in Abbildung 4.7 grau hinterlegten Entities geschieht in einer externen MySQL-Datenbank.¹¹ Daten, die für mehrere Projekte verwendet werden können, wie z. B. Informationen über die zur Verfügung stehenden Betriebsmittel, verschiedene Bauverfahren und die zugehörigen Vorgänge und Ressourcen, können so projektunabhängig außerhalb der Zeichnungsdatei gespeichert werden.

MySQL ist ein relationales Datenbankverwaltungssystem, das von der Firma Sun Microsystems weiterentwickelt wird. MySQL steht unter der GNU General Public License (GPL). Das bedeutet, dass MySQL kostenfrei verwendet und den eigenen Bedürfnissen angepasst werden

¹¹ Teile des Textes in diesem Unterkapitel wurden bereits bei *Kugler et al. (2011, S. 163 f.)* veröffentlicht.

kann, weshalb dieses Datenbanksystem für den Einsatz bei prototypischen Implementierungen sehr geeignet ist. Datenbankabfragen, Datenmanipulationen und das Anlegen neuer Datenbanken und Tabellen erfolgt in MySQL mit der Datenbanksprache SQL (Structured Query Language). SQL ist eine von ANSI¹² und ISO¹³ standardisierte Datenbanksprache, die von den meisten Datenbanksystemen unterstützt wird.

Die Abfrage und Manipulation der Daten aus dem CAD-System heraus geschieht über die von Microsoft entwickelte ActiveX Data Objects (ADO)-Schnittstelle (*Microsoft 2010*). Unter Verwendung dieser Schnittstelle können über die VBA-Entwicklungsumgebung von Architecture aus Datenbankabfragen und Datenmanipulationen in der MySQL-Datenbank durchgeführt werden.

Für die Herstellung der Verbindung werden ein Connection-Objekt und ein Recordset-Objekt benötigt. Das Connection-Objekt stellt die Verbindung mit der Datenbank her. Diesem Objekt müssen daher der Name, der Ort, das Passwort und der Treiber für die Datenbank übergeben werden. Das Recordset-Objekt kann einen konkreten Datensatz enthalten, der entweder als Ergebnis einer SQL-Abfrage aus der Datenbank entnommen wurde oder der in die Datenbank übertragen werden soll.

4.5.4 XML

Die Speicherung des Simulationsmodells erfolgt in einer XML-Datei.¹⁴ Um die Gebäudedaten in das Simulationsmodell zu übertragen, muss die Anwendung im CAD-System in der Lage sein, XML-Daten zu lesen und zu manipulieren. XML (Extensible Markup Language, dt. erweiterbare Auszeichnungssprache) zählt zu den Markup-Sprachen, zu denen auch HTML gehört. Wie in einem HTML Dokument werden die Daten, die in einer XML-Datei enthalten sind, von sogenannten „Tags“ umschlossen. Dabei wird zwischen einem „einleitenden Tag“, das vor den Daten platziert wird, und einem „Abschluss Tag“ unterschieden:

```
<Name> Klaus Müller </Name>
```

Beide Tags besitzen jeweils die gleiche Bezeichnung (Name), sie unterscheiden sich lediglich dadurch, dass das Abschluss Tag zusätzlich einen Schrägstrich (/) vor der Bezeichnung enthält.

¹² ANSI - American National Standards Institute

¹³ ISO - International Organization for Standardization

¹⁴ Teile des Textes in diesem Unterkapitel wurden bereits bei *Kugler et al. (2011, S. 164 f.)* veröffentlicht.

Während für HTML-Dokumente nur eine bestimmte Anzahl an Tags mit festen Bezeichnungen zulässig sind, die jeweils eine festgelegte Bedeutung haben (durch die Tags ** ** wird beispielsweise der umschlossene Text fett dargestellt), können in einem XML-Dokument die Bezeichnungen frei gewählt werden. XML-Dateien müssen lediglich dem Kriterium der „Wohlgeformtheit“ entsprechen. Die wichtigsten Regeln der Wohlgeformtheit lauten:

- Zu jedem öffnenden muss ein schließendes Tag vorhanden sein.
- ineinander verschachtelte Tags müssen in umgekehrter Reihenfolge – wie sie geöffnet wurden – wieder geschlossen werden.
- Es muss ein Wurzelement existieren, das alle anderen Tags umschließt.

Um XML-Dokumente für die Datenspeicherung zu verwenden, ist es sinnvoll, die Menge der verwendbaren Tags einzuschränken und für die Verschachtelung der Tags eine feste Struktur in Form einer Grammatik vorzugeben. Nur so kann sichergestellt werden, dass die Dokumente von Anwendungsprogrammen korrekt interpretiert werden und ein fehlerfreies Auslesen und Speichern der Daten möglich ist. Für die Definition der Grammatik eines XML-Dokuments existieren eine ganze Reihe unterschiedlicher Formate. Die Gebräuchlichsten sind die XML Schema Definition (XSD) und die XML Document Type Definition (DTD).

Mit Hilfe eines „Data binding-Tools“ können auf der Grundlage einer Grammatik automatisch Klassen und Funktionen generiert werden, die den Zugriff auf ein XML-Dokument ermöglichen, welches dieser Grammatik entspricht. In der vorliegenden Arbeit wurde der von der Firma Liquid Technologies entwickelte „Liquid XML Data Binding Wizard“ verwendet. Dieser ermöglicht auf der Grundlage einer XML Schema Definition-Datei die Generierung von Klassenmodulen im Visual Basic (VB) Quellcode, die den Zugriff und die Manipulation einer zugehörigen XML-Datei steuern. Dieser Quellcode wurde in VB in Form einer Dynamic Link Library (dll) kompiliert, so dass die Klassenmodule in der VBA-IDE von Architecture verwendet werden können.

5 Das Simulationsmodell

In diesem Kapitel wird das Simulationsmodell erläutert, welches mit der im vorhergehenden Kapitel vorgestellten Anwendung CiSmo parametrisiert und modelliert werden kann.

In Unterkapitel 5.1 wird zunächst die bei der Entwicklung des Simulationsmodells verwendete Vorgehensweise beschrieben. Der Aufbau der folgenden Unterkapitel orientiert sich an der von *Wenzel et al. (2008)* vorgeschlagenen Struktur für die Dokumentation ausführbarer Modelle. Diese wird durch Ergebnisse aus der Entwicklung des „Konzeptmodells“ und des „Formalen Modells“ ergänzt. Die Dokumentstruktur wird außerdem an das verwendete agentenbasierte Modellierungskonzept angepasst.

Im Unterkapitel 5.2 wird die Systemstruktur des Simulationsmodells im Überblick dargestellt und es erfolgt eine Erläuterung der Systemgrenzen, grundsätzlicher Annahmen, der Beschreibungsmittel für die Dokumentation und der verwendeten Software.

In Unterkapitel 5.3 wird die Systemstruktur im Detail beschrieben. Die verschiedenen Teilmodelle und ihr Detaillierungsgrad werden vorgestellt und die übergeordneten Prozesse im Simulationsmodell erläutert. Des Weiteren werden die Schnittstellen des Simulationsmodells dokumentiert.

Im anschließenden Unterkapitel 5.4 werden die Teilsysteme in Form der Umwelt, der Agenten und der Ressourcen des Simulationsmodells beschrieben. Erläutert werden die Variablen der Agenten, die Organisationsstruktur, in die die Agenten eingebunden sind, ihre Aktivitäten und ihre Visualisierung.

Unterkapitel 5.5 enthält eine Beschreibung der Modelldaten. Erläutert werden die Eingabe- und Ausgabegrößen und die Implementierung der Datenstrukturen.

Da alle Bestandteile des Simulationsmodells wiederverwendbar sind, wird auf eine gesonderte Beschreibung der wiederverwendbaren Komponenten, wie bei *Wenzel et al. (2008)* vorgesehen, verzichtet.

5.1 Vorgehensmodelle für die Durchführung von Simulationsstudien

Simulationsmodelle werden im Allgemeinen im Rahmen einer Simulationsstudie entwickelt. Für die Durchführung von Simulationsstudien existieren viele unterschiedliche Vorgehensmodelle. Diese Vorgehensmodelle dienen in erster Linie der Qualitätssicherung und sollen

eine strukturierte Entwicklung und Dokumentation der Simulationsmodelle fördern. Des Weiteren sollen durch die Vorgehensmodelle die Kommunizierbarkeit und die Glaubwürdigkeit der Simulationsmodelle verbessert werden (*vgl. Oechslein 2004, S. 10*).

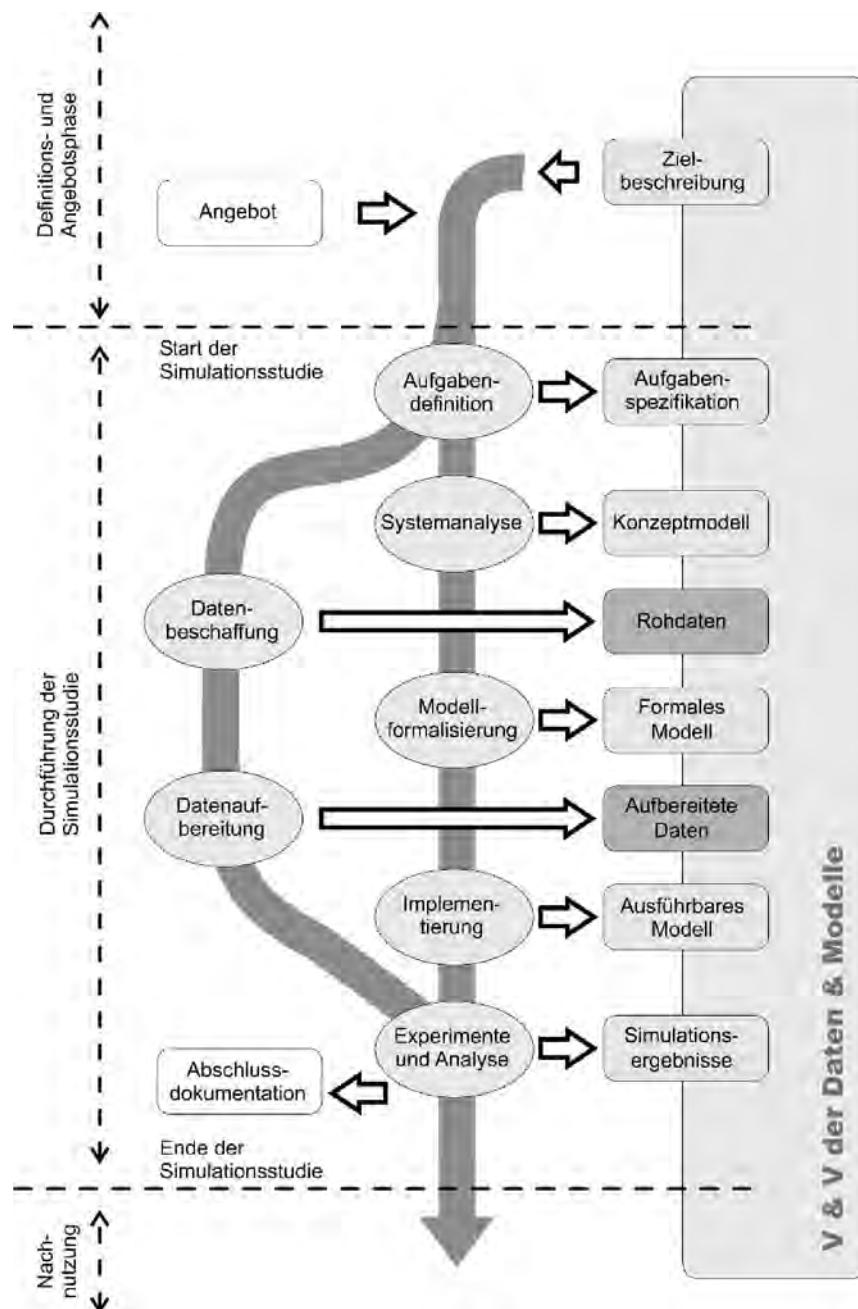


Abbildung 5.1: Erweitertes Vorgehensmodell (angelehnt an Rabe et al. (2008)) für die Durchführung und Dokumentation einer Simulationsstudie (Wenzel et al. 2008, S. 6)

Wenzel et. al (2008, S. 13) nennen als grundlegende Qualitätskriterien für die Durchführung einer Simulationsstudie:

1. „*Sorgfältige Projektvorbereitung*“
2. *Konsequente Dokumentation aller Projektaktivitäten*
3. *Durchgängige Verifikation und Validierung*
4. *Kontinuierliche Integration des Auftraggebers*
5. *Systematische Projektdurchführung*“

Aufbauend auf dem von *Rabe et al. (2008)* verwendeten Vorgehensmodell zur Durchführung von Simulationsstudien schlagen *Wenzel et. al (2008)* die konsequente Dokumentation der verschiedenen Phasen der Simulationsstudie in einer festgelegten Dokumentstruktur vor (siehe Abbildung 5.1). Die Dokumentstruktur beschreibt, welche Fragestellungen, Dokumentationen, Entwürfe und Implementierungen in den einzelnen Projektphasen festgehalten werden. Die äußere Form der Dokumente (Word-Dokumente, UML etc.) wird nicht vorgegeben. Die Vollständigkeit der Dokumentation kann anhand von Checklisten für die jeweiligen Phasen der Simulationsstudie überprüft werden.

Oechslein (2004) entwickelte ein Vorgehensmodell für den Entwurf, die Implementierung und für das Experimentieren mit agentenbasierten Simulationsmodellen. Entwickelt wurde das Vorgehensmodell speziell für das agentenbasierte Simulationswerkzeug SeSAM, das auch in der vorliegenden Arbeit eingesetzt wurde.

Das Vorgehensmodell setzt sich aus fünf verschiedenen Phasen zusammen (*vgl. Oechslein 2004, S. 53 ff.*):

1. Konzeptmodellphase

In dieser Phase erfolgen die Formulierung einer Fragestellung, die Auflistung der Systemgrößen, der Modellbestandteile, der Organisation und eine Kurzbeschreibung der Experimente.

2. Spezifikationsphase

Diese Phase beinhaltet die Konkretisierung der Systemgrößen, der Agentenklassen (Sensoren, Aktionen, Verhaltensnetz und Zustandsvariablen), der Umwelt, der Organisationsstrukturen und der Experimente.

3. Implementierungsphase

Das bisher entwickelte Modell wird in ein ablauffähiges Computermodell umgewandelt.

Aus der gegebenen Agentenarchitektur werden unter Verwendung einer Infrastruktur (Simulator, Kommunikationsinfrastruktur, Datenextraktion und Visualisierung) die Agenten-, die Ressourcen- und die Weltklasse implementiert.

4. Kalibrierungsphase

In dieser Phase werden die Modellgrößen so angepasst, dass das Simulationsmodell dem Zielsystem entspricht.

5. Experimentationsphase

In der letzten Phase werden anhand des Simulationsmodells die zuvor bereits beschriebenen Experimente durchgeführt.

Ähnlich wie bei *Wenzel et. al (2008)* werden von *Oechslein (2004)* verschiedene Ergebnisse beschrieben, die in den jeweiligen Phasen dokumentiert werden.

Für das vorliegende Forschungsvorhaben wurde das Vorgehensmodell zur Qualitätssicherung von Simulationsstudien nach *Wenzel et al. (2008)* um die agentenspezifischen Phasenergebnisse, die von *Oechslein (2004)* beschrieben werden, ergänzt. Das Konzeptmodell nach *Wenzel et al. (2008)* wird beispielsweise erweitert durch die Ergebnisse der Spezifikationsphase nach *Oechslein (2004)*. Als Ergebnisse werden von *Oechslein (2004)* genannt:

- die Beschreibung der Organisationsstrukturen zwischen den Agenten
- die Beschreibung der Sensoren der Agenten
- die Beschreibung der Aktionen der Agenten
- die Beschreibung der Verhaltensnetze der Agenten
- die Spezifikation der Zustandsvariablen

Ausgehend von der Struktur eines agentenbasierten Simulationsmodells wird dabei unterschieden zwischen der Beschreibung der Umwelt, der Agenten und der Ressourcen.

5.2 Systembeschreibung

5.2.1 Anwendungsbereich und Systemstruktur

Das Simulationsmodell wurde speziell zur Unterstützung der Planungsaufgaben der Arbeitsvorbereitung entwickelt. Diese Planungsaufgaben lassen sich in vier Aufgabenfelder unterteilen:

1. Den **Verfahrensvergleich**, der zum Ziel hat das wirtschaftlichste Bauverfahren zur Herstellung bestimmter Bauteile auszuwählen.
2. Die **Baustelleneinrichtung**, die zum Ziel hat die Baustelleneinrichtungselemente, wie beispielsweise Krane und Bauaufzüge und die Produktionsabschnitte so zu platzieren und zu dimensionieren, dass ein möglichst reibungsloser Bauablauf gewährleistet werden kann.
3. Die **Bauablaufplanung**, in deren Rahmen die verschiedenen Arbeitsvorgänge der Gewerke zeitlich so organisiert werden müssen, dass möglichst keine gegenseitigen Behinderungen auftreten.
4. Die **Bedarfsplanung**, die sicherstellen muss, dass alle erforderlichen Ressourcen, wie Arbeitskräfte, Maschinen und Baustoffe, zur richtigen Zeit am richtigen Ort in ausreichender Menge vorhanden sind.

Die Modellierung der verschiedenen Verfahren und Bauablaufvarianten findet ebenso wie die Ressourcendefinition und die Baustelleneinrichtung in der im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Anwendung CiSmo im CAD-System statt. Die dort erfassten Daten werden entweder im Prozessmodell oder, wie die Ressourcen und die Gebäudestruktur, im Ausgangsszenario für die Simulationsläufe in der sogenannten „Situation“ gespeichert. Das Simulationsmodell liest die im Prozessmodell beschriebenen Regeln für die Bauausführung und setzt diese Regeln anhand des in der „Situation“ enthaltenen Gebäudemodells um. Das Simulationsmodell enthält daher auch keine Beschreibung der Bauprozesse, sondern nur die Regeln, die die Interpretation des Prozessmodells und der in der „Situation“ zusammengestellten Ausgangsdaten ermöglichen. Diese Vorgehensweise folgt der Empfehlung von Wenzel *et al.* (2008, S. 136 f.) die Daten und Steuerungsregeln vom eigentlichen Simulationsmodell zu trennen. Die Modellparameter und die Steuerungsstrategien für den Bauablauf können dadurch einfacher geändert werden und es ist für den Anwender deutlicher erkennbar, welche Daten das Simulationsmodell benötigt (vgl. Wenzel *et al.* 2008, S. 136 f.).

5.2.2 Die Simulationsumgebung

Die im vorliegenden Projekt verwendete Simulationsumgebung SeSAM wurde an der Universität Würzburg am Lehrstuhl für Künstliche Intelligenz und Angewandte Informatik entwickelt. Die Simulationsumgebung basiert auf dem agentenbasierten Modellierungskonzept und ermöglicht die Implementierung beliebiger Simulationsmodelle.

SeSAM steht für „**S**hell for **S**imulated **A**gent **S**ystems“, was so viel bedeutet wie „Entwicklungsumgebung für simulierte Agentensysteme“. Die Simulationsumgebung stellt folgende Kernfunktionalitäten bereit (*Herrler 2007, S. 48 f.*):

- „*Visuelle Agenten und Umgebungsmodellierung*
- *Integrierter Simulator*
- *Unterstützung zum Experimentieren und Analysieren*
- *Interaktive Simulation*
- *Erweiterbarkeit*“

Die Implementierung aller Bestandteile des Simulationsmodells wird in SeSAM über graphische Benutzeroberflächen durchgeführt, die es auch Anwendern ohne Programmiererfahrung ermöglichen agentenbasierte Simulationsmodelle zu erstellen. Die Implementierung des Verhaltens der Agenten geschieht in SeSAM nicht textuell, sondern über vordefinierte primitive Funktionen, die über die Benutzeroberflächen ausgewählt werden, so dass stets nur korrekte Syntax eingegeben werden kann (*vgl. Oechslein 2004, S. 113*).

Auf die einzelnen Modellbestandteile kann in SeSAM über eine Baumstruktur zugegriffen werden, die permanent am linken Bildschirmrand verfügbar ist. Diese Baumstruktur erleichtert die Orientierung im Modell und bietet darüber hinaus einen Überblick über alle Elemente des Modells.

Die Simulationsumgebung wird unter der Homepage „<http://www.simsesam.de>“ kostenfrei zum Download angeboten. SeSAM steht unter der GNU General Public License, das bedeutet, dass der Java-Quellcode des Programms auf Anfrage frei verfügbar ist. SeSAM kann daher beliebig weiterentwickelt und modifiziert werden, was besonders im wissenschaftlichen Kontext von großem Vorteil ist. Die Simulationsmodelle werden im XML-Format gespeichert, wodurch das Einlesen der Modellstruktur in anderen Anwendungen möglich ist. Durch die

Entwicklung sogenannter Plugins können außerdem zusätzliche Primitiven für SeSAM erstellt werden, ohne sich mit dem kompletten Quellcode des Programms auseinandersetzen zu müssen. Ein solches „*Primitiv ist ein atomares Sprachelement – eine Instruktion oder eine Berechnungsfunktion, die vom Agenten aufgerufen oder ausgeführt wird, um die Umwelt wahrzunehmen oder zu beeinflussen*“ (Herrler 2007, S. 50).

Aufgrund der Offenheit des Quellcodes und der Modellstruktur sowie den Möglichkeiten zur Weiterentwicklung von SeSAM durch Plugins, wird die Simulationsumgebung besonders häufig im Rahmen von Forschungsprojekten eingesetzt. Die bisherigen Anwendungsfelder erstrecken sich dabei auf unterschiedliche Fachrichtungen:

- In der **Biologie** wurde SeSAM u.a. verwendet um simulationsgestützt die Anwendungsstrategien von Honigbienen zu untersuchen (Dornhaus et al. 2006).
- Im Fachbereich **Psychologie** wurden unter Verwendung von SeSAM Untersuchungen zur Formalisierung von Strategien für die Bekämpfung von Waldbränden durchgeführt (Igl 2002).
- In der **Verkehrsorschung** wurde SeSAM eingesetzt, um den Einfluss von Verkehrsvorhersagen auf die Routenwahl von Autofahrern zu simulieren (Klügl und Bazzan 2004).
- Im Bereich **Logistik/Lagerhaltung** wurde SeSAM als TestBed-Umgebung für eine Hochregallagersteuerung verwendet (Triebig et al. 2005).
- Herrler (2007) verwendete SeSAM für die Ressourcenplanung und die Prozesssimulation im **Gesundheitswesen**.
- Im **Bauwesen** wurde SeSAM bisher für die Prozesssimulation im Hochbau (Kugler und Franz 2008) und für die Simulation von Montageprozessen im Fassadenbau eingesetzt (Bergmann 2011).

Modellbestandteile und Modellaufbau

Ein komplettes Simulationsmodell besteht in SeSAM aus Agenten, Ressourcen, der Welt, verschiedenen Situationen, Simulationen, Analysefunktionen und Experimenten (siehe Abbildung 5.2).

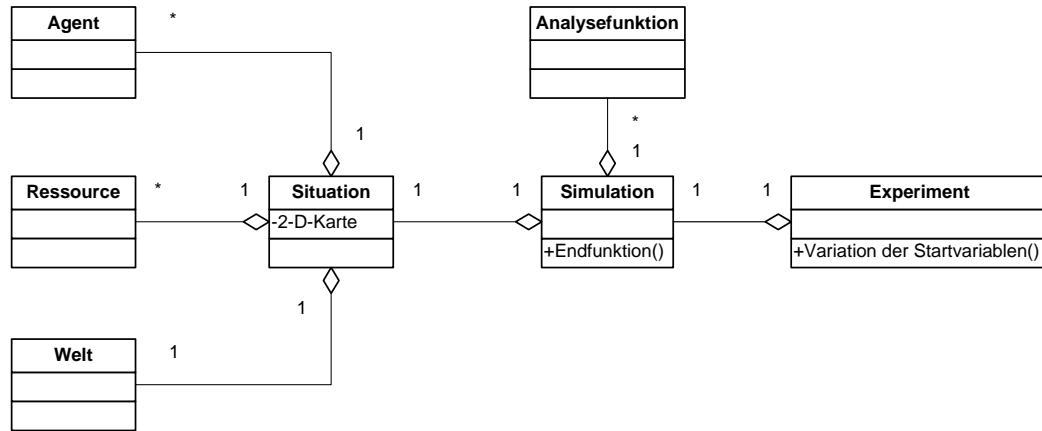


Abbildung 5.2: UML-Klassendiagramm eines Simulationsmodells in SeSAM

Die aktiven Bestandteile des Simulationsmodells, die ein eigenes Verhalten aufweisen, werden in Form von **Agenten** modelliert, während alle passiven Bestandteile des Simulationsmodells als **Ressourcen** dargestellt werden. Die **Welt** gibt die Eigenschaften und das Verhalten der Umgebung vor, in die die Agenten und Ressourcen eingebettet sind.

Simulationsläufe werden auf der Basis sogenannter **Situations** ausgeführt. In einer Situation wird eine konkrete Ausgangskonfiguration für einen Simulationslauf definiert. Die Situation besteht aus einer 2-D-Karte, auf der Instanzen der Agenten- und der Ressourcenklassen, die Teil des Szenarios sind, platziert werden. In CiSmo wird auf der Grundlage bereits implementierter Agenten- und Ressourcenklassen eine neue Situation erstellt. Die für die Bauablaufsimulation relevanten Bauteile, Arbeitskräfte und Betriebsmittel werden von entsprechenden Agenten- und Ressourcenklassen instanziert und in einer neuen Situation zusammengefügt.

Auf der Grundlage einer Situation kann eine **Simulation** erzeugt werden. In der Simulation wird eine Endfunktion definiert, die den Simulationslauf beim Erreichen eines bestimmten Zielwertes stoppt. Außerdem können der Simulation verschiedene **Analysefunktionen** hinzugefügt werden, die in einer eigenen graphischen Benutzeroberfläche definiert werden. In dieser Benutzeroberfläche lassen sich unter Verwendung von vordefinierten Funktionen einzelne Variablenwerte oder aggregierte Werte über den zeitlichen Verlauf der Simulation beobachten.

ten. Außerdem lässt sich definieren, wie oft die Werte erfasst und in welcher Form sie dargestellt werden. Die Daten lassen sich in Zeitreihendiagrammen, Balkendiagrammen, Tabellen und Excel-lesbaren CSV-Dateien abbilden (*vgl. Herrler 2007, S. 51 ff.*).

Mit **Experimenten** lassen sich eine ganze Reihe von Simulationsläufen erzeugen, bei denen die Startwerte bestimmter Variablen systematisch variiert werden. Unter Verwendung vordefinierter Funktionen wird ein Experimentskript implementiert, anhand dessen es möglich ist, Sensitivitätsanalysen oder komplexe Tests zu definieren (*vgl. Oechslein 2004, S. 109*).

Für die Agenten, Ressourcen und die Umwelt können Variablen erstellt werden, die die Attribute der jeweiligen Simulationselemente beschreiben. Die Variablen können sowohl konkrete, wie auch generische Datentypen besitzen. Während konkrete Datentypen einen festgelegten Wertebereich (wie z. B. String den Wertebereich einer Zeichenkette variabler Länge umfasst) beschreiben, können generische Datentypen verschiedene konkrete Typen beinhalten (*vgl. Oechslein 2004, S. 94*). So kann beispielsweise in SeSAM der generische Datentyp List<T> für eine Liste von konkreten Datentypen des Typs String, Double, Integer, Boolean oder SimObject eingesetzt werden.

SeSAM erlaubt es außerdem, eigene, zusammengesetzte Datentypen zu erstellen. Ein zusammengesetzter Datentyp kann eine ganze Reihe verschiedener Variablen zu einem neuen Datentyp zusammenfassen. Die enthaltenen Variablen können sowohl konkrete, generische als auch zusammengesetzte Datentypen besitzen. Der für diese Arbeit erstellte zusammengesetzte Datentyp „Auftrag“ umfasst z. B. die Variablen Vorgang (Datentyp:Vorgang), Geschoss (Datentyp: Number<double>), Abschnitt-Raum (Datentyp: Number<double>), Bauphase (Datentyp:String) und Auswertung (Datentyp:Auswertung). Der Datentyp der Variablen Vorgang und Auswertung besteht ebenfalls wieder aus zusammengesetzten Datentypen, während die übrigen Variablen konkrete Datentypen besitzen.

Das Verhalten der Agenten und der Umwelt wird in SeSAM in sogenannten „Reasoning Engines“ definiert. In einer Reasoning Engine wird der Aktionsselektionsmechanismus beschrieben, der vorgibt, unter welchen Umständen ein Agent oder die Umwelt bestimmte Aktionen ausführt (*vgl. Oechslein 2004, S. 125*). Für einen Agenten können mehrere Reasoning Engines erstellt werden, die während eines Simulationslaufs zeitgleich durchlaufen werden. Dadurch ist es möglich, das Verhalten eines Agenten sehr vielschichtig auszustalten und ihn zeitgleich verschiedene Aktionen ausführen zu lassen.

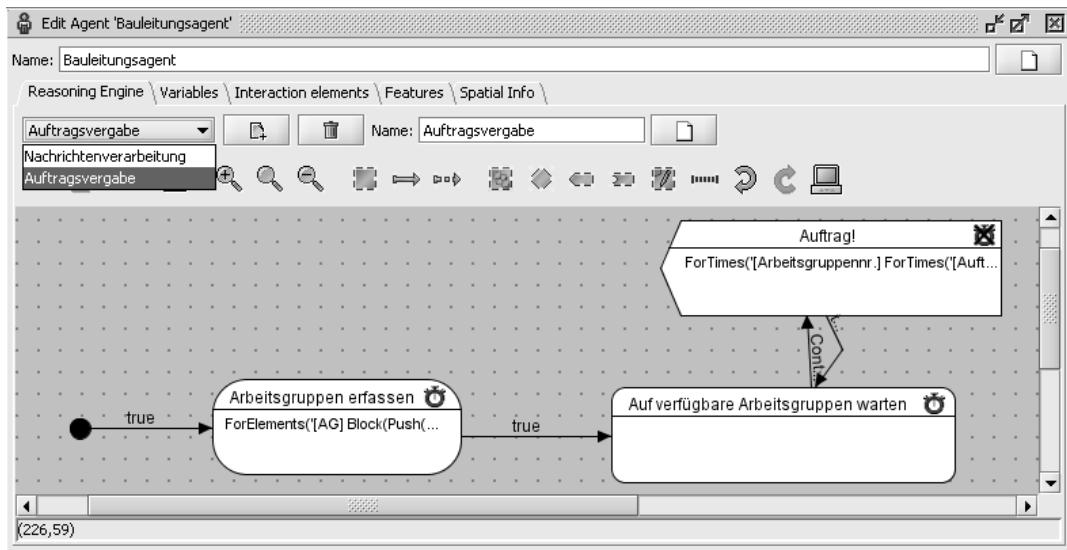


Abbildung 5.3: Die Reasoning Engine "Auftragsvergabe" des Bauleitungsagent mit dem zugehörigen Aktivitätsgraphen

Der Aktionsselektionsmechanismus in der Reasoning Engine wird zunächst auf einer höheren Ebene graphisch in SeSAM-UML beschrieben (siehe Abbildung 5.3). SeSAM-UML stellt eine Spezifikationssprache dar, die auf der Basis von UML-Aktivitätsgraphen entwickelt wurde (vgl. Oechslein 2004, S. 78 ff.). Die Graphen bestehen aus verschiedenen Knoten- und Kantenotypen, die das Verhalten von Agenten und Umwelt grob definieren (siehe Abbildung 5.4).

	Start- und Endknoten des Aktivitätsgraphen (genau einer pro Graph).		Notfallknoten, Übergangskanten werden in jeder Aktivität geprüft.
	Aktivitätsknoten mit Name und Aktionen. Aktionen werden ausgeführt, wenn Agent in dieser Aktivität ist.		Zustandsknoten mit Name und Aktionen. Wie Aktivitätsknoten, modelliert passiven Zustand, statt Aktivität.
	Senderaktivität mit Name und Aktionen. Wie Aktivitätsknoten, modelliert Interaktion.		Empfängeraktivität mit Name und Aktionen. Wie Aktivitätsknoten, modelliert Interaktion.
	Entscheidungsknoten, Aktionen nicht Möglich, nur Übergänge.		Zusammengesetzter Aktivitätsgraphknoten. Ruft eigenen Aktivitätsgraph auf.
	Objektknoten, zu Dokumentations-Zwecken bei Interaktionen, auch spezieller Zustand angebar, z.B. Prey[Eating].		Dokumentationsknoten mit textueller Dokumentation.
	Übergangskante mit Bedingung, Startpunkt (alle Knoten bis auf Endknoten), Endpunkt (alle Knoten bis auf Start- und Notfallknoten).		Dokumentationskante, mit textueller Dokumentation zwischen Dokumentations- oder Objektknoten und normalen Knoten, Richtungsangabe optional.

Abbildung 5.4: "Definition der Notation der Knoten- und Kantentypen im SeSAM-UML-Aktivitätsgraph"
(Oechslein 2004, S. 81)

Das in SeSAM-UML grob definierte Verhalten wird anschließend durch die Implementierungssprache SeSAM-IMPL durch vordefinierte primitive Funktionen soweit verfeinert, dass das Verhalten der Agenten durch SeSAM übersetzt und ausgeführt werden kann (vgl. *Oechslein 2004, S. 93*). Diese Funktionen werden über graphische Benutzeroberflächen direkt in den Kanten- und Knoten eingegeben, bei denen sie ausgeführt werden sollen (siehe Abbildung 5.5). Darüber hinaus ist es möglich, eigene benutzerdefinierte Funktionen in SeSAM zu erstellen, die sich aus den vorgegebenen Funktionen zusammensetzen. Für diese Funktionen müssen Übergabeparameter und der Rückgabewert spezifiziert werden, danach können sie an beliebiger Stelle im Modell aufgerufen werden.

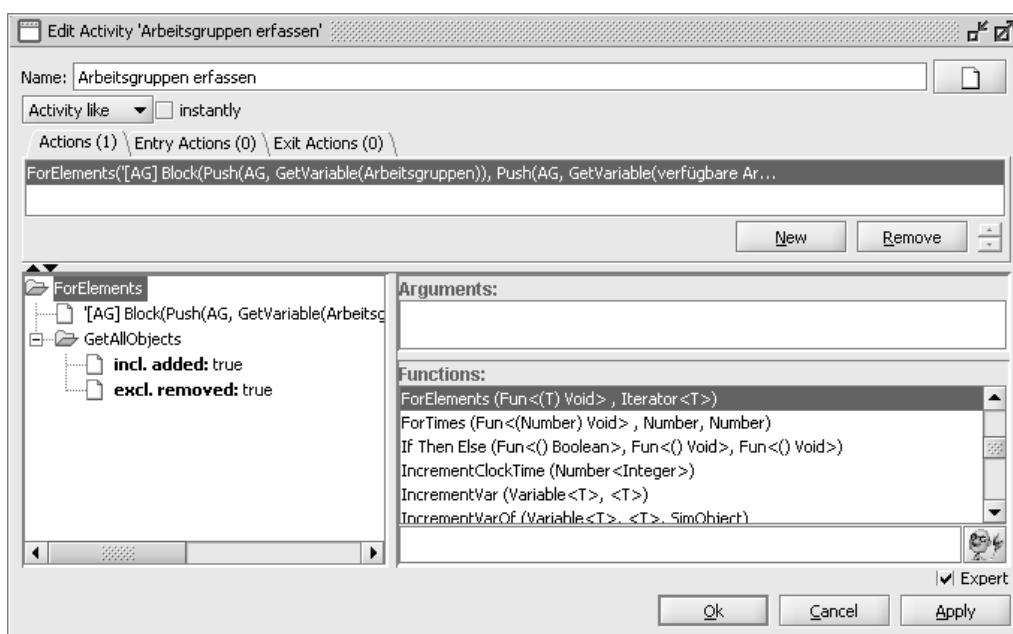


Abbildung 5.5: Funktionseingabe im Aktivitätsknoten „Arbeitsgruppen erfassen“

Plugins

Plugins ermöglichen es für SeSAM neue Funktionen und neue Datentypen zu entwickeln sowie zusätzliche Dialoge und Menüpunkte in die graphische Benutzeroberfläche zu integrieren (*Herrler 2007, S. 54*). Es existieren eine ganze Reihe fertig entwickelter Plugins, die auf der Homepage „<http://www.simsesam.de>“ zum Download bereitgestellt werden und das Basisssystem erweitern können. Die Plugins können einfach installiert werden, indem die Plugin-Dateien vom Typ „.jar“ in den Ordner „plugins“ des Installationsverzeichnisses von SeSAM kopiert werden. In der vorliegenden Arbeit wurden unter anderem das „Communication-Plugin“ und das „SQL-Plugin“ verwendet. Das „Communication-Plugin“ ermöglicht einen

Nachrichtenaustausch zwischen den Agenten, während das „SQL-Plugin“ den Lese- und Schreibzugriff auf eine SQL-Datenbank steuert.

Bei der Verwendung des „Communication-Plugins“ bekommen die Agenten ein Postfach zugewiesen, in dem eingehende Nachrichten gespeichert werden. Außerdem beinhaltet das Plugin eine Reihe von Primitiven zum Senden und Empfangen der Nachrichten. „*Der zentrale Datentyp des Plugins ist die InternalMessage zur Repräsentation von Nachrichten. Dieser Datentyp ist an das Format der standardisierten Nachrichtensprache FIPA-ACL¹⁵ angelehnt. [...] Analog zum ACL-Standard besteht eine Nachricht aus einem Sender, einem Empfänger, einem Performativ, dem Nachrichteninhalt und einer Benennung der verwendeten InhaltsSprache und Ontologie*“ (Herrler 2007, S. 127).

Tabelle 5.1: Variablen des zusammengesetzten Datentyps "InternalMessage"

Variable	Datentyp
performative	enumeration
content	String
sender	SimObject
receiver	SimObject
language	String
ontology	String

Außerdem wurde im Rahmen dieser Arbeit ein eigenes Plugin mit dem Namen „FindPathPlugin“ für die Wegfindung der Agenten innerhalb der Baustellenumgebung entworfen und implementiert. Das Plugin verwendet für die Wegfindung den A*-Algorithmus und stellt in SeSAM die zusätzliche Funktion „FindPath“ bereit. Der Funktion „FindPath“ werden bei ihrem Start die Position des Agenten, die Zielposition, eine Liste der Hindernisse und eine Liste der Durchgänge übergeben. Aus diesen Daten ermittelt die Funktion mit Hilfe des A*-Algorithmus den kürzesten Weg zwischen dem Start- und dem Zielpunkt unter gleichzeitiger Berücksichtigung aller Hindernisse und Durchgänge. Die Funktion „FindPath“ bewegt danach den Agenten unmittelbar auf dem ermittelten Pfad zu seinem Ziel und berück-

¹⁵ Die FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents) ist eine Gesellschaft, die sich zum Ziel gesetzt hat, die Interoperabilität der Agententechnologie mit anderen Technologien durch Normen zu gewährleisten. Die FIPA-ACL (Agent Communication Language) dient dazu, den Nachrichtenaustausch zwischen Agenten zu standardisieren (<http://www.fipa.org> 2011).

sichtigt dabei die voreingestellte Geschwindigkeit des Agenten. Eine umfassende Dokumentation des entwickelten Plugins findet sich bei *Wiegand (2009)*.

5.2.3 Zusätzlich verwendete Software

Für die Programmierung des neuen Plugins wurde in der vorliegenden Arbeit die Java-Entwicklungsumgebung „Eclipse“ verwendet, die als quelloffenes Programmierwerkzeug auf der Homepage „<http://www.eclipse.org>“ zum Download angeboten wird. Eclipse wurde ursprünglich von IBM entwickelt und im November 2001 als Open-Source-Anwendung freigegeben. Die Weiterentwicklung von Eclipse wird von eclipse.org gesteuert, der als Nonprofit-Organisation u.a. die Firmen IBM, Ericson, Intel und Hewlett Packard angehören. Eclipse kann nicht nur als Entwicklungsumgebung für Java, sondern auch für andere Programmiersprachen wie z. B. C++ verwendet werden (*vgl. Daum 2004, S. 1 ff.*).

Die Prozessdaten werden gesondert vom Simulationsmodell in einer eigenen Datenbank gespeichert. Für die Speicherung der Daten wurde das Datenbankmanagementsystem MySQL verwendet, das bereits in Kapitel 4.5.3 beschrieben wurde.

5.2.4 Beschreibungsmittel

Für die Dokumentation des Modells werden verschiedene UML-Diagrammtypen, wie Aktivitäts-, Klassen-, Kommunikations- und Sequenzdiagramme verwendet, um die Struktur und das Verhalten der Modellkomponenten des Simulationsmodells zu beschreiben. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, da das Verhalten der Agenten in SeSAM unter Verwendung von Aktivitätsdiagrammen implementiert wird, die auf der UML-Notation basieren. SeSAM unterstützt außerdem die Darstellung der Modellstruktur in Klassendiagrammen. Der Nachrichtenaustausch zwischen den Agenten lässt sich während der Ausführung eines Simulationslaufs in Sequenzdiagrammen anzeigen.

Die Beschreibung der Datenbankstruktur für die Auswertung der Simulationsläufe erfolgt anhand von Entity-Relationship-Diagrammen, die bereits in Kapitel 4.3.3 beschrieben wurden.

5.2.5 Systemgrenzen des Modells

In der vorliegenden Arbeit wird als Systemgrenze für die Materialbeschaffung das Zwischenlager auf der Baustellengrenze angenommen (siehe Abbildung 3.1). Betrachtet werden daher

nur die Transportprozesse der direkten Produktionslogistik. Aspekte der Beschaffungs- und der Entsorgungslogistik, die Schnittstelle zwischen der Beschaffungs- und der Produktionslogistik sowie die Schnittstelle zwischen der Produktions- und der Entsorgungslogistik werden nicht in das Modell integriert.

Diese Vereinfachung hat den Nachteil, dass Transportprozesse beim Entladen, die von den Kranen ausgeführt werden, nicht in die Simulation und damit in die Ermittlung der tatsächlichen Auslastung der Krane mit einfließen. Der Vorteil besteht darin, dass die Anlieferungszeitpunkte der Materialien nicht erfasst werden müssen, was den Aufwand für die Datenbeschaffung erheblich senkt. Die Prozesse der Entsorgungslogistik werden vernachlässigt, da sonst die bei den verschiedenen Arbeitsvorgängen anfallenden Abfallmengen definiert werden müssten.

Nicht betrachtet wird außerdem die für die Produktion benötigte Energie und der Informationsfluss, der zwischen der Bauleitung und der Außenwelt stattfindet, wie z. B. mit dem Bauherrn, mit Lieferanten und der Firmenzentrale der Baufirma. Das hat den Nachteil, dass der Einfluss von Änderungswünschen, die der Bauherr während der Bauausführung äußert, im Modell nicht berücksichtigt werden kann, obwohl diese während der Durchführung einer Baumaßnahme sehr häufig auftreten. Der Eintritt eines bestimmten Änderungswunsches lässt sich jedoch nicht statistisch erfassen. Alternativ kann jedoch ohne größeren Aufwand ein neues Simulationsmodell generiert werden, dass die Änderungswünsche berücksichtigt.

In gleicher Weise lässt sich die Wahrscheinlichkeit von Lieferverzögerungen oder der Einfluss, der von der Firmenleitung auf das Bauprojekt ausgeht, nur sehr schwer bestimmen. Dies liegt in erster Linie daran, dass sich die Einflussparameter im Vorfeld nicht klar definieren lassen.

Dargestellt wird daher lediglich der Informationsfluss auf der Baustelle zwischen den unmittelbar an der Fertigung und an der Produktionslogistik beteiligten Systemkomponenten, wie den Arbeitsgruppen, der Bauleitung und den Betriebsmitteln.

Im Modell können die Prozesse zur Herstellung von mehrgeschossigen Geschäfts- und Mehrfamilienhäusern simuliert werden. Eine Ausnahme bilden die Erdbauprozesse, die im Rahmen des Baus anfallen, wie beispielsweise der Aushub der Streifen- und der Flächenfundamente. Diese werden ausgeklammert, da sich die Ablaufstruktur von Erdbauprozessen deutlich von

der Ablaufstruktur der Hochbauprozesse unterscheidet und sie sich daher nicht ohne Weiteres in dem verwendeten Prozessmodell abbilden lassen.

Die Teiltvorgangsebene stellt die kleinste Betrachtungsebene des Fertigungsprozesses dar.

Zusätzliche Projektunterlagen, wie z. B. Schal- und Bewehrungspläne, werden vernachlässigt. Der Schalungs- oder Bewehrungsgrad kann z. B. über die Aufwandswerte und die pro gefertigter Mengeneinheit benötigten Materialien berücksichtigt werden.

Das Bauwerk wird in der Rohbauphase horizontal in Abschnitte und vertikal in Etagen und in der Ausbauphase in Räume und Etagen gegliedert. Die kleinste Einheit der Gebäudestruktur ist das Bauteil (Wand, Unterzug, Stütze oder Decke), Bauelemente werden nicht betrachtet.

5.2.6 Annahmen

Für die Simulation der Produktionsprozesse wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die Arbeitsgruppen erhalten ihre Arbeitsaufträge von der Bauleitung.
- Die Ausführung von Arbeitsvorgängen erfolgt im Rohbau abschnittsweise und im Ausbau raumweise jeweils von einer Arbeitsgruppe.
- Es wird davon ausgegangen, dass nur jeweils eine Arbeitsgruppe eines gleichen Gewerks in einem Raum oder Abschnitt an einem Vorgang tätig sein kann.
- Die Arbeitsgruppen organisieren die Ausführung eines Vorgangs und den Materialtransport zum Produktionsort selbstständig.

Die Simulation der logistischen Vorgänge wurde durch folgende Annahmen vereinfacht:

- Es wird davon ausgegangen, dass das benötigte Material in Zwischenlagern auf dem Baustellengelände vorliegt.
- Es wird davon ausgegangen, dass der Materialbedarf sich proportional zur ausgeführten Fertigungsmenge verhält (wenn es sich nicht um Stücke handelt).
- Der Transport in das Gebäude findet in Ladeeinheiten statt. Der Transport im Gebäude zum Produktionsort wird in kleineren Mengeneinheiten durchgeführt.
- Es wird davon ausgegangen, dass das für einen Vorgang benötigte Material unmittelbar vor Beginn des Vorgangs vom Außenlager auf dem Baustellengelände in ein ge-

bäudeinternes Lager im jeweiligen Geschoss transportiert wird. Alternativ kann es direkt vom Außenlager zum Produktionsort transportiert werden, wie beispielsweise beim Betoneinbau.

- Die Transporte in das gebäudeinterne Lager werden von den Arbeitsgruppen organisiert, diese können den Transport an Betriebsmittel vergeben oder durch Mitglieder der eigenen Arbeitsgruppe durchführen lassen.

5.2.7 Die Systemstruktur im Überblick

Das Simulationsmodell besteht aus einer Umwelt mit dem Namen Baustelle, einem Bauleiteragenten, der die Prozessregeln aus der CiSmo-Datenbank auswertet, Arbeitsgruppen- und Arbeiteragenten, welche die Bauarbeiten ausführen, und Betriebsmittelagenten, die in erster Linie für logistische Vorgänge eingesetzt werden.

Das zu fertigende Gebäude und seine Struktur werden im Simulationsmodell durch Geschoss-, Abschnitt-, Raum-, Außenlager- und Bauteil-Ressourcen repräsentiert. Treppen- und Aufzugsschacht-Ressourcen kennzeichnen Punkte im Gebäude, an denen ein Wechsel zwischen den Ebenen stattfinden kann.

Die Baumaterialien werden im Simulationsmodell in Form von Ladeeinheiten oder durch zusammengesetzte Datentypen dargestellt.

5.3 Modellierung der Systemstruktur

5.3.1 Modellstruktur und Teilmodelle

Dem multiagentenbasierten Modellierungskonzept folgend setzt sich die Modellstruktur des Simulationsmodells aus Agentenklassen, Ressourcenklassen und einer Weltklasse zusammen. Systemkomponenten mit einem eigenen Verhalten werden als Agenten implementiert. Jeder dieser Agenten stellt ein eigenständiges Teilmodell dar. Dazu zählen:

- Bauleitungsagent (einer pro Modell)
- Arbeitsgruppenagent (Anzahl und Zusammensetzung wird in CiSmo definiert – enthält Arbeitskräfte unterschiedlicher Qualifikation)
- Arbeiteragent (wird nur zur Laufzeit der Simulation aus einem Arbeitsgruppenagenten aus- und wieder eingegliedert, gehört immer zu einem Arbeitsgruppenagenten)

- Betriebsmittelagent
- Personenaufzugsagent
- Materialaufzugsagent

Die passiven Systemkomponenten, die lediglich über ihre Anzahl und ihre Eigenschaften Einfluss auf das Modellverhalten ausüben, werden als Ressourcen implementiert:

- Ladeeinheit
- Lagerplatz
- Geschoss
- Abschnitt
- Raum
- Bauteil
- Treppe
- Aufzugsschacht
- Betriebsmittelressource

In der Weltklasse wurden die übergeordneten Eigenschaften des Modells und das übergeordnete Systemverhalten implementiert, die Einfluss auf alle Systemkomponenten ausüben können. Abbildung 5.6 enthält ein Klassendiagramm aller Bestandteile des Simulationsmodells. Die Agenten sind in dem Diagramm mit dem Stereotypen <>agent<>, die Ressourcen mit dem Stereotypen <>resource<> und die Umwelt mit dem Stereotypen <>world<> gekennzeichnet. Ein Stereotyp gibt in der UML Auskunft über den Zweck oder die Art eines Notationselements. Die UML stellt es frei, eigene Stereotypen zu definieren und zu verwenden (vgl. *Kecher 2007, S. 85 u. 87*).

In dem Diagramm werden außerdem die wichtigsten Variablen der Agenten-, Ressourcen- und Weltklassen mit angegeben. Die verschiedenen Reasoning Engines der Klassen sind unterhalb der Variablen in Form von Operationen wiedergegeben. Die Klassen des Simulationsmodells bauen auf den Elementen des in Kapitel 4.3 beschriebenen Prozessmodells auf. Verwendet wurden ähnliche oder gleiche Bezeichnungen, um so die spätere Wartung des Modells zu vereinfachen und die Verständlichkeit von Zusammenhängen innerhalb des Simulationssystems zu erhöhen. Im Simulationsmodell existieren zusätzlich die „Baustelle“, als die Umwelt des Simulationsmodells und der „Bauleitungsagent“, der die ausführbaren Vorgänge identifiziert und sie als Aufträge an die Arbeitsgruppen vergibt.

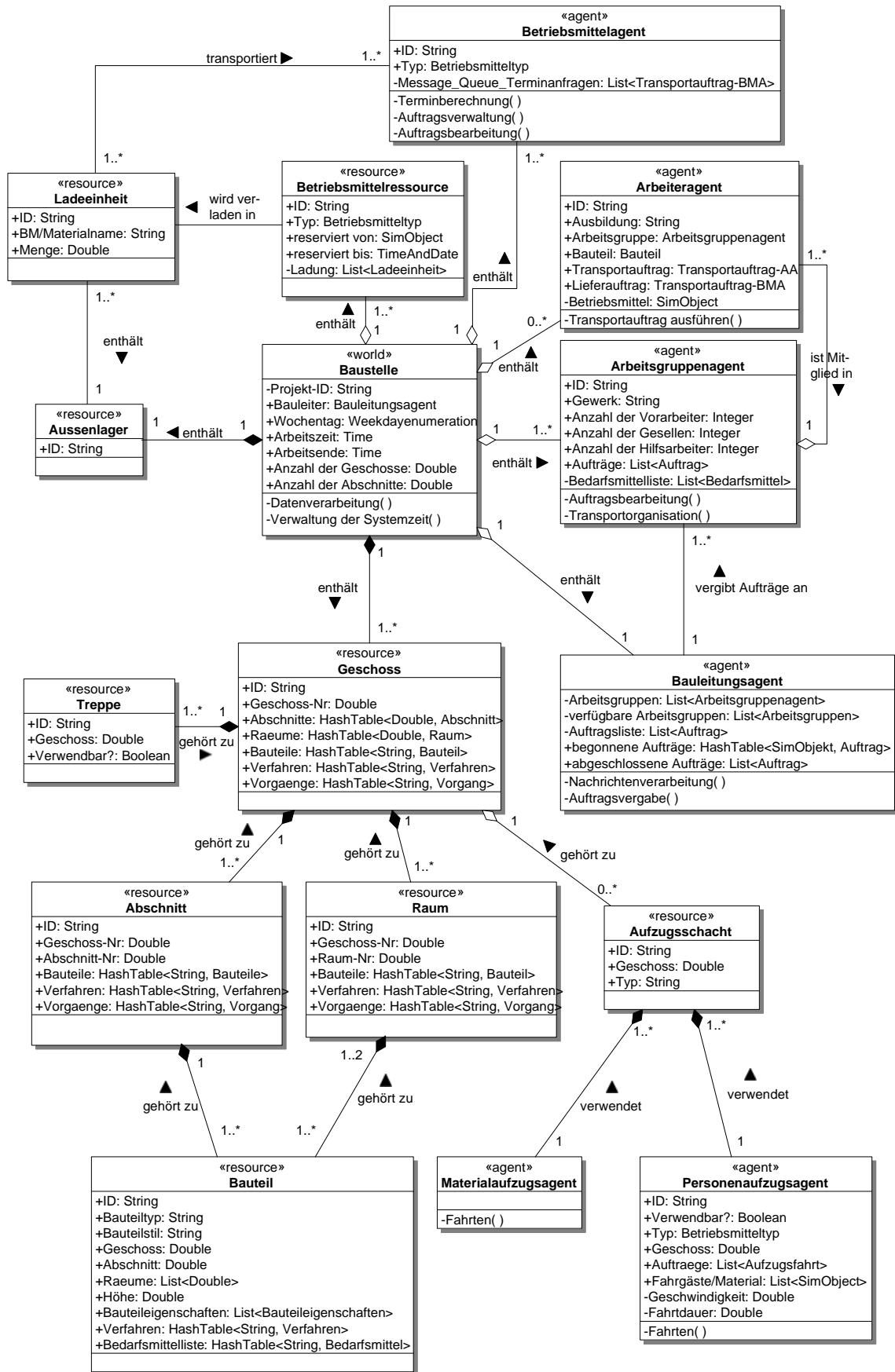


Abbildung 5.6: UML-Klassendiagramm des Simulationsmodells

Zusätzlich wurden eine Reihe von Funktionen entwickelt, die von verschiedenen Agenten und der Umwelt aufgerufen werden können. Diese benutzerdefinierten Funktionen setzen sich aus verschiedenen primitiven Funktionen des Simulationswerkzeugs SeSAM zusammen. Sie können jeweils einen Übergabeparameter und einen Rückgabewert besitzen. Um diese Funktionen zu strukturieren, wurden sie in vier „User Features“ gegliedert, die jeweils Funktionen, die in einem Kontext zueinander stehen, zusammenfassen.

Als „User Features“ existieren:

- **Scheduling** – enthält Funktionen, die für die Ablaufplanung verwendet werden.
- **Transport** – enthält Funktionen, die beim Transport von Materialien oder Betriebsmitteln zum Einsatz kommen.
- **DB-Functions** – enthält Funktionen, die im Rahmen des Zugriffs auf die Datenbank benötigt werden.
- **Production** – enthält Funktionen, die während des Bauprozesses Verwendung finden.

Für die Datenhaltung und den Informationsaustausch zwischen den Modellkomponenten wurden eine Reihe von zusammengesetzten Datentypen entwickelt, die aus mehreren Variablen mit unterschiedlichen Datentypen bestehen. Einige dieser zusammengesetzten Datentypen werden bei der Erläuterung der Teilsysteme in Unterkapitel 5.4 behandelt.

5.3.2 Schnittstellen nach außen

Das Simulationsmodell greift auf zwei Datenbanken zu, die als Datenschnittstellen verwendet werden. In der Datenbank „Simulation“ wird ein großer Teil der Eingabeparameter des Simulationsmodells gespeichert. Die Datenbank „Ergebnisse“ wird zur Dokumentation der Simulationsläufe verwendet. Aus dieser Datenbank werden in CiSmo die Terminpläne generiert, die zur Auswertung der Simulationsläufe verwendet werden.

Der Datenbankzugriff auf die Datenbank „Simulation“ erfolgt über die Umwelt (siehe Kap. 5.4.1). Der Zugriff auf die Datenbank „Ergebnisse“ wird durch den Bauleitungsagenten gesteuert, der den Verlauf der Baumaßnahme protokolliert.

Als Schnittstelle wird außerdem die in CiSmo erzeugte „Situation“ des Simulationsmodells verwendet. Die in SeSAM implementierten Agenten- und Ressourcenklassen stellen Baupläne für konkrete Objekte dar, die im Simulationsmodell benötigt werden.

Die konkreten Simulationsobjekte werden als Instanzen der Agenten- und Ressourcenklassen im CAD-System über die Anwendung CiSmo erstellt und innerhalb einer Situation platziert. Parametrisiert werden diese Instanzen mit den Daten des Gebäude- und des Prozessmodells.

So werden beispielsweise alle Bauteile des Gebäudemodells im CAD-System in Ressourcen der Ressourcenklasse „Bauteil“ umgewandelt und mit den jeweiligen Koordinaten und Bauteileigenschaften in der „Situation“ platziert. Das Simulationsmodell beinhaltet dadurch ein in der Struktur identisches Abbild des Gebäudemodells aus dem CAD-System.

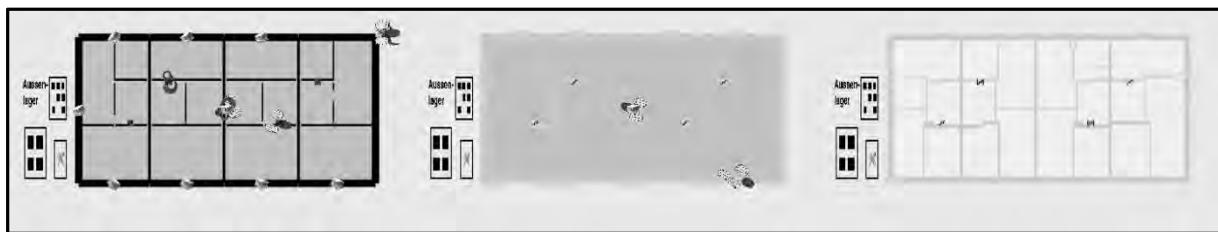


Abbildung 5.7: Situation eines Simulationsmodells während eines Simulationslaufs

Die Situation selbst besteht aus einer 2-D-Karte, so dass die verschiedenen Etagen mehrgeschossiger Gebäude parallel zueinander auf der Karte abgebildet werden (siehe Abbildung 5.7). Ressourcen, die sich über mehrere Etagen erstrecken, wie z. B. Aufzugsschächte, Treppen oder das Außenlager, haben daher mehrere Standpunkte, die sich auf die jeweilige Etage beziehen. In ähnlicher Weise werden die in CiSmo definierten Betriebsmittel in das Simulationsmodell übertragen.

5.4 Modellierung der Teilsysteme

Die Beschreibung der Teilsysteme orientiert sich an der Struktur der Agenten. „*Agenten bestehen aus Sensoren, Effektoren und einer Agentenarchitektur mit assoziierten Wissen*“ (Oechslein 2004, S. 37). Die Agentenarchitektur beschreibt die Anordnung der Datenstrukturen, die Algorithmen und den Kontrollfluss auf dessen Basis der Agent handelt (vgl. Oechslein 2004, S. 37). Die Agenten sind außerdem in eine Organisation mit eingebunden, die beschreibt, welche Rolle die Agenten innerhalb des Modells einnehmen und mit welchen Agenten sie in Interaktionen treten. Dem agentenbasierten Modellierungskonzept folgend wurden die Rollen, das Verhalten und die Organisationsstrukturen der Agenten im entwickelten Modell den entsprechenden Komponenten des realen Systems nachempfunden. Als Basis für die Modellierung wurde die in Kapitel 3 vorgestellte Systemanalyse verwendet.

Die Schnittstellen der Agenten mit anderen Teilsystemen des Modells bestehen aus den Sensoren, den Effektoren und den Interaktionen des Agenten. Mit den Sensoren können Eigenschaften der Umwelt oder von anderen Agenten beobachtet werden. Dadurch ist es dem Agenten möglich auf veränderte Bedingungen in seiner Umgebung zu reagieren. Die Effektoren dienen dazu, selbst Veränderungen an der Umwelt oder an Objekten darin vorzunehmen. Durch die Fähigkeit der Interaktion ist es den Agenten möglich, mit anderen Agenten in der Umgebung Informationen auszutauschen, um z. B. Aufgaben zu verteilen oder Verhandlungen zu führen. *Oechslein (2004, S. 13)* unterscheidet vier Interaktionsformen der Agenten:

1. Den **Ressourcenaustausch**, bei dem ein Agent Ressourcenobjekte erzeugt, die dann von einem anderen Agenten aufgenommen oder wahrgenommen werden.
2. Die **Erzeugung von Agenten**, bei der neue Agenten durch die Umwelt oder durch bereits bestehende Agenten gebildet werden.
3. Die **Manipulation öffentlicher Zustandsvariablen**, bei der von einem Agenten Variablen geändert werden, deren Änderung von einem anderen Agenten wahrgenommen wird.
4. Das **Senden und Empfangen von Nachrichten**, welches über vordefinierte Protokolle geschieht, die die zugelassenen Sprechakte und ihre Bedeutung formalisieren.

In der verwendeten Simulationsumgebung SeSAM wird eine verhaltensbasierte Agentenarchitektur verwendet. Die von den Agenten auszuführenden Aktivitäten werden daher in ein Verhaltensnetz, der sogenannten Reasoning Engine, eingebunden. In der Reasoning Engine wird definiert, unter welchen Bedingungen eine Aktivität ausgeführt wird. Diese Bedingungen können sich sowohl auf interne Zustände als auch auf äußere Einflüsse beziehen, die über Sensoren wahrgenommen werden. Die internen Zustände der Agenten werden durch Zustandsvariablen beschrieben.

Die Sensoren werden zum einen bei der Ausführung von Aktivitäten und zum anderen bei der Prüfung der Bedingungen benötigt. Die Effektoren kommen in Form von Aktionen bei der Ausführung einer Aktivität zum Einsatz. Sowohl die Sensoren wie auch die Effektoren sind dadurch in das Verhaltensnetz mit eingebunden. Die Visualisierung der Agenten kann ebenfalls mit dem Verhalten des Agenten verknüpft werden. Dadurch ist es möglich, Zustandsänderungen oder das Bewegungsverhalten des Agenten darzustellen. In SeSAM können die Agenten mehrere Verhaltensnetze besitzen, die parallel ausgeführt werden. So kann bei-

spielsweise ein Verhaltensnetz den Eingang von Nachrichten registrieren, während sich ein anderes mit der Orientierung in der Umwelt beschäftigt.

Die implementierten Agenten werden im Folgenden durch ihre Variablen, die Organisationsstruktur, welche die Beziehungen, Interaktionen und Rollen beinhaltet, die Verhaltensnetze und die Visualisierung der Agenten beschrieben. Im Detail erläutert werden nur die Weltklasse und die wichtigsten Agenten des Modells. Auf eine Beschreibung der Ressourcen wird verzichtet, da diese nur aus einer Sammlung von zugeordneten Variablen bestehen.

5.4.1 Weltklasse Baustelle

Die Weltklasse Baustelle beschreibt die Eigenschaften und das Verhalten der Umwelt des Simulationsmodells. Insbesondere stellt sie die Informationen bereit, die von den Agenten für die Bauausführung und die Dokumentation des Baugeschehens benötigt werden, wie z. B. die Daten des Prozessmodells und den Zeitablauf. Die Welt verwendet Sensoren die permanent die Uhrzeit und das Datum prüfen, die in der Lage sind, die Datenbankeinträge der CiSmo-Datenbank zu lesen und die Gebäudestruktur in der Situation zu erfassen. Die Effektoren der Welt dienen dazu, den Zeitablauf zu steuern, die Verfahren und Vorgänge aus der Datenbank den Bauteilen zuzuordnen und die für den Bauablauf benötigten Materialien in Form von Ladeeinheiten zu generieren.

Variablen

Die Weltklasse besitzt fast nur öffentliche Variablen, die in erster Linie als Informationsbasis für die verschiedenen Agenten des Modells dienen (siehe Abbildung 5.8).

«world»
Baustelle
-Projekt-ID: String
+Projekteigenschaften: Project
+Bauleiter: Bauleitungsagent
+Wochentag: Weekdayenumeration
+Arbeitsbeginn: Time
+Arbeitszeit: Time
+Arbeitsende: Time
+Anzahl der Geschosse: Double
+Anzahl der Abschnitte: Double
+Gebaeudestruktur: HashTable<>
+DBConnection: DBConnection
-Datenverarbeitung()
-Verwaltung der Systemzeit()

Abbildung 5.8: Variablen und Verhaltensnetze der Weltklasse "Baustelle"

Die Variablen enthalten Informationen für die zeitliche Steuerung des Bauablaufs (z. B. die Uhrzeit des Arbeitsbeginns und des Arbeitsendes, die Arbeitszeit pro Tag und den Wochentag). Außerdem werden in den Variablen der Umwelt Informationen über das Gebäudemodell, wie die Anzahl der Geschosse und der Abschnitte, gespeichert. Speziell für die Sequenzierung des Bauablaufs durch den Bauleiteragenten existiert die Variable *Gebäudestruktur*, die eine Hashtable¹⁶ mit Verweisen auf die Geschosse, Abschnitte, Räume und Bauteile des Gebäudes enthält.

Das Klassendiagramm in Abbildung 5.8 enthält zusätzlich zu den Variablen die Namen der beiden Reasoning Engines „**Datenverarbeitung**“ und „**Verwaltung der Systemzeit**“, die im Unterkapitel Aktivitäten und Verhaltensnetz beschrieben werden.

Organisationsstruktur

Die Welt erstellt zu Beginn die notwendigen Materialien, indem sie Ressourcen in Form von Ladeeinheiten generiert. Weitere Interaktionen finden nur insofern statt, dass die Agenten des Simulationsmodells auf die verschiedenen Variablen der Welt zugreifen.

Aktivitäten und Verhaltensnetz

In der Umwelt werden nach dem Start eines Simulationslaufs zunächst alle erforderlichen Daten aus der SQL-Datenbank ausgelesen. Das Auslesen und das Verarbeiten der Daten geschieht in der Reasoning Engine „**Datenverarbeitung**“ der Umwelt (siehe Abbildung 5.9). In dieser Reasoning Engine werden zu Beginn die Projektdaten gelesen, die das Anfangsdatum des Projekts, Arbeitszeiten und Feiertage definieren. Diese Daten werden von der zweiten Reasoning Engine „**Verwaltung der Systemzeit**“ verwendet. Nach den Projektdaten werden die im Projekt eingesetzten Verfahren mit den zugehörigen Vorgängen und Teilvorgängen ausgelesen. Die Verfahren werden im Folgenden den Bauteilen, die in der Situation enthalten sind, zugewiesen, damit später klar ist, nach welchen Verfahren die Bauteile erstellt werden.

¹⁶ Eine Hashtable enthält eine indexierte Menge von Datenelementen, auf die über einen Schlüssel zugegriffen werden kann.

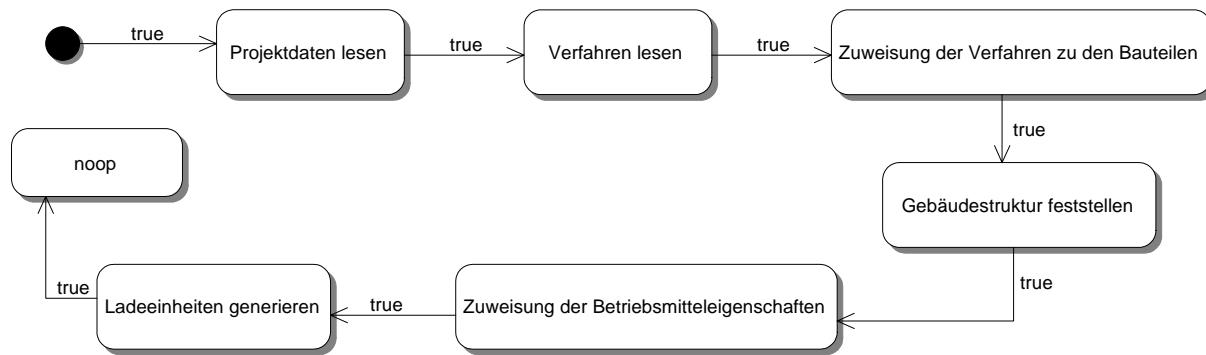


Abbildung 5.9: UML-Aktivitätsdiagramm der Reasoning Engine "Datenverarbeitung"

Danach erzeugt die Umwelt ein Abbild des Gebäudes in der Variablen *Gebaeudestruktur*, in der alle Bauteile den jeweiligen Geschossen, Abschnitten und Räumen zugeordnet werden. Diese Variable enthält Verweise auf die jeweiligen Bauteile, so dass sich später der Bauleitungsagent durch den Zugriff auf diese Variable einen schnellen Überblick über den Bearbeitungszustand des Gebäudes verschaffen kann, um darauf aufbauend zu bestimmen, welche Vorgänge im Folgenden ausgeführt werden können.

Die in der Situation enthaltenen Betriebsmittel sind zu Beginn noch nicht parametrisiert. Lediglich die Variablen mit dem Betriebsmitteltyp und dem Betriebsmittelnamen sowie der Standort auf der Karte der Situation wurden in CiSmo bereits festgelegt. Die anderen Parameter der Betriebsmittel wurden in der Datenbank gespeichert. Die Aktivität „Zuweisung der Betriebsmitteleigenschaften“ liest daher die Parameter der verschiedenen Betriebsmittel aus der Datenbank und weist sie den jeweiligen Betriebsmitteln in der Situation zu. Abschließend generiert die Umwelt die für die Produktion benötigten Materialien in Form von Ladeeinheiten und platziert diese in das Außenlager des Simulationsmodells.

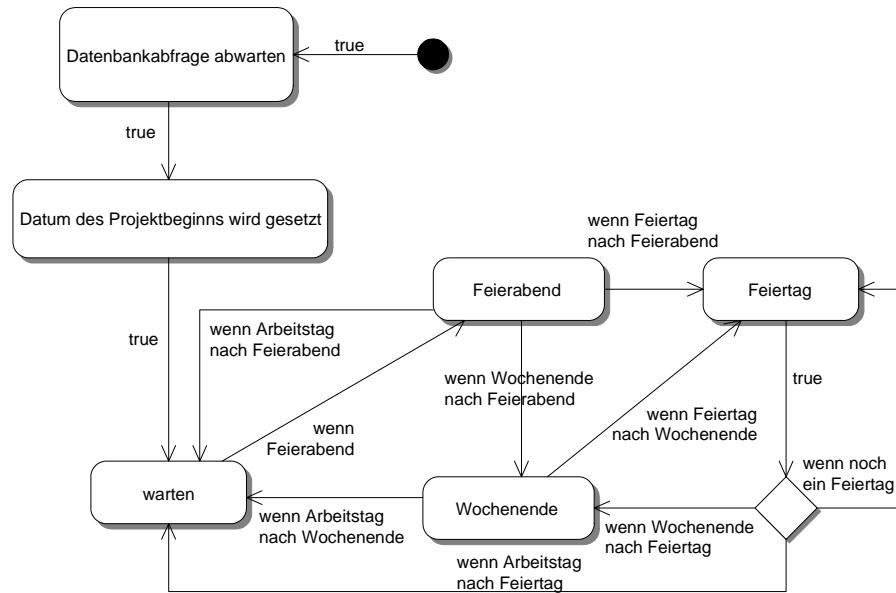


Abbildung 5.10: UML-Aktivitätsdiagramm der Reasoning Engine "Verwaltung der Systemzeit"

Die zweite Reasoning Engine der Umwelt dient der „**Verwaltung der Systemzeit**“ (siehe Abbildung 5.10). Diese Reasoning Engine verwendet die in der vorherigen Reasoning Engine ausgelesenen Projektdaten, um das Datum des Projektbeginns zu setzen und danach alle Zeiten zu überspringen, an denen nicht gearbeitet wird. Beim Erreichen der Uhrzeit für den Feierabend wird beispielsweise die folgende Zeit bis zum neuerlichen Arbeitsbeginn übersprungen und nicht simuliert. In gleicher Weise wird beim Eintritt des Wochenendes oder eines Feiertags verfahren.

5.4.2 Bauleitungsagent

Die Aufgabe des Bauleitungsagenten besteht darin, die anfallenden Bauvorgänge zu sequenzieren und sie auf die verfügbaren Arbeitsgruppenagenten aufzuteilen. Der Bauleitungsagent besitzt daher sowohl Sensoren, die den Bearbeitungsstand des Gebäudes als auch die zur Verfügung stehenden Arbeitsgruppenagenten erfassen.

Die Effektoren des Bauleitungsagenten dienen dazu, den Bearbeitungszustand des Gebäudes zu aktualisieren und am Ende eines Simulationslaufs Einträge in die Ergebnisdatenbank vorzunehmen.

Die Wissensbasis des Bauleitungsagenten besteht aus den Sequenzierungsbedingungen des Prozessmodells, die in seinem Verhaltensnetz verarbeitet werden.

Variablen

In den Variablen des Bauleitungsagenten werden Listen mit den existierenden Arbeitsgruppen (*Arbeitsgruppen*) und mit den Arbeitsgruppen, die momentan ohne Auftrag (*verfügbare Arbeitsgruppen*) sind, gespeichert (siehe Abbildung 5.11). In der Variablen *Auftragsliste* sind alle Aufträge enthalten, die ausgeführt werden können, die aber noch keiner Arbeitsgruppe zugeteilt sind.



Abbildung 5.11: Variablen und Verhaltensnetze der Agentenklasse "Bauleitungsagent"

Alle begonnenen, aber noch nicht abgeschlossenen Aufträge, werden in der Variablen *begonnene Aufträge* und die abgeschlossenen in der Variablen *abgeschlossene Aufträge* abgelegt.

Organisationsstruktur

Die Rolle des Bauleitungsagenten entspricht der Agentenklasse, da nur ein Bauleitungsagent pro Modell vorgesehen ist. Interaktionen führt der Bauleitungsagent mit den Arbeitsgruppenagenten aus. Die Arbeitsgruppenagenten erhalten vom Bauleitungsagenten einen oder mehrere Aufträge. Die Aufträge werden vom Bauleitungsagenten in die öffentliche Variable *Aufträge* des Arbeitsgruppenagenten gesetzt.

Tabelle 5.2: Variablen des zusammengesetzten Datentyps "Auftrag"

Variable	Datentyp
Vorgang	Vorgang (zusammengesetzter Datentyp)
Geschoss	Number<Double>
Abschnitt-Raum	Number<Double>
Bauphase	String
Auswertung	Auswertung (zusammengesetzter Datentyp)

Der Auftrag selbst stellt einen zusammengesetzten Datentypen dar, der aus denen in Tabelle 5.2 abgebildeten Variablen besteht. Er beinhaltet alle Informationen, die eine Arbeitsgruppe

für die Ausführung eines Auftrags benötigt. Der Beginn eines Auftrags wird vom Arbeitsgruppenagenten an den Bauleitungsagenten gemeldet, in dem er den begonnenen Auftrag in die Variable *begonnene Aufträge* des Bauleitungsagenten überträgt.

Wurde ein Auftrag von einem Arbeitsgruppenagenten abgeschlossen, so wird dieses dem Bauleitungsagenten gemeldet, in dem der Auftrag in die öffentliche Variable *momentan abgeschlossene Aufträge* des Bauleitungsagenten geschrieben wird.

In dem zusammengesetzten Datentyp *Auswertung* des Datentyps *Auftrag* sind alle Informationen enthalten, die vom Bauleitungsagenten für die spätere Auswertung des Simulationslaufs benötigt werden.

Aktivitäten und Verhaltensnetz

Der Bauleitungsagent verfügt über zwei verschiedene Reasoning Engines. In der Reasoning Engine „Nachrichtenverarbeitung“ wird der Fortgang des Baugeschehens überwacht und dokumentiert, während in der Reasoning Engine „Auftragsvergabe“ die Vergabe neuer Aufträge an die Arbeitsgruppenagenten erfolgt.

Die Reasoning Engine „Nachrichtenverarbeitung“ startet mit der Aktivität „Voraussetzungen aktualisieren“, in der die Voraussetzungen aller Vorgänge und Verfahren aktualisiert werden (siehe Abbildung 5.15). Jeder Bauabschnitt enthält eine Liste der Verfahren und Vorgänge, die in diesem Abschnitt ausgeführt werden. Die Verfahren und Vorgänge besitzen wiederum Listen, in denen alle Voraussetzungen aufgeführt sind, die erfüllt sein müssen, damit das entsprechende Verfahren oder der Vorgang in dem Bauabschnitt ausgeführt werden kann. In der Aktivität „Voraussetzungen aktualisieren“ werden die erfüllten Voraussetzungen aus den Listen der Vorgänge und Verfahren entfernt. Der Algorithmus für die Prüfung der Voraussetzungen entspricht dem in Abbildung 5.12 dargestellten Pseudocode.

```

 $a = \text{Anzahl der Abschnitte}$ 
For  $i = 1$  to  $a$  {
     $b = \text{Anzahl der Verfahren in Abschnitt } i$ 
     $c = \text{Anzahl der Vorgänge in Abschnitt } i$ 
    For  $j = 1$  to  $b$  {
         $d = \text{Anzahl der Voraussetzungen des Verfahrens } j$ 
        For  $k = 1$  to  $d$  {
            If  $\text{Voraussetzung } k = \text{erfüllt}$  Then {
                Remove  $\text{Voraussetzung } k$  von  $\text{Verfahren } j$ 
            }
        }
        For  $j = 1$  to  $c$  {
             $d = \text{Anzahl der Voraussetzungen des Vorgangs } j$ 
            For  $k = 1$  to  $d$  {
                If  $\text{Voraussetzung } k = \text{erfüllt}$  Then {
                    Remove  $\text{Voraussetzung } k$  von  $\text{Vorgang } j$ 
                }
            }
        }
    }
}

```

Abbildung 5.12: Pseudocode der Aktivität "Voraussetzungen aktualisieren"

Abbildung 5.13 enthält den in der Programmiersprache SeSAM-Impl implementierten Pseudocode aus Abbildung 5.12. Kommentierungen werden durch vorangestellte „\\“ gekennzeichnet.

In der Notation von SeSAM-Impl werden die einzelnen Elemente, die in einer Schleife durchlaufen werden, dem Schleifenkörper hintenangestellt. So ruft in Abbildung 5.13 die Funktion *GetAllObjects(true, true)* am Ende des Codeausschnitts alle Abschnitte des Simulationsmodells auf, die der Schleifenfunktion *ForElements(`[Abschnitt]...`)* zu Beginn nacheinander übergeben werden. In der Abbildung wird die Zusammengehörigkeit zwischen der Schleifenfunktion und der Liste, die von der Schleife iteriert wird, durch eine Verbindungsline gezeichnet.

In der ersten Schleife werden die einzelnen Abschnitte des Gebäudes durchlaufen. In zwei weiteren Schleifen wird für jede Voraussetzung der Verfahren und der Vorgänge in den Abschnitten die benutzerdefinierte Funktion „ProofVoraussetzungAbschnitt“ ausgeführt (siehe Abbildung 5.14). Dieser Funktion werden als Übergabeparameter die Voraussetzung, die Geschoss-Nr. und die Abschnitts-Nr. übergeben.

```

ForElements([Abschnitt]
    Block(
        ForElements([Verfahren]
            ForElements([Voraussetzung]
                RemoveKey(
                    Append(
                        GetComposedTypeValue(Cast(Voraussetzung), vs_vg_id : String [simulation_tbl_voraussetzung]),
                        GetComposedTypeValue(Cast(Voraussetzung), vs_vg_eg_id : String [simulation_tbl_voraussetzung]),
                        GetComposedTypeValue(Verfahren, Voraussetzungen : HashTable<String, Voraussetzung>[Verfahren]));
                Select([Voraussetzung] \\\ ermittelt die erfüllten Voraussetzungen des Verfahrens
                    ProofVoraussetzungAbschnitt(Voraussetzung, GetVariableFrom(Geschoss-Nr, Abschnitt),
                        GetVariableFrom(Abschnitt-Nr, Abschnitt));
                    GetValuesFromHashtable(GetComposedTypeValue(Verfahren, Voraussetzungen
                        : Hashtable<String, Voraussetzung> [Verfahren]))));
                GetValuesFromHashtable(GetVariableFrom(Verfahren, Abschnitt)));
            ForElements([Vorgang]
                RemoveKey(
                    Append(
                        GetComposedTypeValue(Cast(Voraussetzung), vs_vg_id : String [simulation_tbl_voraussetzung]),
                        GetComposedTypeValue(Cast(Voraussetzung), vs_vg_eg_id : String [simulation_tbl_voraussetzung]),
                        GetComposedTypeValue(Vorgang, Voraussetzungen : HashTable<String, Voraussetzung>[Vorgang]));
                Select([VorgangVoraussetzung] \\\ ermittelt die erfüllten Voraussetzungen des Vorgangs
                    ProofVoraussetzungAbschnitt(VorgangVoraussetzung, GetVariableFrom(Geschoss-Nr, Abschnitt),
                        GetVariableFrom(Abschnitt-Nr, Abschnitt));
                    GetValuesFromHashtable(GetComposedTypeValue(Vorgang, Voraussetzungen
                        : Hashtable<String, Voraussetzung> [Vorgang]))));
                GetValuesFromHashtable(GetVariableFrom(Vorgaenge, Abschnitt)));
            GetAllObjects(true, true))
        )
    )
)

```

Abbildung 5.13: Quellcode der Aktivität "Voraussetzungen aktualisieren" in SeSAM-Impl

Die Voraussetzung enthält als komplexer Datentyp alle Daten, die notwendig sind, um ein Ergebnis, das vorliegen muss, damit der aktuelle Vorgang gestartet werden kann, eindeutig zu beschreiben (siehe Tabelle 5.3). Als Rückgabewert liefert die Funktion einen booleschen¹⁷ Wert, der Auskunft darüber gibt, ob die Voraussetzung erfüllt ist. Ist das der Fall, wird die Voraussetzung durch die Funktion „RemoveKey“ aus der Liste der Voraussetzungen des Verfahrens oder des Vorgangs gelöscht.

Die Funktion „ProofVoraussetzungAbschnitt“ ruft zunächst die benutzerdefinierte Funktion „GetAbschnitt“ auf (siehe Abbildung 5.14). Diese erhält als Übergabeparameter ebenfalls die Voraussetzung, die Abschnitts- und die Geschoss-Nr. des aktuellen Vorgangs oder Verfahrens. Als Rückgabewert übergibt die Funktion eine Liste aller Abschnitte, in denen die Voraussetzung erfüllt sein muss.

¹⁷ Der Datentyp „boolean“ kann nur zwei Werte annehmen: *true* (wahr) oder *false* (nicht wahr)

Tabelle 5.3: Variablen des zusammengesetzten Datentyps "Voraussetzung"

Variable	Datentyp
vs_vg_id	String
vs_vg_eg_id	String
geschoss	String
geschossnummer	Number<Integer>
abschnitt	String
abschnittsnummer	Number<Integer>
anordnungsbeziehung	String
zeit_anordnungsbeziehung	String
Projektabhaengig	String
projekt_id	String
vs_vg_typ	String
vs_vg_eg_typ	String

In jedem Abschnitt, der in der Liste enthalten ist, wird nun kontrolliert, ob der für die Voraussetzung relevante Vorgang dort schon abgeschlossen oder begonnen wurde. Überprüft wird in der Funktion zunächst welche Anordnungsbeziehung in der Voraussetzung vorliegt (Anfang-Anfang (A-A), Anfang-Ende (A-E), Ende-Anfang (E-A) oder Ende-Ende (E-E)). Ein Sonderfall liegt vor, wenn in der Voraussetzung eine Fertigungsrichtung beschrieben wird. Dann muss der Vorgang in dem betreffenden Abschnitt begonnen (Status: in Bearbeitung) oder abgeschlossen (Status: Endstatus) sein, damit die Voraussetzung erfüllt ist.

Für die Fälle A-E und E-E liefert die Funktion den Wert „true“ zurück, da diese in der derzeitigen Version des Simulationsmodells noch nicht berücksichtigt werden. Bei den Fällen A-A und E-A wird zusätzlich kontrolliert, ob die Anordnungsbeziehung einen Zeitabstand besitzt. Liegt ein solcher Zeitabstand vor, muss zusätzlich geprüft werden, ob dieser Zeitabstand schon verstrichen ist, denn nur dann gilt die Voraussetzung als erfüllt.

Arguments:

Output: Boolean

Input: Voraussetzung [Voraussetzung], Geschoss [Number<Double>], Abschnitt [Number<Double>]

Function Call:

```

DoWith([Liste])           \ Die Funktion arbeitet mit der in der Funktion „GetAbschnitt“ ermittelten Liste
Or(                      \ Eine der beiden folgenden Bedingungen muss erfüllt sein
  IsEmpty(AsList(Liste)), \ Wenn die Liste leer ist, gilt die Voraussetzung als erfüllt
  Not(Contains            \ Wenn in allen Abs. Ergeb. für die Voraus. vorliegen ebenfalls
    (AsList(Map([Abschnitt]
      - If Then Else(
        Equal(              \ If (Prüfung ob sich die Voraussetzung auf einen Vorgang oder ein Verfahren bezieht)
          GetComposedTypeValue(Cast(Voraussetzung), vs_vg_eg_typ :
            String [simulation_tbl_voraussetzung]),
            „Vorgang“),
          SwitchOnEnum(GetComposedTypeValue(Voraussetzung, Anordnungsbeziehung : \Then
            Anordnungsbeziehung [Voraussetzung]), \ Prüfung für Vorgänge
            If Then Else(
              Or(                  \ case Fertigungsrichtung
                Equal(              \ If
                  GetComposedTypeValue(
                    GetValueForKey(
                      GetComposedTypeValue(Cast(Voraussetzung), vs_vg_eg_id :
                        String [simulation_tbl_voraussetzung]),
                        GetVariableFrom(Vorgaenge, Abschnitt)),
                        Status : Status [Vorgang]), \ Status des Vorgangs
                        in Bearbeitung), \ Vergleichswert
                        Equal(..., Endstatus)), \ Prüfung, ob Vorgang beendet ist
                        true,               \ Then
                        false),             \ Else
                        If Then Else(
                          Or(                  \ If
                            Equal(..., in Bearbeitung), \ Prüfung, ob Vorgang in Bearbeitung ist
                            Equal(..., Endstatus)), \ Prüfung, ob Vorgang beendet ist
                            (...),               \ Then (Zeitabstand wird überprüft (ausgeklammert)
                            false),              \ Else
                            true,                 \ case A-E
                            If Then Else(
                              Equal(..., Endstatus), \ If (Prüfung ob Vorgang beendet ist)
                              (...),               \ Then (Zeitabstand wird überprüft (ausgeklammert))
                              false),              \ Else
                              true)',             \ case E-E
                              SwitchOnEnum(GetComposedTypeValue(Voraussetzung, Anordnungsbeziehung : \Then
                                Anordnungsbeziehung [Voraussetzung]), \ Prüfung für Verfahren
                                (...),                 \ ausgeklammert, da fast identisch mit vorhergehendem
                                Liste),
                                false)))',
                                GetAbschnitt(Voraussetzung, Abschnitt, Geschoss)) \ Liste der Abschnitte wird ermittelt

```

Abbildung 5.14: Quellcode in SeSAM-Impl der benutzerdefinierten Funktion "ProofVoraussetzung"

Die Vorgänge, die gestartet werden können, weil alle Voraussetzungen erfüllt sind, werden als Aufträge in der Variablen *Auftragsliste* zusammengefasst. Der Bauleitungsagent kontrol-

liert nach der Generierung der Auftragsliste, ob alle Aufträge abgeschlossen sind oder ob sich noch neue Aufträge in der Auftragsliste befinden.

Ist das der Fall, beendet der Bauleitungsagent die Simulation und die Daten aller abgeschlossenen Aufträge werden zur Dokumentation und Auswertung des Simulationslaufs in einer eigenen Datenbank gespeichert. Sind noch nicht alle Aufträge abgeschlossen, dann wartet der Bauleitungsagent auf eingehende Nachrichten der Arbeitsgruppen.

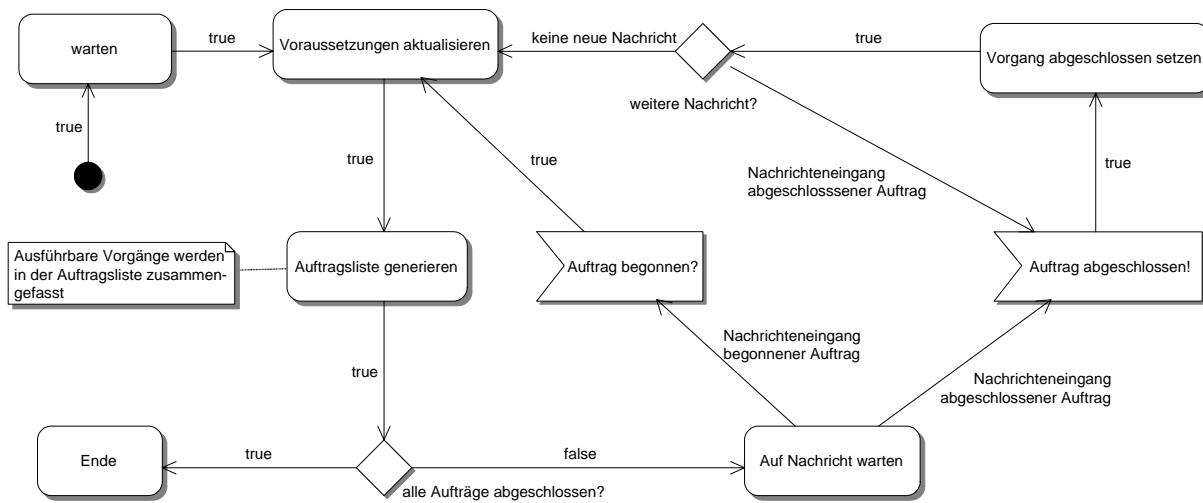


Abbildung 5.15: UML-Aktivitätsdiagramm der Reasoning Engine „Nachrichtenverarbeitung“ des Bauleitungsagenten

Die Arbeitsgruppenagenten können entweder melden, dass sie einen Auftrag abgeschlossen oder einen Auftrag begonnen haben. Beide Meldungen haben einen Einfluss auf den Bearbeitungszustand des Gebäudes und damit auch auf die Voraussetzungen der Vorgänge. Mit dem Eingang einer der beiden Nachrichten, reagiert der Bauleitungsagent mit der Prüfung, ob die Voraussetzungen für die Ausführung neuer Vorgänge erfüllt sind.

Parallel zu diesem Kreislauf stellt der Bauleitungsagent in der Reasoning Engine „**Auftragsvergabe**“ fest, ob in der Auftragsliste neue Aufträge vorhanden sind und ob freie Arbeitsgruppenagenten existieren, die diese Aufträge ausführen können. Ist dies der Fall, dann werden die entsprechenden Aufträge an die Arbeitsgruppenagenten vergeben (siehe Abbildung 5.16).

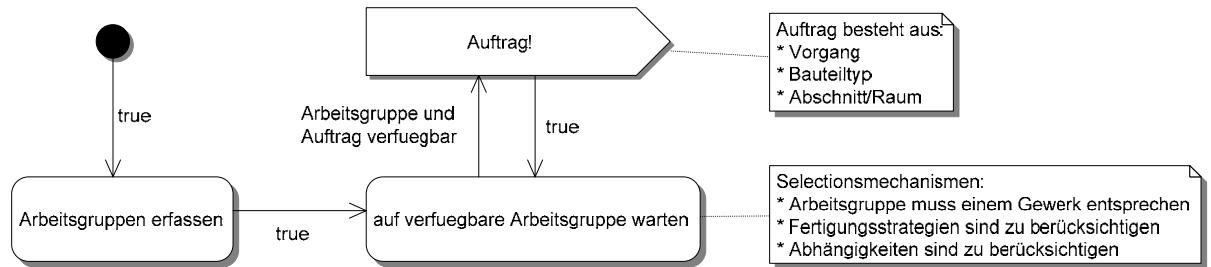


Abbildung 5.16: UML-Aktivitätsdiagramm der Reasoning Engine „Auftragsvergabe“ des Bauleitungsagenten

Visualisierung

Der Bauleitungsagent wird im Simulationsmodell durch ein statisches Bild visualisiert. Bewegungen werden vom Bauleitungsagenten nicht ausgeführt.

5.4.3 Arbeitsgruppenagent

Der Arbeitsgruppenagent ist für die Ausführung der Bauprozesse zuständig. Er ist außerdem dafür verantwortlich, den Transport der notwendigen Ressourcen auf dem Baustellengelände an den Produktionsort zu koordinieren.

Die Sensoren des Arbeitsgruppenagenten dienen in Erster Linie dazu, sich im Gebäude zu orientieren, um z. B. Standorte von Aufzügen und Treppen und die Abschnitte, Räume und Bauteile festzustellen, an denen er seine Arbeiten ausführen soll. Sensoren kommen aber auch zum Einsatz um Betriebsmittel zu identifizieren, die für die anstehenden Transportaufträge verwendbar sind.

Mit seinen Effektoren verändert der Arbeitsgruppenagent den Bearbeitungszustand der Bauteile, verbraucht Material und reserviert Betriebsmittelressourcen. Das für die Ausführung der Vorgänge benötigte Wissen erhält der Arbeitsgruppenagent aus den Auftragsdaten, die er vom Bauleitungsagenten erhält. Dieses Wissen wird im Verhaltensnetz des Agenten verarbeitet.

Variablen

Die Variablen des Arbeitsgruppenagenten beschreiben in erster Linie interne Zustände des Agenten (*Anzahl der Vorarbeiter, Gesellen und Hilfsarbeiter, Motivation und Produktivität*) und Daten, die für die Ausführung des aktuellen Auftrags benötigt werden (*Aufträge, Bedarfsmittelliste, opt. Raumangebot, Vorgang, Teilvergong, Bauteile, Bauteil und Abschnitt/Raum*) (siehe Abbildung 5.17).

«agent» Arbeitsgruppenagent	
+ID: String	
+Gewerk: String	
+Anzahl der Vorarbeiter: Integer	
+Anzahl der Gesellen: Integer	
+Anzahl der Hilfsarbeiter: Integer	
+Aufträge: List<Auftrag>	
-Bedarfsmittelliste: List<Bedarfsmittel>	
-Motivation: Double	
-Produktivitaet: Double	
-optimales Raumangebot [m ²]: Double	
-Leistungsmin. bei ger. Rauman. [%/m ²]: Double	
-Vorgang: Vorgang	
-Teilvorgang: Teilvorgang	
-Bauteile: List<Bauteil>	
-Bauteil: Bauteil	
-Abschnitt/Raum: SimObject	
-Terminvorschlaege: List<Terminangebot>	
-Auftragsbearbeitung()	
-Transportorganisation()	

Abbildung 5.17: Variablen und Verhaltensnetze der Agentenklasse "Arbeitsgruppenagent"

Organisationsstruktur

Jeder Arbeitsgruppenagent besitzt eine feste Rolle in Form eines Gewerks. Die verschiedenen Rollen lehnen sich an die in der VOB Teil C genannten Gewerke an.

Interaktionen führt der Arbeitsgruppenagent mit allen anderen Agentenklassen des Modells durch. Dazu gehören der Bauleitungsagent, die Arbeiteragenten, die Betriebsmittelagenten und die Personen- und Materialaufzugsagenten. Abbildung 5.18 enthält ein Sequenzdiagramm, in dem die Interaktionen des Arbeitsgruppenagenten mit dem Bauleiteragenten, den Betriebsmittelagenten (Turmdrehkran), den Arbeiteragenten und den Personenaufzugsagenten veranschaulicht wird.

Der Arbeitsgruppenagent erhält von dem Bauleitungsagenten seine Aufträge. Die Datenstruktur der Aufträge wurde bereits in Tabelle 5.2 beschrieben. Der Arbeitsgruppenagent informiert den Bauleitungsagenten sobald er einen Auftrag begonnen hat. Danach sucht er den Bauabschnitt auf, in dem der Vorgang des Auftrags ausgeführt wird. Befindet sich dieser Abschnitt in einer anderen Etage des Bauwerks, dann sucht der Arbeitsgruppenagent einen Personenaufzugsagenten auf und fordert diesen an. Bei der Anforderung setzt der Arbeitsgruppenagent eine Variable mit dem zusammengesetzten Datentyp „Aufzugsfahrt“ in die Auftragsliste des Aufzugs (siehe Tabelle 5.4).

Tabelle 5.4: Variablen des zusammengesetzten Datentyps "Aufzugsfahrt"

Variable	Datentyp
Einstieg [Geschoss]	Number<Double>
Ausstieg [Geschoss]	Number<Double>
Anfragender	SimObject

Der Personenaufzugsagent informiert den Arbeitsgruppenagenten sobald dieser die Einstiegsstufe erreicht hat. Die Nachricht wird unter Verwendung des Communication-Plugins an den Arbeitsgruppenagenten versendet und besitzt die Performative¹⁸ „inform“. Nach der Aufzugsfahrt sendet der Personenaufzugsagent erneut eine Nachricht an den Arbeitsgruppenagenten, wenn die Zieltage erreicht wurde. Diese Nachricht besitzt die Performative „confirm“.

Hat der Arbeitsgruppenagent den Bauabschnitt erreicht, in dem er seine Arbeiten ausführen soll, dann stellt er zunächst alle Bedarfsmittel fest, die für die Ausführung des Arbeitsvorgangs benötigt werden. Der Begriff „Bedarfsmittel“ umfasst sowohl die Betriebsmittel als auch die notwendigen Baumaterialien. Für jedes Bedarfsmittel wird eine Transportanfrage an die Betriebsmittelagenten gestellt. Diese Transportanfrage gehört dem zusammengesetzten Datentypen *Transportauftrag-Außenlager* an (siehe Tabelle 5.5). Die Transportanfrage wird in die Variable *Message_Queue_Terminanfrage* des Betriebsmittelagenten gesetzt.

Tabelle 5.5: Variablen des zusammengesetzten Datentyps "Transportauftrag-Außenlager"

Variable	Datentyp
Ladeeinheit [ID]	String
BM/Material [ID]	String
Menge	Number<Double>
Quelle [ID]	String
Senke [ID]	String
Erwartete Dauer [sec]	Number<Double>
Auftraggeber	SimObject

¹⁸ Mit einer *Performative* wird die Verbindung zwischen einer Handlung und dem Nachrichteninhalt konkretisiert. Eine Nachricht mit der *Performative* „inform“ dient z. B. dazu, den Nachrichtenempfänger zu informieren.

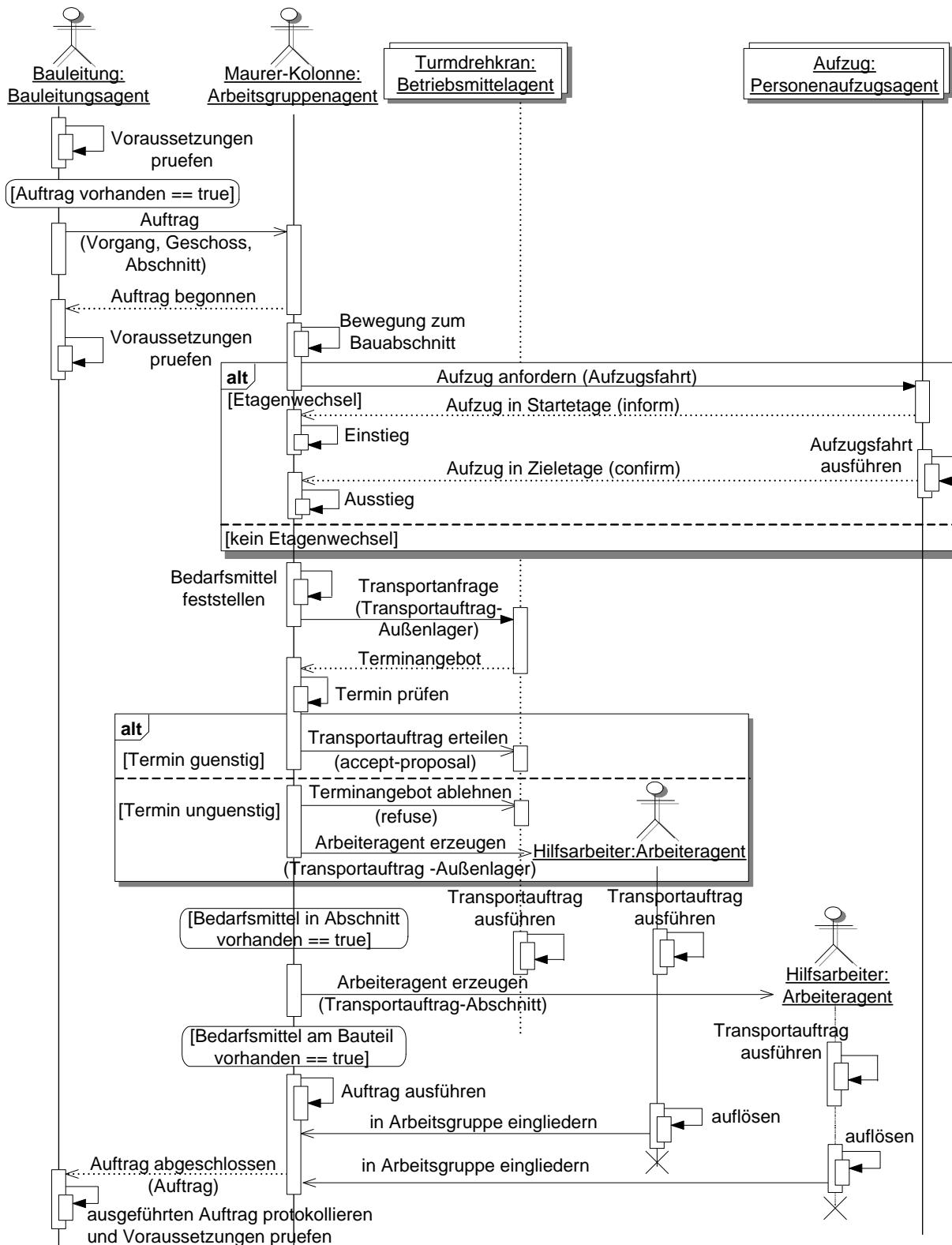


Abbildung 5.18: UML-Sequenzdiagramm der Interaktionen des Arbeitsgruppenagenten

Der Betriebsmittelagent berechnet bis zu welchem Termin er den Transportauftrag abschließen könnte und sendet diesen Termin als Terminangebot an den Arbeitsgruppenagenten zurück. Die Nachricht besitzt den Performative „propose“ und als Inhalt den entsprechenden

Termin, der dafür aus dem zusammengesetzten Datentyp *TimeAndDate* in den Datentyp *String* umgewandelt werden muss.

In der Variable *Terminvorschlaege* des Arbeitsgruppenagenten werden die Terminangebote der verschiedenen Betriebsmittelagenten gesammelt. Die Terminangebote gehören einem eigenen zusammengesetzten Datentypen an (siehe Tabelle 5.6).

Tabelle 5.6: Variablen des zusammengesetzten Datentyps "Terminangebot"

Variable	Datentyp
Betriebsmittel	SimObject
Termin	TimeAndDate

Danach werden die eingegangenen Terminangebote vom Arbeitsgruppenagenten geprüft. Ist eines der Terminangebote der Betriebsmittel günstiger als der Transport durch Mitglieder der eigenen Arbeitsgruppe, dann wird dieses Terminangebot angenommen. Der Arbeitsgruppenagent sendet dann eine Nachricht mit der Performative „accept-proposal“ an den Betriebsmittelagenten mit dem günstigsten Terminangebot. Die übrigen Betriebsmittelagenten erhalten eine Nachricht mit der Performative „refuse“ als Absage (siehe Abbildung 5.18).

Sind alle Terminangebote der Betriebsmittelagenten ungünstiger als der Transport durch Arbeitskräfte der Arbeitsgruppe, dann werden einzelne Arbeiteragenten vom Arbeitsgruppenagenten getrennt und erhalten einen Transportauftrag. Dabei wird eine Variable des zusammengesetzten Datentyps *Transportauftrag-Außenlager* in die Variable *Transportauftrag-Außenlager* des Arbeiteragenten gesetzt. Die Anzahl der Arbeitsgruppenmitglieder verringert sich um eine Person. Nachdem der Arbeiteragent seinen Transportauftrag ausgeführt hat, gliedert er sich wieder in den Arbeitsgruppenagenten ein, indem die Anzahl der Arbeitsgruppenmitglieder um eins erhöht wird. Der Arbeiteragent löst sich direkt danach auf.

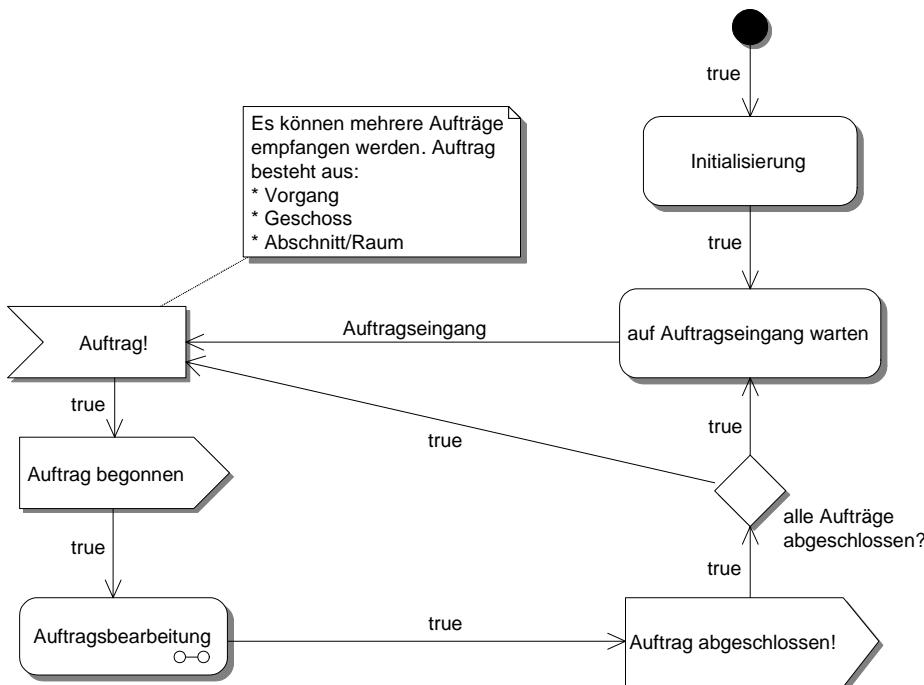
Sind die für die Bauausführung benötigten Bedarfsmittel im Bauabschnitt vorhanden, dann beauftragt der Arbeitsgruppenagent einzelne Mitglieder der Arbeitsgruppe mit dem Transport der Materialien aus dem Zwischenlager im Abschnitt zu der Einbaustelle. Der Arbeitsgruppenagent setzt dafür eine Variable des zusammengesetzten Datentyps *Transportauftrag-Abschnitt* in die gleichnamige Variable des Arbeiteragenten (siehe Tabelle 5.7). Nach Ausführung dieses Auftrags löst sich der Arbeiteragent wieder auf.

Tabelle 5.7: Variablen des zusammengesetzten Datentyps "Transportauftrag-Abschnitt"

Variable	Datentyp
Ladeeinheit	SimObject
Bedarfsmittel	Bedarfsmittel (zusammengesetzter Datentyp)

Aktivitäten und Verhaltensnetz

Das Verhalten des Arbeitsgruppenagenten wird in den Reasoning Engines „Auftragsverarbeitung“ und „Transportorganisation“ definiert. Beide Reasoning Engines sind hierarchisch aufgebaut, d. h., dass sie aus mehreren ineinander verschachtelten Diagrammen bestehen. Symbolisiert eine Aktivität ein komplettes Unterdiagramm, wird dieses in dem übergeordneten Diagramm durch einen Aktivitätsgraphknoten dargestellt. Dieser enthält unter dem Aktivitätsnamen zwei Kreise, die durch einen Strich miteinander verbunden sind (siehe Aktivitätsgraphknoten „Auftragsbearbeitung“ in Abbildung 5.19).

**Abbildung 5.19: UML-Aktivitätsdiagramm der Reasoning Engine „Auftragsverarbeitung“ des Arbeitsgruppenagenten**

Die in der Situation enthaltenen Arbeitsgruppenagenten warten zu Beginn eines Simulationslaufs darauf einen Auftrag von der Bauleitung zu empfangen. Wird einer der angenommenen Aufträge begonnen, dann sendet der Arbeitsgruppenagent eine Nachricht an den Bauleitungs-

agenten, um diesen über den Beginn der Arbeiten zu informieren. Danach tritt der Arbeitsgruppenagent in die Auftragsbearbeitung ein, die durch das Unterdiagramm in Abbildung 5.20 dargestellt wird.

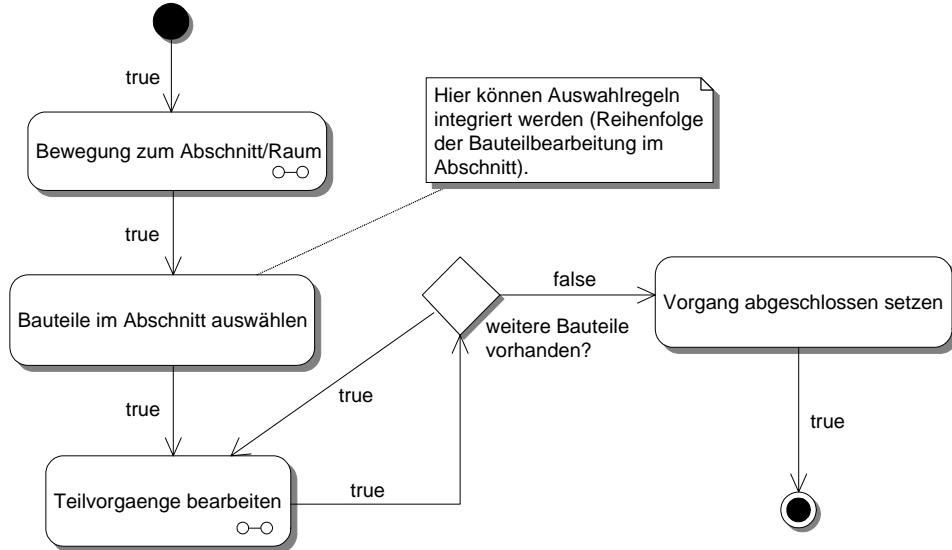


Abbildung 5.20: Unterdiagramm „Auftragsbearbeitung“ des Arbeitsgruppenagenten

Zunächst bewegt sich der Arbeitsgruppenagent in den Abschnitt oder den Raum, in dem der zu dem Auftrag gehörige Vorgang ausgeführt werden soll. Der Ablauf des Aktivitätsgraphknotens „Bewegung zum Abschnitt/Raum“ wird im Unterdiagramm in Abbildung 5.21 dargestellt.

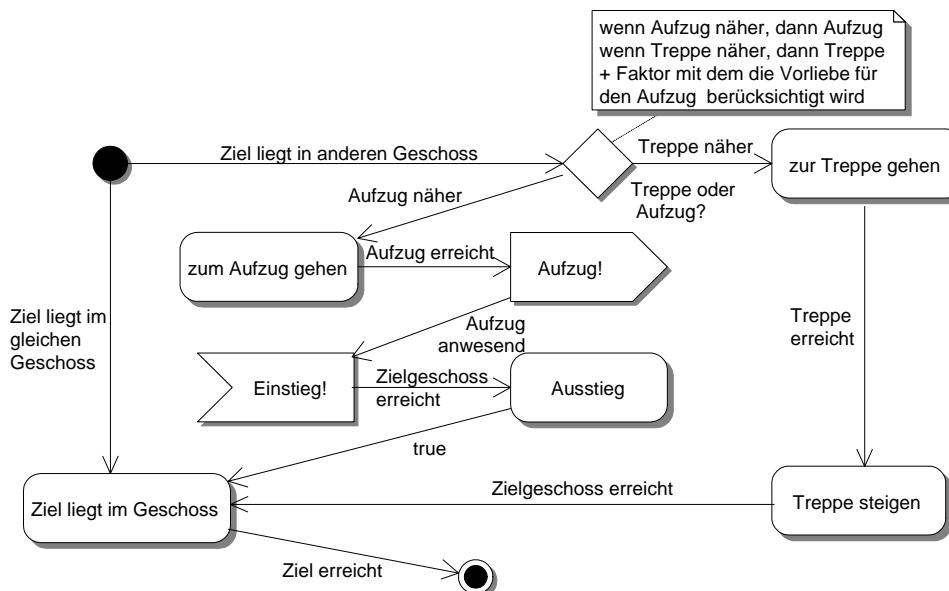


Abbildung 5.21: Unterdiagramm „Bewegung zum Abschnitt“ des Arbeitsgruppenagenten

Danach wird das erste Bauteil im Abschnitt oder im Raum ausgewählt, das bearbeitet werden soll. An diesem Bauteil werden im Folgenden die Teiltätigkeiten des aktuellen Vorgangs abgearbeitet (siehe Unterdigramm in Abbildung 5.22). Sind mehrere Bauteile vorhanden, so wird die Bearbeitung der Teiltätigkeiten an allen Bauteilen entsprechend oft wiederholt.

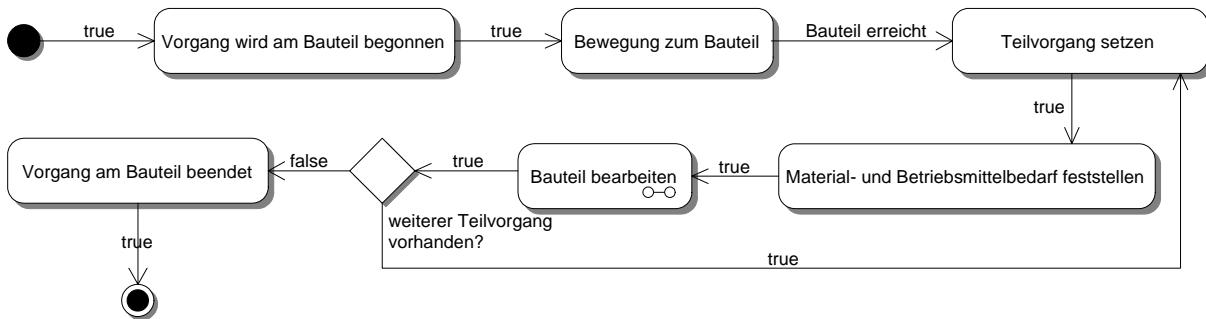


Abbildung 5.22: Unterdigramm „Teiltätigkeiten bearbeiten“ des Arbeitsgruppenagenten

Nachdem der Arbeitsgruppenagent das Bauteil erreicht hat, wird der Bedarf an Materialien und Betriebsmitteln für die Ausführung des Teiltätigkeits festgestellt und in der Variablen *Bedarfsmittelliste* gespeichert. Auf Grundlage dieser Bedarfsmittelliste stellt der Arbeitsgruppenagent in der Reasoning Engine „**Transportorganisation**“ Lieferanfragen an die Betriebsmittelagenten, die Materiallieferungen durchführen können.

Die Bearbeitung des Bauteils wird in dem Unterdigramm „Bauteil bearbeiten“ dargestellt. Zu Beginn der Bauteilbearbeitung wird der Arbeitszeitbedarf entsprechend denen in CiSmo für die Arbeitszeit definierten Parametern stochastisch ermittelt (siehe Abbildung 5.23). Ist das benötigte Arbeitsmaterial bereits am Bauteil eingetroffen, bewegt sich der Arbeitsgruppenagent direkt zum Bauteil und beginnt die Bauteilbearbeitung. Ist noch kein Material vorhanden wartet der Arbeitsgruppenagent auf die Anlieferung in ein gebäudeinternes Zwischenlager, welches sich im Abschnitt befindet, in dem die Bearbeitung stattfindet. Ist das Material im Abschnitt eingetroffen, werden einzelne Mitglieder in Form von Arbeiteragenten mit dem Transport der Materialien vom Zwischenlager zum Bauteil beauftragt.

Ist genug Material am Bearbeitungsort eingetroffen, beginnt der Arbeitsgruppenagent mit der Bauteilbearbeitung, während einzelne Arbeiteragenten parallel die restlichen Materialien anliefern. Nach der Beendigung des Teiltätigkeits am Bauteil wird überprüft, ob weitere Teiltätigkeiten am Bauteil auszuführen sind (siehe Abbildung 5.22). Ist dies nicht der Fall, wird der Vorgang am Bauteil als beendet gesetzt.

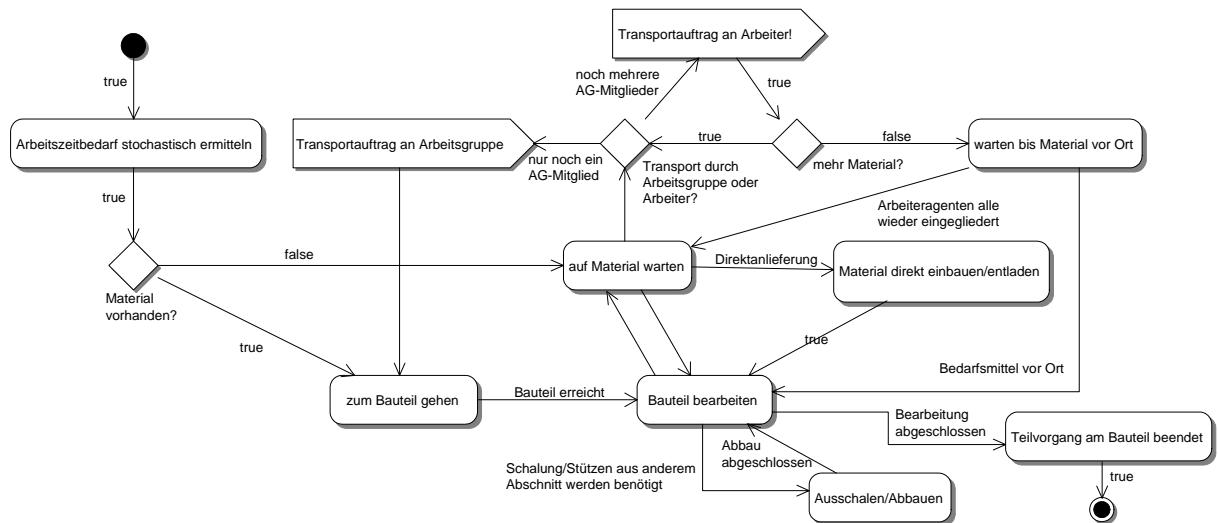


Abbildung 5.23: Unterdiagramm „Bauteil bearbeiten“ des Arbeitsgruppenagenten

Sind auch keine weiteren Bauteile im Abschnitt vorhanden, die bearbeitet werden müssen (siehe Abbildung 5.20), so wurde der aktuelle Auftrag komplett ausgeführt. Die Nachricht über die Beendigung der Arbeiten sendet der Arbeitsgruppenagent an den Bauleiteragent in der Aktivität „Auftrag abgeschlossen“ (siehe Abbildung 5.16). Zuvor werden alle Daten, die zur Auswertung benötigt werden (Anfangs- und Endzeit der Auftragsbearbeitung, Dauer [min], eingesetzte Bedarfsmittel und Arbeitsgruppe) in der Auftragsvariablen gespeichert, die als Nachricht zurück an den Bauleitungsagenten geht. Der zusammengesetzte Datentyp *Auftrag* enthält zu diesem Zweck die Variable *Auswertung* (siehe Tabelle 5.2 auf S. 148), die den zusammengesetzten Datentyp *Auswertung* besitzt (siehe Tabelle 5.8).

Tabelle 5.8: Variablen des zusammengesetzten Datentyps "Auswertung"

Variable	Datentyp
Anfang	TimeAndDate
Ende	TimeAndDate
Dauer [min]	Number<Double>
Bedarfsmittel	List<Bedarfsmittel>
Arbeitsgruppe	SimObject

Parallel zu der Bearbeitung der Arbeitsaufträge in der Reasoning Engine „Auftragsverarbeitung“ findet in der Reasoning Engine „Transportorganisation“ die Bestellung der notwendigen Materialien und Betriebsmittel statt (siehe Abbildung 5.24).

Die benötigten Materialien und Betriebsmittel werden in der bereits erwähnten Bedarfsmitteliste zusammengefasst. Ist in der Liste ein Element vorhanden, dann wird die Aktivität „warten“ der Reasoning Engine „Transportorganisation“ verlassen (siehe Abbildung 5.24). In dem Unterdiagramm „Terminanforderung“ wird an alle Betriebsmittel, die die benötigten Bedarfsmittel liefern können, eine Terminanforderung gestellt (siehe Abbildung 5.25). Für die Kommunikation zur Terminabsprache zwischen Arbeitsgruppen- und Betriebsmittelagent wird der zusammengesetzte Datentyp *Transportauftrag-Außenlager* verwendet. Dieser Datentyp beinhaltet die Menge und den Typ der Bedarfsmittel sowie die Quelle und die Senke des Materialtransports (siehe Tabelle 5.5).

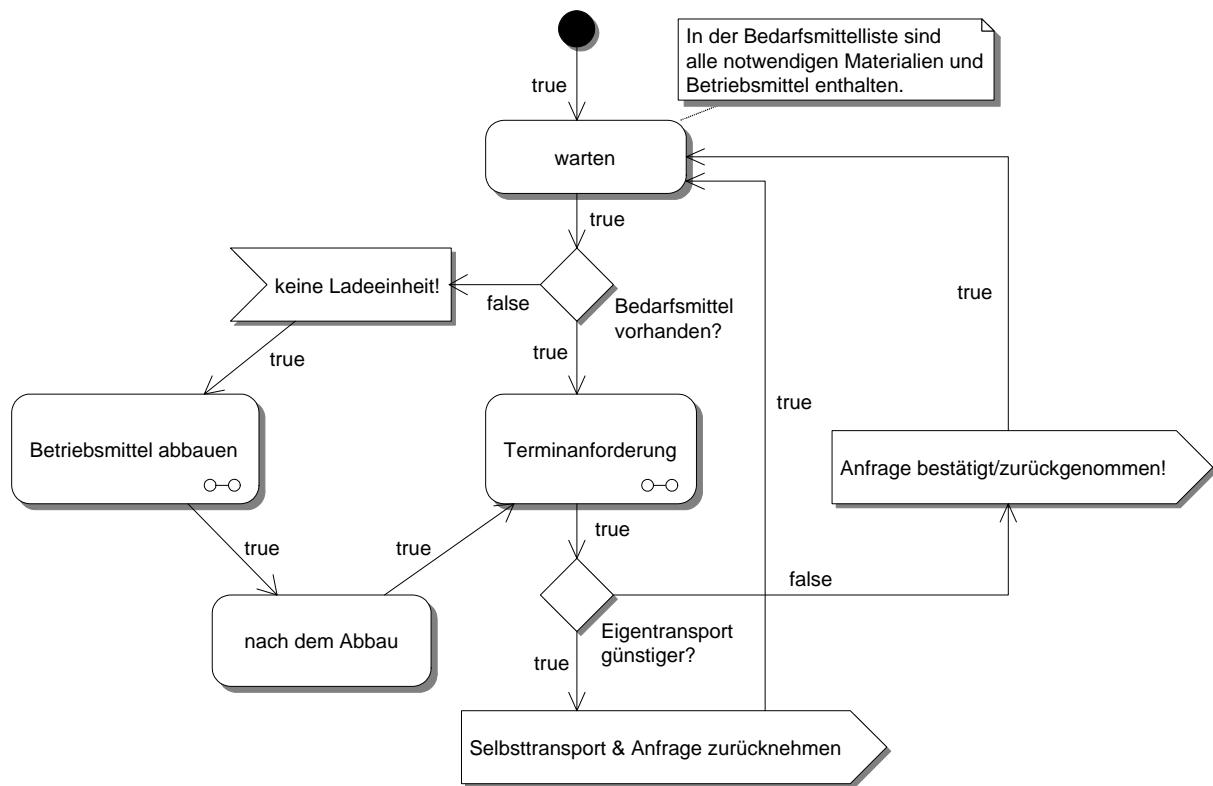


Abbildung 5.24: UML-Aktivitätsdiagramm der Reasoning Engine „Transportorganisation“ des Arbeitsgruppenagenten

Auf die Terminanforderung antworten die Betriebsmittel mit einem Terminvorschlag, der den Zeitpunkt angibt, an dem die Lieferung abgeschlossen werden kann. Dieser Zeitpunkt ist vor allen Dingen von der Geschwindigkeit und der Auslastung des Betriebsmittels abhängig. Sind alle Terminvorschläge eingegangen, bewertet der Arbeitsgruppenagent die Termine und wählt den günstigsten aus. Danach wird überprüft, ob es eventuell einen zeitlichen Vorteil bringt, den Transport durch Mitglieder der eigenen Arbeitsgruppe durchführen zu lassen.

Ist dies der Fall, dann wird ein Transportauftrag an einzelne Arbeiteragenten des Arbeitsgruppenagenten weitergeleitet und die Anfrage an die Betriebsmittelagenten zurückgenommen. Ist das nicht der Fall, wird der Betriebsmittelagent mit dem besten Terminvorschlag mit der Lieferung beauftragt.

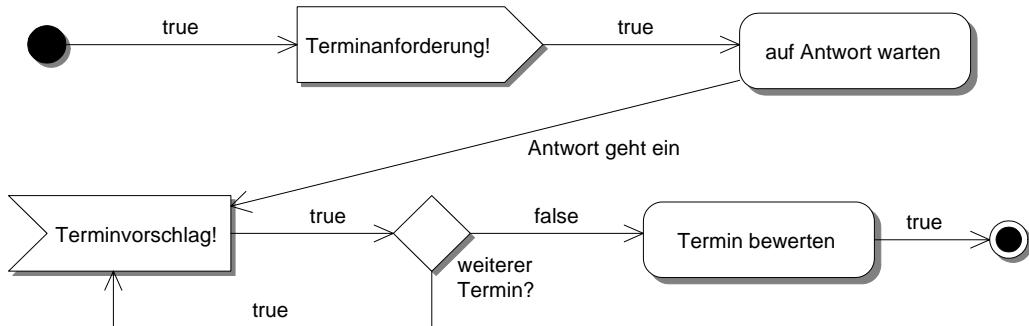


Abbildung 5.25: Terminanforderung

Visualisierung

Der Arbeitsgruppenagent wird durch drei Bauhelme visualisiert. Die Bewegungen des Arbeitsgruppenagenten werden anhand der Koordinaten des Agenten in der Animation dargestellt. Bei einem Etagenwechsel über die Treppe oder den Aufzug wird der neue Standort des Arbeitsgruppenagenten im 2-D-Gebäudemodell berechnet und dargestellt.

5.4.4 Arbeiteragent

Der Arbeiteragent wird ausschließlich für die Ausführung logistischer Vorgänge eingesetzt. Diese Transportvorgänge werden in zwei unterschiedliche Typen eingeteilt:

- Transportvorgänge vom Außenlager in den aktuellen Bauabschnitt
- Transportvorgänge innerhalb des aktuellen Bauabschnitts

Der Arbeiteragent besitzt für die Ausführung der Transportvorgänge Sensoren, die den Standort von Ladeeinheiten mit den zu transportierenden Bedarfsmitteln feststellen. Eine Ladeeinheit ist eine Ressource, die eine größere Materialmenge bei Transportvorgängen zusammenfasst. Instanzen der Ressourcenklasse „Ladeeinheit“ können z. B. Pakete, Paletten oder Kartons sein.

Die weiteren Sensoren des Arbeiteragenten dienen der Erfassung der Koordinaten der Bauabschnitte, der Arbeitsgruppenagenten und der Treppen und Aufzüge.

Mit seinen Effektoren ist der Arbeiteragent in der Lage Betriebsmittel zu reservieren, die er für die Ausführung der Transportvorgänge benötigt, sowie Ladeeinheiten und kleinere Materialmengen zu transportieren.

Variablen

Die Variablen des Arbeiteragenten enthalten Informationen, die den Transportauftrag betreffen (*Transportauftrag-Außenlager*, *Transportauftrag-Abschnitt*, *Betriebsmittel*, *Materialtransport*, *Ladung* und *nächste Ladung*) und Variablen, die eine Zuordnung des Agenten zu einer Arbeitsgruppe und dem von der Arbeitsgruppe aktuell bearbeiteten Bauteil und Teilvergang ermöglichen (*Arbeitsgruppe*, *Teilvorgang*, *Bauteil* und *Abschnitt/Raum*). Der Arbeiteragent besitzt nur eine einzige Reasoning Engine mit dem Namen „**Transportauftrag ausführen**“ (siehe Abbildung 5.26).

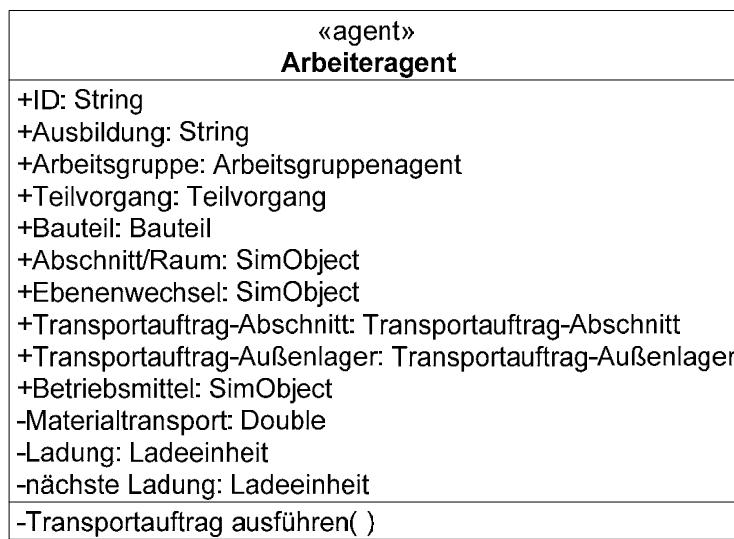


Abbildung 5.26: Klassendiagramm des Arbeiteragenten

Organisationsstruktur

Der Arbeiteragent wird als Holon¹⁹ des Arbeitsgruppenagenten nur in bestimmten Situationen erzeugt. Er existiert daher nur temporär während des Simulationslaufs. Der Arbeitsgruppenagent generiert einen Arbeiteragenten immer dann, wenn er in dessen Auftrag einen Transportauftrag ausführen soll. Für den Arbeiteragenten existieren insgesamt drei Rollen, die des Hilfsarbeiters, des Gesellen und des Vorarbeiters. Die Rollen unterscheiden sich im Hinblick auf ihre Motivation und ihre Produktivität.

¹⁹ Ein Holon bezeichnet ein in sich geschlossenes System, dass ein Bestandteil eines größeren Systems ist.

Interaktionen führt der Arbeiteragent mit dem Arbeitsgruppenagenten, den Betriebsmittelressourcen und dem Personenaufzugsagenten durch (siehe Abbildung 5.27).

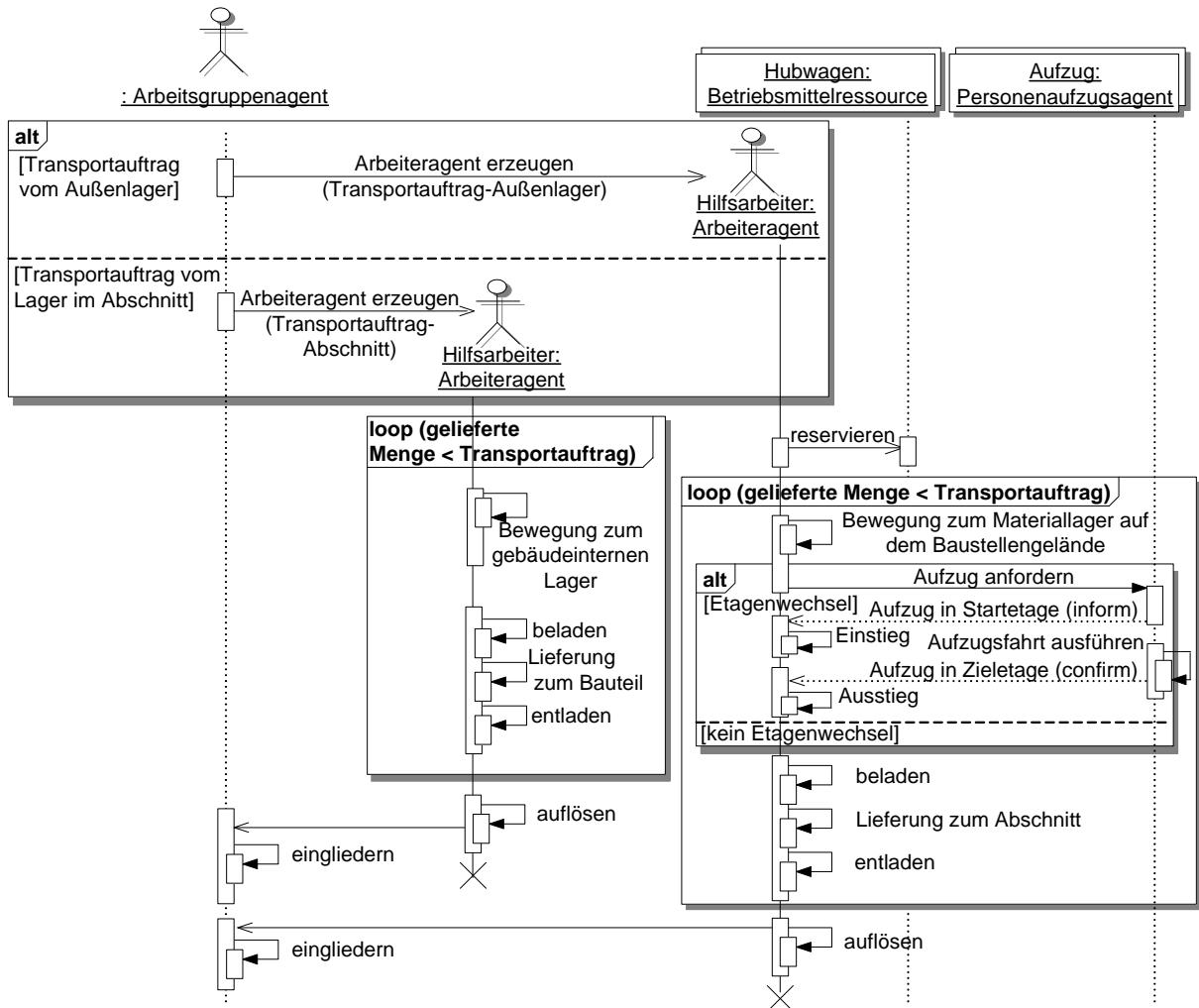


Abbildung 5.27: UML-Sequenzdiagramm der Interaktionen des Arbeiteragenten

Für den Transport größerer Ladeeinheiten verwendet der Arbeiteragent Betriebsmittelressourcen, wie beispielsweise den Hubwagen. Dieser wird vor der Ausführung des Transportauftrags reserviert. Um einen Etagenwechsel zu vollziehen, tritt er in Interaktion mit dem Personenaufzugsagenten. Die Kommunikation zwischen dem Arbeiter- und dem Personenaufzugsagenten entspricht der bereits beschriebenen Kommunikation zwischen Arbeitsgruppen- und Personenaufzugsagenten.

Aktivitäten und Verhaltensnetz

Gleich zu Beginn seiner Existenz erhält der Arbeiteragent einen Transportauftrag, der entweder dem zusammengesetzten Datentypen *Transportauftrag-Außenlager* (siehe Tabelle 5.5, S.

157) oder *Transportauftrag-Abschnitt* entspricht (siehe Tabelle 5.7, S. 160). Je nach übermitteltem Datentypen führt der Arbeiteragent verschiedene Transportvorgänge aus.

Der *Transportauftrag-Außenlager* beinhaltet den Transport ganzer Ladeeinheiten von Materialien oder Betriebsmitteln vom Außenlager in das gebäudeinterne Zwischenlager, während ein *Transportauftrag-Abschnitt* lediglich den Transport vom Material oder Betriebsmitteln innerhalb eines Abschnitts vom gebäudeinternen Zwischenlager zu der Arbeitsstelle darstellt (siehe Abbildung 5.28).

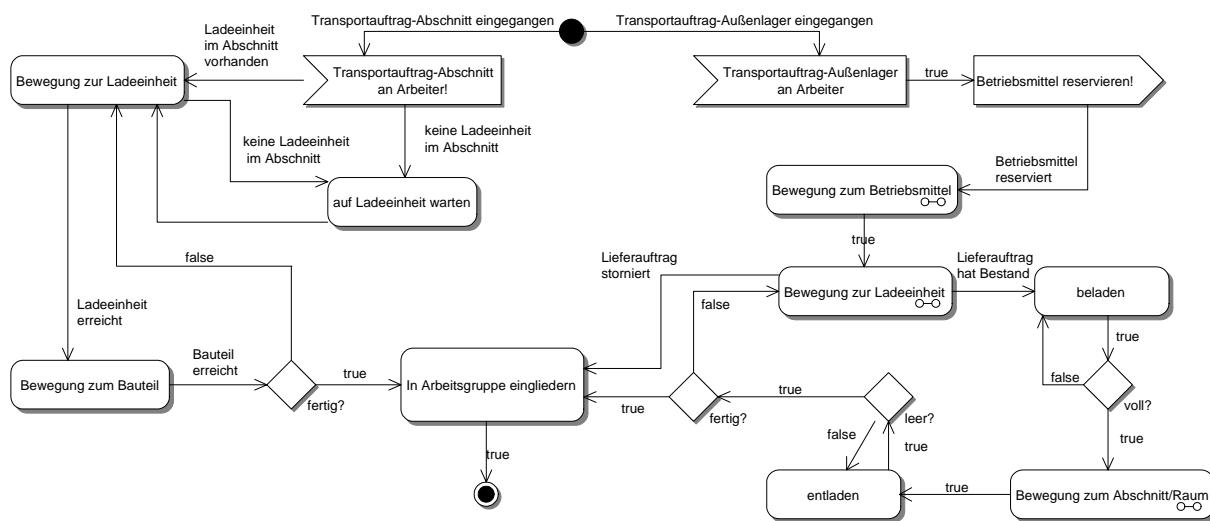


Abbildung 5.28: UML-Aktivitätsdiagramm der Reasoning Engine „Transportauftrag ausführen“ des Arbeiteragenten

Nach dem Abschluss des Transport- oder des Lieferauftrags gliedert sich der Arbeiteragent wieder selbstständig in seine Arbeitsgruppe ein und beendet damit seine Existenz im Simulationslauf.

Visualisierung

Der Arbeiteragent wird durch einen einzelnen Bauhelm visualisiert, dessen Standort sich entsprechend den Koordinaten des Arbeiteragenten in der Animation verändert. Ein Etagenwechsel wird wie beim Arbeitsgruppenagenten berechnet und dargestellt.

5.4.5 Betriebsmittelagent

Die Betriebsmittelagenten führen logistische Vorgänge im Auftrag der Arbeitsgruppenagenten durch. Ihre Sensoren können daher den Standort von Materialquellen, wie Ladeeinheiten

und Lagerplätzen, und den Standort der Zielorte, wie den Bauabschnitten und den Bauteilen, feststellen.

Ihre Effektoren dienen dazu Ladeeinheiten aufzunehmen, zu transportieren und wieder zu entladen. In dem prototypischen Simulationsmodell wurde als wichtigstes Betriebsmittel zunächst der Kran implementiert.

Variablen

Die Variablen des Betriebsmittelagenten beinhalten in erster Linie Leistungskennzahlen des Betriebsmittels (*Verteilung Lastfahrt*, *Verteilung Leerfahrt*, *Verteilung Be- und Entladung*).

Die Variablen *Position* und *Auslegerlänge* geben Auskunft über den Standort des Betriebsmittels und welchen Radius es auf dem Baustellengelände erreichen kann. Die Variable *Ladeeinheiten* beschreibt, welche Ladeeinheiten das Betriebsmittel transportieren kann. Die Variable *Auftragsliste* beinhaltet alle anstehenden Aufträge und die Variable *Gesamtladung*, die aktuelle Ladung des Betriebsmittels. Die Variablen *Anfragen* und *Message_Queue_Terminanfragen* dienen der Kommunikation.

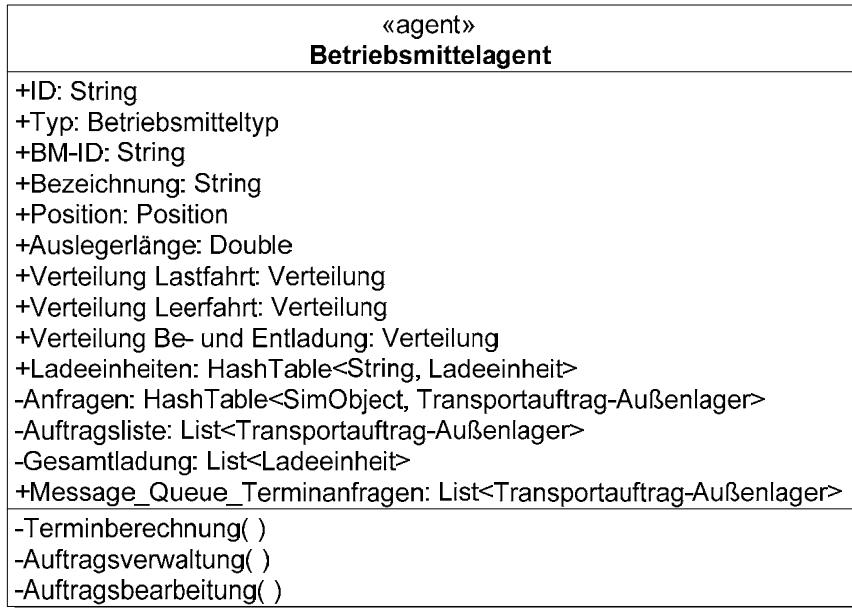


Abbildung 5.29: Klassendiagramm des Betriebsmittelagenten

Organisationsstruktur

Die auf der Baustelle verwendeten Betriebsmittel werden nicht einheitlich aus einer Agenten- oder Ressourcenklasse instanziert, da die Eigenschaften und Funktionen der Betriebsmittel sehr unterschiedlich sein können. Die passiven Betriebsmittel (wie z. B. Schalungselemente

und Hubwagen), die in keine aktive Interaktion mit den anderen Simulationsobjekten treten, werden als Instanzen der Ressourcenklasse „Betriebsmittelressource“ gebildet (siehe Abbildung 5.30). Aktive Betriebsmittel, die beispielsweise selbstständig Transportaufträge durchführen, werden von der Agentenklasse „Betriebsmittelagent“ instanziert. Der Betriebsmittelagent kann eine Reihe unterschiedlicher Rollen einnehmen, wie die des Kranagenten, des Gabelstapleragenten und des Betonpumpenagenten. Für sehr spezialisierte Betriebsmittel, wie den Personen- oder den Materialaufzug, existieren eigene Agentenklassen.

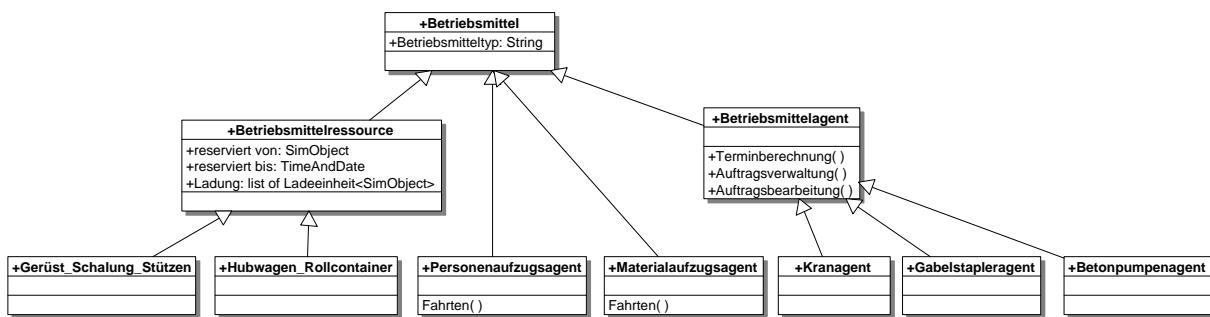


Abbildung 5.30: Klassendiagramm der Betriebsmitteltypen

Interaktionen führt der Betriebsmittelagent nur mit dem Arbeitsgruppenagenten aus (siehe Sequenzdiagramm in Abbildung 5.18, S. 158). Die Interaktionen zwischen den beiden Agententypen wurden bereits im Unterkapitel „Organisation“ des Arbeitsgruppenagenten beschrieben.

Aktivitäten und Verhaltensnetz

Der Betriebsmittelagent verfügt über insgesamt drei verschiedene Reasoning Engines, die „Terminberechnung“, die „Auftragsverwaltung“ und die „Auftragsbearbeitung“.

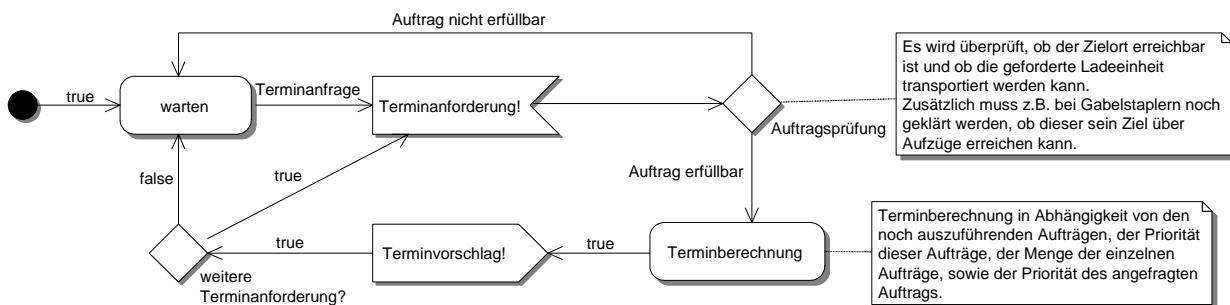


Abbildung 5.31: UML-Aktivitätsdiagramm der Reasoning Engine „Terminberechnung“ des Betriebsmittelagenten

In der Terminberechnung wartet der Betriebsmittelagent auf eingehende Terminanforderungen für Lieferaufträge (siehe Abbildung 5.31). Geht ein Auftrag ein, so wird zunächst überprüft, ob der Auftrag prinzipiell erfüllbar ist. Danach erfolgen die Terminberechnung und die Rücksendung des berechneten Terminvorschlags an den Arbeitsgruppenagenten.

In der Reasoning Engine „Auftragsverwaltung“ werden die angenommenen oder abgelehnten Terminvorschläge der Arbeitsgruppenagenten empfangen (siehe Abbildung 5.32). Alle bestätigten Anfragen werden in die Auftragsliste des Betriebsmittelagenten übernommen.

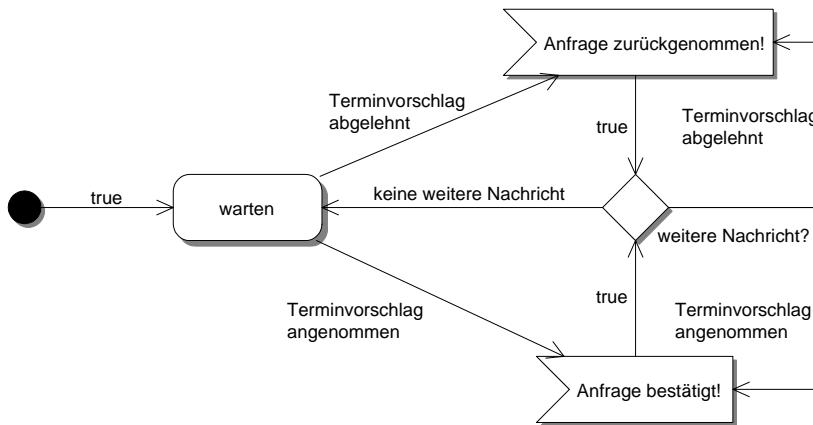


Abbildung 5.32: UML-Aktivitätsdiagramm der Reasoning Engine „Auftragsverwaltung“ des Betriebsmittelagenten

Diese Aufträge werden danach in der Reasoning Engine „Auftragsbearbeitung“ abgearbeitet (siehe Abbildung 5.33).

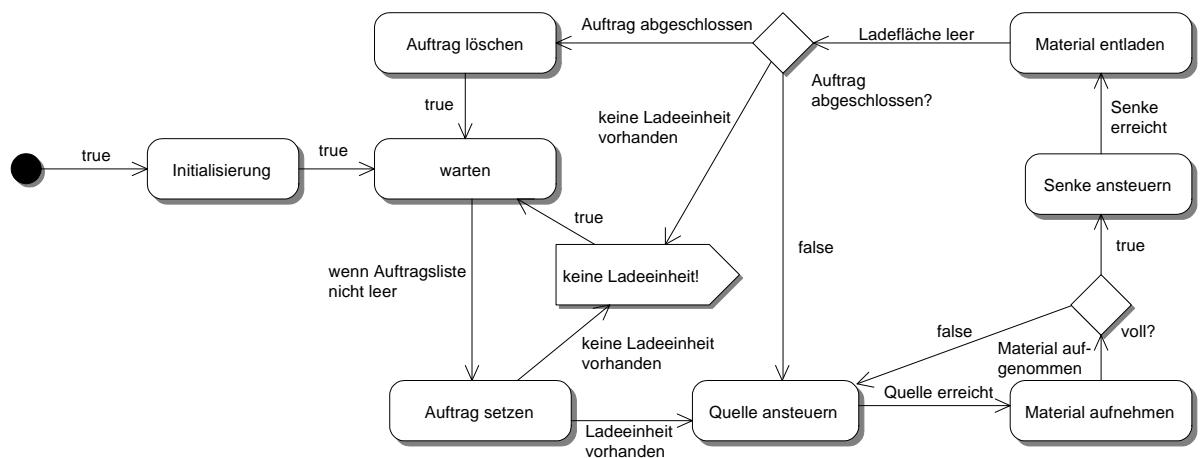


Abbildung 5.33: UML-Aktivitätsdiagramm der Reasoning Engine „Auftragsbearbeitung“ des Betriebsmittelagenten

Visualisierung

Der Betriebsmittelagent wird durch einen Krankübel symbolisiert, der den Standort der Laufkatze angibt.

5.5 Erforderliche Modelldaten

5.5.1 Eingabe- und Ausgabegrößen

Als **Eingabegrößen** verwendet das Simulationsmodell zum einen die Daten aus der in Kapitel 4.3.3 beschriebenen Datenbank (Prozess- und Ressourcendaten) und zum anderen die Daten, die in der Ausgangskonfiguration des Simulationsmodells (Situation) enthalten sind (siehe Abbildung 5.34). Beide Datenquellen können in der Anwendung CiSmo bearbeitet werden.

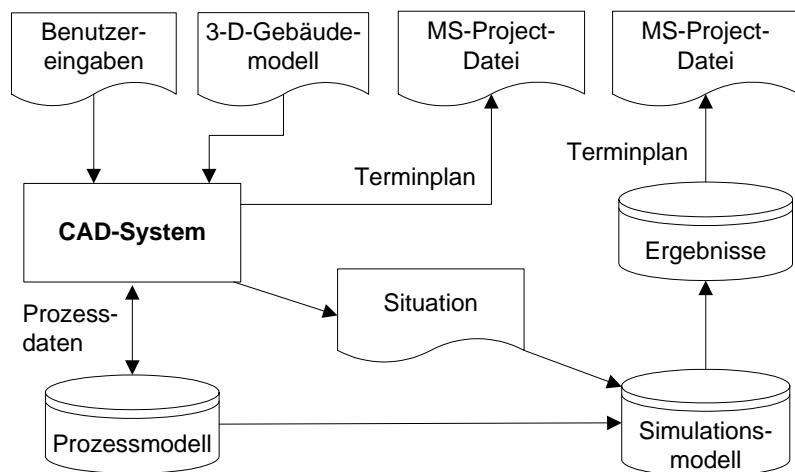


Abbildung 5.34: Eingabe- und Ausgabegrößen des Simulationsmodells

Die für das Simulationsmodell benötigten Eingabedaten lassen sich in vier verschiedene Typen klassifizieren (*vgl. Kugler et al. 2011, S. 172 f.*):

- Produktdaten (das CAD-Modell, welches die Mengen und Koordinaten der Bauteile enthält)
- Prozessdaten (Beschreibung der Bauverfahren und der Bauvorgänge)
- Ressourcendaten (Arbeitskräfte, Betriebsmittel und Materialien)
- Beschreibung der Produktionsumgebung (Baustelleneinrichtungselemente und Bauabschnitte)

Die Produktdaten werden durch CiSmo aus dem Gebäudemodell ausgelesen und vom Anwender ergänzt. Die Prozess- und die Ressourcendaten werden vom Anwender in CiSmo definiert und mit den Bauteilen des Gebäudemodells verknüpft. Die Beschreibung der Produktionsumgebung wird in das CAD-Modell integriert, indem der Anwender Betriebsmittelstandorte und Bauabschnitte in das Gebäudemodell einzeichnet.

Bei der Modellgenerierung werden die Daten des Gebäudemodells in eine Situation übertragen. In der Situation werden neben den Produktdaten und den Bauabschnitten auch alle standortabhängigen Objekte platziert, wie z. B. die Baustelleneinrichtungselemente.

Die Prozess- und die Ressourcendaten werden in der Datenbank des Prozessmodells gespeichert. Die Datenbank des Prozessmodells stellt eine Verbindung zwischen den Prozessen und dem Produkt her und sie beschreibt die für die Bauausführung benötigten Ressourcen (siehe Tabelle 5.9).

Tabelle 5.9: Die beiden Datenquellen des Simulationsmodells im Überblick

Situation (Produkt- und Prozessdaten):	Datenbank (Prozess- und Ressourcendaten):
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bauteile mit Typ, Koordinaten und Abmessungen ▪ Bauwerksgliederung mit Abschnitten, Räumen und Etagen ▪ Anzahl, Zusammensetzung und Koordinaten der Arbeitsgruppen ▪ Anzahl, Größe und Koordinaten der stationären Betriebsmittel und Lagerplätze 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbindung Verfahren – Bauteiltyp ▪ Vorgänge mit Teilverfahren und Voraussetzungen ▪ Teilverfahren mit Zeitaufwandwert, benötigten Materialien und Betriebsmitteln ▪ Parameter der Betriebsmittel ▪ Parameter der Materialien

Die **Ausgabegrößen** der Simulationsläufe werden in einer eigenen SQL-Datenbank gespeichert. Während des Simulationslaufs werden diese Daten vom Bauleitungsagenten protokolliert und bei der Beendigung des Simulationslaufs in die Datenbank übertragen. Die Daten beschreiben wann und wo die einzelnen Vorgänge ausgeführt und welche Ressourcen dafür benötigt wurden. Auf Grundlage dieser Datenbank können Terminpläne in Form von MS-Projektdateien generiert werden, die auf den Ergebnissen des Simulationslaufs basieren.

5.5.2 Datenzugriff und Implementierung der Datenstrukturen

Die in CiSmo verwendete Datenstruktur und ihre Implementierung, die das Prozess- und das Gebäudemodell umfasst, wurde bereits in Kapitel 4.3.3 beschrieben. Die Prozess- und Resourcendaten liegen, ebenso wie die Ergebnisdaten, in einer MySQL-Datenbank vor.

Der Zugriff auf diese Datenbank wird in SeSAM durch das SQL-Plugin ermöglicht. Durch das Plugin kann automatisch die Datenstruktur einer Datenbank gelesen werden und für jede Tabelle ein eigener zusammengesetzter Datentyp erzeugt werden. Der Name des automatisch generierten Datentyps wird aus dem Datenbank- und Tabellennamen zusammengesetzt. SeSAM verwendet zusammengesetzte Datentypen, um Datenbankeinträge zu manipulieren. Der zusammengesetzte Datentyp „simulation_tbl_vorgang“ enthält beispielsweise als Variablen alle Attribute der Vorgangs-Tabelle aus der SQL-Datenbank (siehe Tabelle 5.11). Wird diese Tabelle in SeSAM ausgelesen, wird für jedes Tupel in der Vorgangs-Tabelle ein eigenes Datenelement erzeugt, dass den zusammengesetzten Datentypen „simulation_tbl_vorgang“ besitzt.

Tabelle 5.10: Variablen des zusammengesetzten Datentyps "simulation_tbl_vorgang"

Variable	Datentyp
vorgang	String
vorgangs_id	String
ergebnis	String
bauteileigenschaft_req	String
bauteileigenschaft	String
vg_gk_id	String

Die Generierung der im XML-Format gespeicherten Situation wurde in Kapitel 4.5.2 beschrieben. Die XML-Daten der Situation werden von der Simulationsumgebung SeSAM eingelesen und interpretiert, so dass keine zusätzliche Schnittstelle implementiert werden musste.

Die Datenstruktur der Ergebnisdatenbank besteht aus den Entitäten Simulationslauf, Auftrag und Bedarfsmittel (siehe Abbildung 5.35).

**Abbildung 5.35: Entity-Relationship-Diagramm der Ergebnisdatenbank**

Ausgehend von dem Entity-Relationship-Diagramm wurden die beiden Datenbanktabellen `tbl_auftrag` (siehe Tabelle 5.11) und `tbl_bedarfsmittel` (siehe Tabelle 5.12) implementiert.

Tabelle 5.11: Spalten der Datenbanktabelle "tbl_auftrag"

Spaltenname	Datentyp
simulationslauf_id	VARCHAR(100)
auftrags_id	VARCHAR(100)
vorgangs_id	VARCHAR(40)
geschoss	DOUBLE(10,1)
abschnitt_raum	DOUBLE(10,1)
bauphase	VARCHAR(10)
anfang	DATETIME
ende	DATETIME
dauer	DOUBLE(20,3)
gewerk	VARCHAR(60)
arbeitsgruppe	VARCHAR(60)

Die beiden Tabellen enthalten den Namen und den Datentyp der einzelnen Tabellenspalten. Die weißen Schlüssel neben den Attributen `auftrags_id`, `bd_auf_id` und `bd_id` kennzeichnen die Primärschlüssel der Tabellen, deren Attributwerte einzigartig sein müssen, um die einzelnen Datensätze voneinander unterscheiden zu können. Die Datenbanktabelle „tbl_bedarfsmittel“ besitzt zwei Primärschlüssel, da nur die Kombination der beiden Schlüssel eine eindeutige Identifizierung eines Tupels ermöglicht. Die grauen Schlüssel (`simulationslauf_id`, `bd_auf_if` und `bd_id`) symbolisieren Fremdschlüssel, durch die Relationen zu anderen Tabellen hergestellt werden. Der Fremdschlüssel `bd_id` bezieht sich auf einen Datenbankeintrag in der Datenbank „simulation“, in der die Prozess- und Ressourcendaten gespeichert sind. Der Fremdschlüssel bezieht sich entweder auf einen Eintrag aus der Tabelle „tbl_material“ oder „tbl_betriebsmittel“. Durch den Schlüssel kann das Material oder das Betriebsmittel identifiziert werden, das bei diesem Arbeitsauftrag verwendet wurde.

Tabelle 5.12: Spalten der Datenbanktabelle "tbl_bedarfsmittel"

Spaltenname	Datentyp
bd_auf_id	VARCHAR(100)
bd_id	VARCHAR(40)
bd_mt	VARCHAR(40)
menge	DOUBLE(20,3)
mengeneinheit	VARCHAR(10)

Die Schlüssel werden durch einen selbstprogrammierten Schlüsselgenerator im Simulationsmodell erzeugt. Der Schlüsselgenerator wurde in der Funktion „Keygen“ implementiert. Die Funktion kombiniert verschiedene stochastische Funktionen, die einen einzigartigen Schlüssel für die Identifizierung der Datenbankeinträge generieren.

6 Anwendungsbeispiele zur Verifikation und Validierung

Im folgenden Kapitel wird anhand von Anwendungsbeispielen das Modellierungswerkzeug CiSmo getestet und das zugehörige Simulationsmodell verifiziert und validiert. Es wird untersucht, ob sich die entwickelten Werkzeuge für die Fragestellungen der Arbeitsvorbereitung eignen und ob Simulationsläufe mit dem in CiSmo generierten Simulationsmodell plausible Ergebnisse liefern.

Zu Beginn des Kapitels wird die bei der Verifikation und Validierung verwendete Vorgehensweise erläutert. Als Ausgangsbasis für die Untersuchungen werden die Daten zweier bereits abgeschlossener, realer Bauprojekte verwendet. Diese Projekte werden in Unterkapitel 6.3 zunächst vorgestellt. Danach werden in Kapitel 6.3.4 die Anwendungsoberflächen von CiSmo unter dem Gesichtspunkt der Eignung für die Aufgaben der Arbeitsvorbereitung im Hochbau getestet. In Unterkapitel 6.4.4 wird das Simulationsmodell verifiziert und validiert, indem das Modell ausführlich getestet und die Ergebnisse verschiedener Simulationsexperimente mit den Dokumentationsdaten der realen Bauprojekte verglichen werden.

Abschließend werden die aus der Verifikation und Validierung gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst.

6.1 Vorgehensweise

Die Testfälle für das Modellierungswerkzeug CiSmo und das zugehörige Simulationsmodell wurden auf der Basis der Bauprojektdaten zweier abgeschlossener Bauprojekte erstellt. Mit diesen Daten konnten die korrekte Funktionsweise und die Zweckmäßigkeit der Eingabefunktionalitäten des Programms getestet werden.

Des Weiteren wird die Verifikation und Validierung (im Folgenden abgekürzt V&V) des ausführbaren Simulationsmodells beschrieben. Von *Rabe et. al (2008)* wird aufbauend auf dem in Kapitel 5.1 vorgestellten Vorgehensmodell eine Methode zur durchgängigen V&V einer Simulationsstudie vorgestellt. Es werden sowohl die Korrektheit des Modells (Verifikation) als auch die Eignung des Simulationsmodells für die aufgeworfene Fragestellung (Validation) kontrolliert. Die Überprüfung der Phasenergebnisse erfolgt zum einen phasenintern (intrinsische Prüfung) und zum anderen phasenübergreifend hinsichtlich der Konsistenz der Ergebnisse einer Phase zu den Ergebnissen der vorhergehenden Phasen.

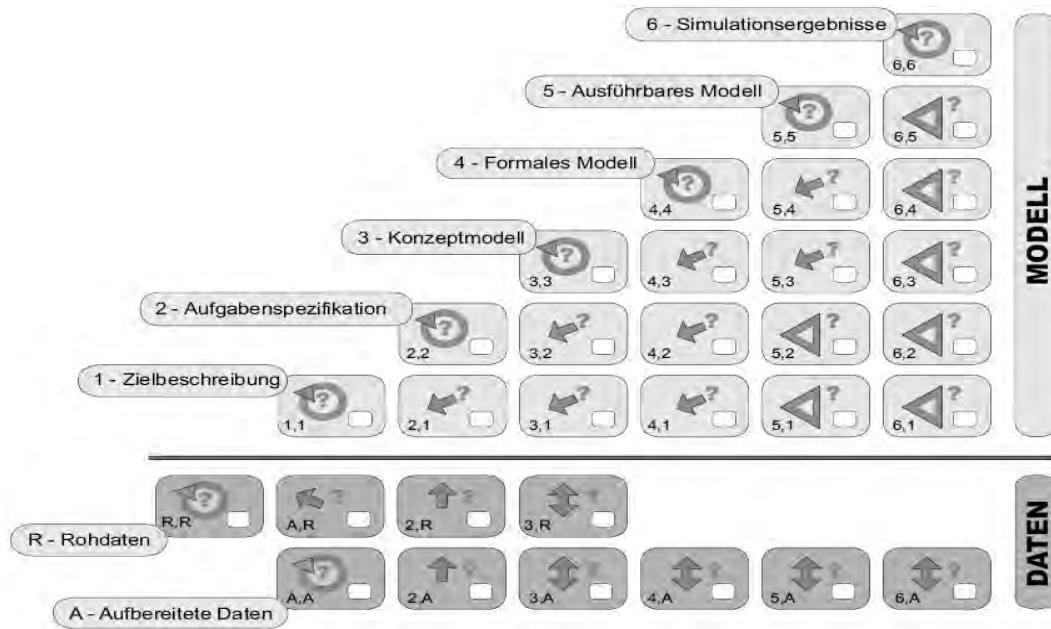


Abbildung 6.1: Vorgehensmodell zur V&V (Rabe et al. 2008, S. 119)

In diesem Kapitel werden nur die intrinsische Prüfung und die Prüfung des ausführbaren Modells gegen die Aufgabenspezifikation beschrieben, um darzulegen, dass das Modell fehlerfrei läuft und denen in der Aufgabenspezifikation genannten Anforderungen entspricht (Phasen 5,5 und 5,2 in Abbildung 6.1). Um die Eignung des Simulationsmodells zu prüfen, werden u. a. die simulierten Bauvorgänge mit den Daten der realen Bauabläufe verglichen.

6.2 Techniken zur Verifikation und Validierung

V&V-Techniken werden verwendet, um Abweichung zwischen dem Modellverhalten und dem Verhalten des realen Systems festzustellen. „Ob diese Abweichungen aus einer fehlerhaften Umsetzung (hier greift die Verifikation) oder einer fehlerhaften Spezifikation des Modells (hier greift die Validierung) herrühren, ist von untergeordnetem Interesse. Bei der V&V angewandte Techniken lassen sich daher nicht vollständig in Verifikationstechniken und Validierungstechniken unterscheiden (...)“ (Wenzel et al. 2008, S. 33).

Die verwendeten Techniken zur Verifikation und zur Validierung werden daher in diesem Kapitel nicht getrennt voneinander behandelt. Lediglich bei der Bewertung der Ergebnisse wird unterschieden, ob das abweichende Modellverhalten aus Implementierungs- oder Spezifikationsfehlern herröhrt.

Für die V&V des implementierten Simulationsmodells wurden unter anderem die von *Oechslein (2004, S. 19)* beschriebenen Funktionalitäten des Simulationstools SeSAM verwendet, die folgende Techniken zur V&V unterstützen:

- **Onlineanalyse** – Die Online-Beobachtung von aggregierten Werten.
- **Informationsanzeige** – Die Beobachtung der Zustandsvariablen der Agenten und der Welt sowie der aktuell ausgeführten Aktivitäten und Aktionen.
- **Taktweises simulieren** – Die Nachverfolgung von Zustandsänderungen über einen bestimmten Zeitverlauf.
- **Protokollierung** – In einem Protokoll können beispielsweise die Zustandsvariablen, Aktionen und Aktivitäten von Agenten über die gesamte zeitliche Dauer eines Simulationslaufes gespeichert werden.
- **Animation** – Die Beobachtung von räumlichen Veränderungen und Abläufen während eines Simulationslaufs anhand des animierten Modells.

Zur Anwendung kamen aber auch V&V-Techniken, die unabhängig vom verwendeten Simulationstool eingesetzt werden können, wie beispielsweise (*vgl. Rabe et al. 2008, S. 96 ff.*):

- **Ursache-Wirkungs-Graph** – Die Beziehungen zwischen Ursachen und ihren Auswirkungen im realen System werden zunächst dokumentiert. Danach wird überprüft, ob die entsprechenden Beziehungen auch im Modell zu beobachten sind.
- **Schreibtischtest** – Der Entwickler prüft selbstständig die eigene Arbeit durch sorgfältiges Durchgehen der Arbeitsergebnisse.
- **Validierung im Dialog** – Das Modell wird Fachexperten vorgestellt und mit ihnen beispielsweise über die Modellstruktur und das Modellverhalten diskutiert.
- **Test von Teilmodellen** – Bei dieser Technik werden Teilmodelle gesondert vom Gesamtmodell in einem Testrahmen verifiziert und validiert.
- **Vergleich mit aufgezeichneten Daten** – Die im Simulationsmodell erzielten Ergebnisse werden mit Ergebnissen des realen Systems verglichen.

- **Ereignisvaliditätstest** – Das Auftreten und die Häufigkeit von Ereignissen im Simulationsmodell werden mit den Ereignissen im realen System verglichen.
- **Grenzwerttest** – Es wird überprüft ob das Simulationsmodell auch bei der Verwendung von Extremwerten für die Eingabeparameter plausible Ergebnisse liefert.
- **Festwerttest** – Alle stochastischen Parameter werden durch feste Werte ersetzt, so dass aus dem stochastischen Modell ein deterministisches Modell wird.

Die verschiedenen Techniken zur V&V lassen sich nicht in allen Phasen einer Simulationsstudie einsetzen. So lässt sich beispielsweise die Animation nur einsetzen, wenn schon ein ausführbares Modell vorliegt und das Modell und die Ergebnisse überprüft werden sollen. Für eine Darstellung der Eignung der Techniken für die verschiedenen Phasen der Simulationsstudie wird auf *Rabe et. al (2008, S. 113)* verwiesen.

6.3 Bauprojektdaten

Ein grundlegendes Problem bei der Bauprojektdatenbeschaffung bestand darin, dass die überwiegende Anzahl der Bauprojekte nicht in der Detailierungstiefe dokumentiert wurden, die für eine Validierung des Simulationsmodells notwendig wäre. Deswegen wurden zu Beginn die Daten von fünf unterschiedlichen Bauprojekten von verschiedenen Baufirmen analysiert und die zwei Projekte mit der ausführlichsten Dokumentation ausgewählt. Die Namen der Baufirmen und die Standorte der Bauprojekte werden vereinbarungsgemäß nicht genannt.

Die ausgewählten Bauprojektdaten zur V&V des Simulationsmodells wurden in zwei Projektarbeiten erfasst. Aufbauend auf diesen Projektarbeiten wurden in einer Diplomarbeit (*Schneider 2011*) und in einer Masterarbeit (*Bleichert 2011*) die Projektdaten aufgearbeitet und in CiSmo verarbeitet. In der Diplomarbeit wurden die Daten eines Seniorencentrums und in der Masterarbeit die Daten einer Passivhausreihensiedlung verwendet.

6.3.1 Projekt Seniorencentrum

Bei dem ersten Bauprojekt handelt es sich um den Neubau eines Diakonie- und Altenpflegeheims. Das Gebäude wurde in einer Arbeitsgemeinschaft von zwei Baufirmen von Juni 2004 bis Mai 2005 errichtet. Das Bauwerk untergliedert sich in insgesamt 4 Bauabschnitte (1, 2.1, 2.2 und 3, siehe Abbildung 6.2).



Abbildung 6.2: Bauabschnitt 1 und 2.1, Ansicht Innenhof

Der Bau ist dreigeschossig und im ersten Bauabschnitt zusätzlich unterkellert (siehe Abbildung 6.3). Das Bauprojekt ist sehr gut dokumentiert. Für die Auswertung standen die Leistungsverzeichnisse der verschiedenen Gewerke, Bautagesberichte, Fotos der Bauausführung, der Baustelleneinrichtungsplan, Grundrisse, Schnitte, Schalungspläne, der Bauablaufplan, die Mengenermittlung und Kalkulationsdaten zur Verfügung.

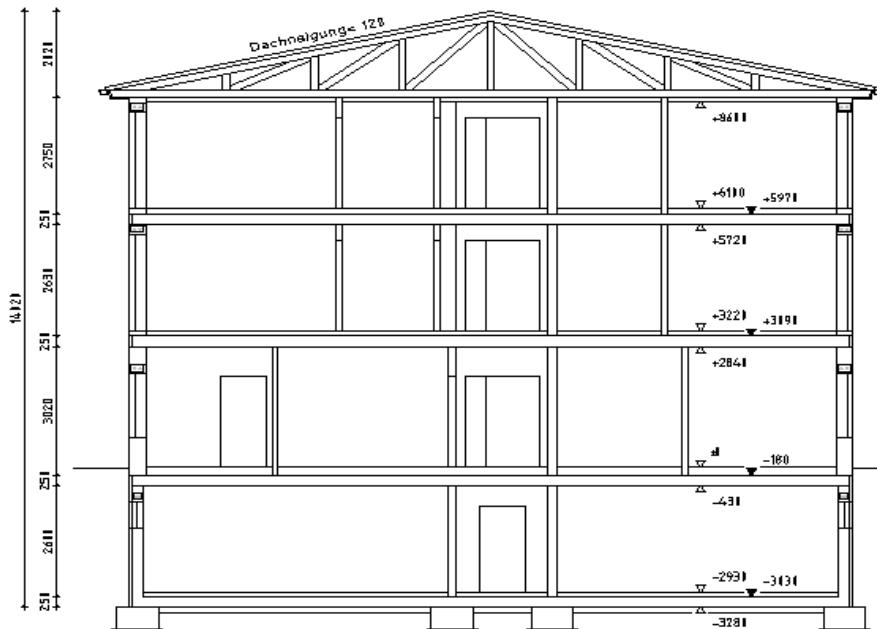


Abbildung 6.3: Querschnitt des Seniorencentrums (KG, EG, 1. OG und 2. OG)

6.3.2 Projekt Passivhausreihensiedlung

Bei dem zweiten ausgewerteten Bauprojekt handelt es sich um vier Reihenhäuser aus einer größeren Passivhausreihensiedlung, die aus insgesamt 22 Einfamilienhäusern besteht (siehe Abbildung 6.4).



Abbildung 6.4: Reihenhaus aus der Passivhausreihensiedlung (Bleichert 2011, S. 23)

Die Rohbauarbeiten starteten am 11.06.2007 und wurden am 05.10.2007 beendet. Die Häuser sind alle viergeschossig und besitzen jeweils eine Dachterrasse (siehe Abbildung 6.5).

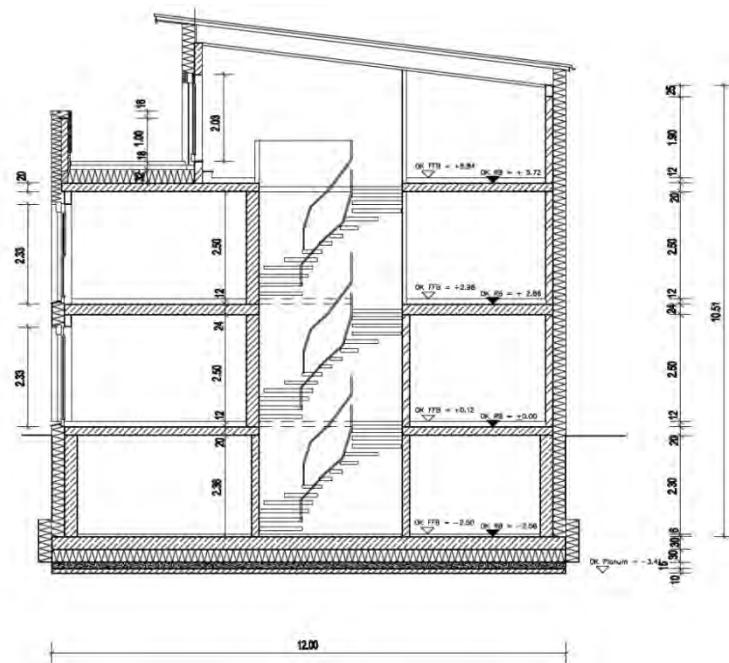


Abbildung 6.5: Querschnitt des Passivhauses (Bleichert 2011, S. 24)

An Unterlagen standen Terminpläne, Leistungsverzeichnisse der verschiedenen Gewerke, Grundrisse, Querschnitte, Projektbesprechungen, Fotos sowie die Angebots- und die Nachkalkulation zur Verfügung.

6.3.3 Aufbereitung der Projektdaten

Auf der Grundlage der Leistungsverzeichnisse und der Bauablaufpläne wurden alle Bauvorgänge der Projekte identifiziert und in Tabellenform mit den Bauteilen des Bauwerks assoziiert. In der Tabelle wurden das Geschoss und der Abschnitt des Bauteils erfasst, an dem der Bauvorgang ausgeführt wurde. Damit verbunden wurde die Dauer des Vorgangs, die Summe und Qualifikation der benötigten Arbeitskräfte, die gefertigte Menge, der Aufwandswert und die während der Ausführung des Vorgangs verwendeten Betriebsmittel erfasst (siehe Tabelle 6.1). Um die zeitliche Anordnung des Vorgangs im gesamten Bauprozess beschreiben zu können, wurden die Vorgänger des Bauvorgangs und die Anordnungsbeziehung zum Vorgänger beschrieben.

Mehrere Vorgänge, die an einem gemeinsamen Bauteil ausgeführt werden, wurden danach zu einem Bauverfahren zusammengefasst, um die Verknüpfungspunkte zwischen den Produktdaten (Bauteilen) und den Prozessdaten (Vorgängen) zu reduzieren. Die fertig ausgewerteten Projektdaten wurden anschließend über die Anwendungsoberflächen von CiSmo in der Datenbank des Programms gespeichert.

Tabelle 6.1: Tabellenerfassung der Bauvorgänge aus dem LV in Bezug zu den Bauteilen

Geschoß	Abschnitt	Position LV	Von-Datum	Bis-Datum	Vorgänger	Anordnungsbez.	T-Anordnungsbez.	Dauer in Tagen	Mannarbeitsst.	Dauer in h/AK	Summe der AK	Ø Qualifikation der AK	Menge	Einheit	Aufwandswert Kalkul. [h/E]	Dauer pro Pos. und Bauteil	Betriebsmittel	Terminplan KW	2004
KG Bauteil: Streifenfundamente/Balkenrost																			
KG	1.	1.5.09	5.7.04	5.7.04	Sauberkeit	E-A	0	0,1	1	0,5	2	1FA, 1MA	1,25	m ³	0,50	0,63	Kran, /	28	
KG	1.	1.5.10	5.7.04	5.7.04	Sauberkeit	E-A	0	0,1	1	0,5	2	1FA, 1MA	1,25	m ³	0,50	0,63	Kran, /	28	
KG	1.	1.5.11	6.7.04	6.7.04	Sauberkeit	A-A	0	0,2	3	1,5	2	1FA, 1MA	7,50	m ³	0,40	3,00	Kran, /	28	
KG	1.	1.5.12	6.7.04	6.7.04	Schalung	A-A	0	1	24	8	3	2FA, 1MA	50,58	m ³	0,45	22,76	Kran, /	28	
KG	1.	1.5.13	7.7.04	7.7.04	Sauberkeit	E-A	0	0,6	15	5	3	2FA, 1MA	26,19	m ³	0,55	14,40	Kran, /	28	
KG	1.	1.5.14	1.6.04	7.7.04	Erdarbeiten	E-A	0	5,3	126	42	3	3FA	205,42	m ²	0,63	128,39	/	27-28	
KG	1.	1.5.15	7.7.04	7.7.04	Erdarbeiten	E-A	0	0,3	6	2	3	3FA	3,75	m ²	1,50	5,63	/	28	

Da die Querschnitte und Grundrisse der Gebäude alle in Papierform vorlagen, mussten die für CiSmo benötigten CAD-Daten in Architecture gezeichnet werden. CAD-Modelle bestehen in Architecture aus 3-dimensionalen bauteilorientierten Gebäudemodellen. Abbildung 6.6 zeigt das in Architecture gezeichnete bauteilorientierte Gebäudemodell des Seniorenzentrums. Die Bauteiltypen der Gebäudemodelle wurden unter Verwendung von CiSmo mit den bereits vorher definierten Verfahren verknüpft.

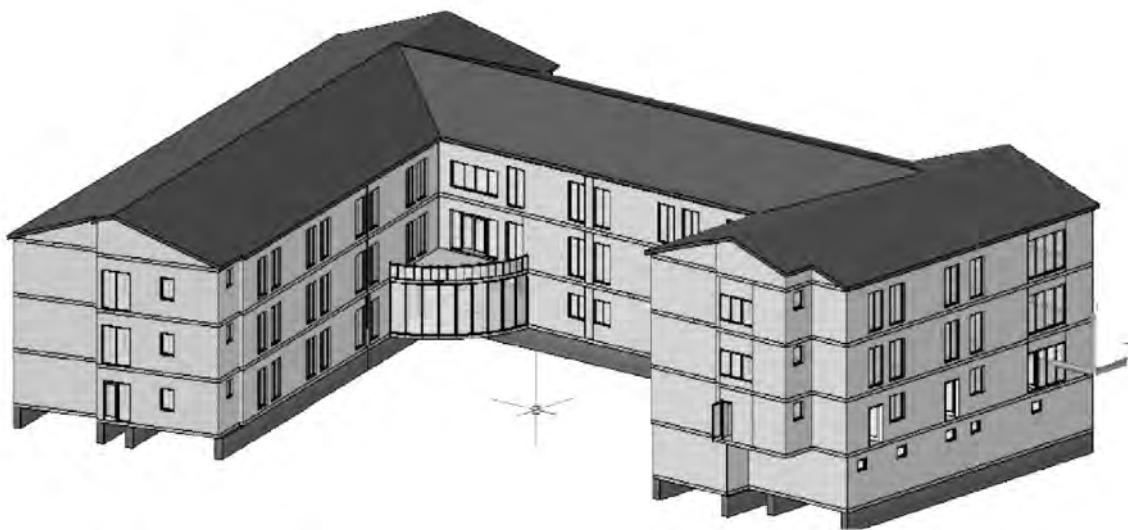


Abbildung 6.6: bauteilorientiertes CAD-Modell des Seniorenzentrums

6.3.4 Einschränkungen

Das Bauprojekt „Seniorenzentrum“ konnte aufgrund der vorliegenden detaillierteren Projekt-dokumentation sehr gut nachvollzogen und ausgewertet werden. Insbesondere die vorliegenden firmeninternen Arbeitszeitrichtwerte und die Bautagebücher erleichterten die Auswer-tung. Durch das große Bauvolumen ist das Projekt jedoch in einem prototypischen Simulati-onssystem wie CiSmo schwer handhabbar. Die V&V anhand der Daten dieses Projektes ge-staltet sich schwieriger, da durch die größere Anzahl an variablen Projektparametern Fehl-funktionen und Gründe für die Abweichungen zwischen der Simulation und der Realität schwerer identifiziert werden können.

Das Projekt Passivhausreihensiedlung ist weniger gut dokumentiert. Es fehlen Bautagebücher, anhand derer die Bauvorgänge detailliert nachvollzogen werden könnten. Außerdem fehlen die von der Baufirma angesetzten firmeninternen Arbeitszeitrichtwerte, so dass diese entwe-

der errechnet oder aus den ARH²⁰-Tabellen entnommen werden mussten. Durch das kleinere Bauvolumen und die damit verbundene kleinere Anzahl an Projektparametern eignet sich das Projekt jedoch besser für die V&V von CiSmo und dem zugehörigen Simulationsmodell.

In beiden Projekten bestehen Abweichungen zwischen den Mengen aus der Mengenermittlung der Bauunternehmen und den Mengen, die in CiSmo aus den CAD-Zeichnungen bestimmt wurden. Diese Abweichungen resultieren vermutlich aus nachträglichen Änderungen, die in der langen Zeitspanne zwischen der Angebotskalkulation und der Bauausführung stattfanden und nicht in den Plänen aktualisiert wurden. Durch Dokumentationslücken in den Projekten konnten nicht alle dieser nachträglichen Änderungen nachvollzogen werden.

Im Simulationsmodell werden die Bewegungen der Arbeitsgruppen- und Arbeiteragenten zusätzlich zu der eigentlichen Haupttätigkeit am Gewerk dargestellt. Außerdem entstehen bei Materialengpässen im Simulationsmodell zusätzliche Wartezeiten für die Arbeitsgruppen. Diese logistisch bedingten Zeiten sind in den angesetzten Arbeitszeitrichtwerten bereits enthalten. Dadurch ist damit zu rechnen, dass die simulierten Zeiten durchgängig über den Zeiten der realen Bauausführung liegen. *Schneider (2011, S. 103 ff.)* konnte in Experimenten nachweisen, dass eine pauschale Bereinigung der Arbeitszeitrichtwerte um einen logistischen Faktor nicht möglich ist, da der logistische Aufwand für die Tätigkeiten sehr stark vom Materialbedarf und der Dauer der Tätigkeit abhängig ist. Kurze Tätigkeiten haben prozentual gesehen einen höheren logistischen Aufwandsfaktor. Die empirische Erfassung von Aufwandswerten, die sich aus einem logistischen und einem rein auf die Produktion bezogenen Anteil zusammensetzen, könnte im Fokus einer eigenständigen Arbeit stehen.

6.4 Test der Anwendung CiSmo

Der Test der Anwendung CiSmo hatte in erster Linie zum Ziel, Fehler im Quellcode zu identifizieren und die Vollständigkeit und Eignung des Programms in Bezug auf seine Aufgaben hin zu überprüfen. Für die Prüfung der fertigen prototypischen Implementierung wurde daher ein Black Box-Testverfahren ausgewählt. Die interne Programmstruktur (Quellcode) ist bei einem solchen Test für den Tester unsichtbar. Bei einem Black-Box-Testverfahren wird das Programm von den Testern gegen seine Spezifikation getestet, in der die Aufgabe des Programms beschrieben wurde (*vgl. Balzert 1999, S. 515 f.*). Ein Black Box-Test wird auch als

²⁰ Arbeitszeit-Richtwerte-Hochbau

Funktionstest bezeichnet, da die Prüfung der spezifizierten Funktionalität im Vordergrund steht.

Alternativ hätte zum Test des Programms auch ein Strukturtestverfahren (White Box-Testverfahren) eingesetzt werden können. Ein Strukturtestverfahren prüft das Programm auf Grundlage des internen Kontrollflusses. Der Vorteil bei diesem Testverfahren besteht darin, dass alle Kontrollstrukturen des Programms mindestens einmal durchlaufen werden und dadurch potentiell mehr Fehler entdeckt werden. Der Nachteil besteht darin, dass nicht erkannt wird, ob das Programm alle Funktionalitäten enthält, die notwendig sind (*vgl. Balzert 1999, S. 524*). Aus diesem Grund wurde zum Testen von CiSmo das Black Box-Testverfahren ausgewählt, da es sich um eine prototypische Implementierung handelt und die Prüfung der Vollständigkeit der Funktionalitäten im Vordergrund stand.

Die Testfälle sollten bei einem Black Box-Testverfahren so ausgewählt werden, dass möglichst alle Funktionen des Programms ausgeführt werden. Zum Testfall gehören Eingabedaten in das Testobjekt, die aus den beiden Bauprojekten gewonnen wurden sowie die erwarteten Ausgabedaten.

Aufgrund der Größe der beiden Testfälle, ist von einer hohen Funktionsüberdeckung auszugehen. Das heißt, dass annähernd alle im Programmfluss möglichen Funktionen im Rahmen der Testfälle mindestens einmal durchlaufen wurden und so ein Großteil der Fehler im Quellcode identifiziert werden konnten.

Die Daten wurden über die Anwendungsoberflächen von CiSmo von Studenten eingegeben, die das Programm vorher nicht kannten. Dadurch konnten auch Fehler identifiziert werden, die dem Entwickler durch eingespielte Bedienungsabläufe des Programms bisher verborgen blieben. Gleichzeitig konnte das Programm auf seine Verständlichkeit und intuitive Nutzbarkeit getestet werden. Alle aufgetretenen Fehler wurden in der Diplom- und der Masterarbeit der Studenten dokumentiert und analysiert. Systemkritische Fehler wurden nach Meldung der Diplomanden sofort behoben.

6.4.1 Test der Programmfunctionalitäten

Die Aufgabenspezifikation des Programms sieht folgende Funktionalitäten vor, die der Reihe nach getestet wurden:

- Eingabe der allgemeinen Projektdaten
- Ressourcenerfassung (Betriebsmittel, Material und Personal)
- Erstellung der Baustelleneinrichtungsplanung im CAD-Modell
- Durchführung der Prozessmodellierung (Verknüpfung zwischen den Verfahren und den Bauteiltypen, Definition der Vorgänge, Teilverfahren und der Sequenzierungsbedingungen)
- Generierung einer Situation des Simulationsmodells (Verarbeitung der CAD-Daten, der Baustelleneinrichtungselemente und der Betriebsmittelstandorte sowie Übertragung der Personalstärke)

Die bei den Tests geprüften Funktionalitäten wurden nach verschiedenen Kriterien bewertet:

- korrekte Funktion (Verifikation)
- Zielführung bzw. Aufgabenerfüllung (Validität)
- Benutzerfreundlichkeit

Im Test wurden unabhängig voneinander mehrere komplett Programm durchläufe mit den Daten der beiden Projekte durchgeführt. In den ersten Programmdurchläufen wurden deterministische Parameter verwendet. In den Folgenden wurden diese dann durch stochastische Parameter ersetzt, um auch die Funktionen für die Eingabe der stochastischen Parameter zu testen.

Die korrekte Übernahme der Daten von der Anwendungsoberfläche in die Datenbank wurde überprüft, indem Daten eingegeben und wieder aufgerufen wurden. Außerdem wurden einzelne Datensätze manipuliert, indem sie über die Programmfunctionen gelöscht oder geändert wurden. Zusätzlich konnten über die Software „MySQL Query Browser“ die Diplomanden direkten Zugriff auf den Inhalt der Datenbank nehmen und die zuvor in den Anwendungsoberflächen angegebenen Daten mit den Datenbankeinträgen vergleichen.

Die Generierung des Simulationsmodells wurde getestet, indem einzelne Modellkomponenten definiert und schrittweise in das Modell übernommen wurden. Beispielsweise wurden die

verschiedenen Bauteiltypen nacheinander definiert und anschließend jeweils das Simulationsmodell generiert. Dadurch konnte einzeln überprüft werden, ob jeder Bauteiltyp korrekt in das Simulationsmodell übernommen wurde. Die in CiSmo eingegeben Parameter wurden dabei mit den Parametern der jeweiligen Komponenten im Simulationsmodell verglichen. In gleicher Weise wurde bei der Definition der Arbeitsgruppen und der eingesetzten Betriebsmittel verfahren.

Die Bewertung der Benutzerfreundlichkeit geschah anhand subjektiver Kriterien der Testpersonen.

6.4.2 Ergebnisse der Verifikation

Bei der Prüfung der Programmfunctionen konnten verschiedene Fehler identifiziert werden, die entweder zu Programmabstürzen, fehlerhaften Datenbankeinträgen oder Laufzeitfehlern führten. Des Weiteren wurden kleinere Fehler bei der Parameterübergabe an das Simulationsmodell und Probleme bei der Generierung von bestimmten Bauteiltypen festgestellt (z. B. bei Öffnungen und Fenster-Tür-Kombinationen).

Ein weiteres Problem bestand darin, dass ein definiertes Verfahren nicht projektbezogen gespeichert wurde und in mehreren Projekten verwendet werden konnte. Wurde ein Verfahren in einem Projekt geändert, so galt diese Änderung auch für andere Projekte in denen die Änderung nicht erwünscht war.

In Bezug auf das CAD-Modell wurde festgestellt, dass Bauteile, deren Ursprungsgröße beschnitten wurde, die Daten der Ausgangsgröße liefern. Bei miteinander verschnittenen Bauteilen kam es darüber hinaus zu Fehlern in der Mengenberechnung. Diese Fehler liegen jedoch in den Bibliotheken der CAD-Anwendung Architecture begründet und konnten nicht behoben werden.

Die Definition der Bauabschnitte bereitete ein weiteres Problem. Wurden nach der Festlegung der Abschnitte noch Änderungen am Gebäudemodell durchgeführt, so wurde die Zuteilung der Bauteile zu den Abschnitten nicht automatisch aktualisiert. Deshalb musste die Definition der Bauabschnitte nach jeder Änderung erneut erfolgen.

6.4.3 Validität der Anwendung

Mit der Validität der Anwendung wird beurteilt, ob der Anwender mit der implementierten Software in der Lage ist, die Aufgaben für die sie erstellt wurde, adäquat zu bearbeiten. Die wichtigsten Punkte bei der Beurteilung der Validität bezogen sich auf die Eignung des **CAD-Modells** und des entworfenen und implementierten **Prozessmodells**.

Bei der Beurteilung des **CAD-Modells** stand im Vordergrund, ob das CAD-Modell alle Daten in der notwendigen Granularität bereitstellt, damit sich die Verfahren und Vorgänge des Prozessmodells mit dem Gebäudemodell verknüpfen lassen.

Da in Architecture nicht alle Kleinbauteile (wie z. B. Stürze, Sanitär- und Elektroleitungen, die Bewehrung etc.) darstellbar sind, konnten nicht alle Vorgänge, die aus den Positionen des LV bestimmt wurden, ohne Weiteres mit dem Gebäudemodell verbunden werden. Manche Vorgänge konnten nur über pauschalisierte Zeitaufschläge und die Definition zusätzlicher Eigenschaften bei den Bauteilen, in denen die Kleinbauteile verlegt wurden, berücksichtigt werden. Solche Pauschalisierungen führen jedoch zu Ungenauigkeiten, da kein genauer Einbauort und keine genauen Mengen für die Arbeitszeitberechnung aus dem CAD-Modell für die Simulation bestimmt werden können. Die meisten Probleme verursachte diese Pauschalisierung bei den Bewehrungsarbeiten, da die Arbeiten am Stahl einen großen Teil der Arbeitszeit an einem Stahlbetonbauteil beanspruchen (*vgl. Bleichert 2011, S. 27*). Durch die Verwendung eines detaillierteren Gebäudemodells, wie es z. B. in der BIM-basierten CAD-Umgebung Revit von Autodesk verwendet wird, könnte daher die Genauigkeit bei der Mengenermittlung für die Simulation erhöht werden.

Ein weiteres Problem bestand darin, dass in der CAD-Umgebung Architecture Bauteile verwendet werden, die aus mehreren Komponenten bestehen (z. B. Bodenplatten oder Wände aus Beton mit Wärmedämmung). Diese Bauteile können jedoch nicht in ihre einzelnen Komponenten zerlegt werden. Das heißt, dass im CAD-Modell nur das volle Volumen des Gesamtbaukörpers hinterlegt ist und nicht die Volumina der einzelnen Komponenten. Um die korrekten Volumina zu erhalten, sind daher für jedes zusammengesetzte Bauteil spezielle Funktionen in der Software notwendig, welche die Volumina der einzelnen Komponenten berechnen. Bei Verwendung eines detaillierteren CAD-Modells, das die Volumina der einzelnen Komponenten enthält, könnten die Funktionen zur Volumenberechnung wegfallen.

Die Eignung des implementierten **Prozessmodells** wurde anhand der folgenden Leitfragen beurteilt:

1. Ist die Verknüpfung zwischen dem Gebäude- und dem Prozessmodell zweckmäßig?
2. Lassen sich alle benötigten Ressourcen (Personal, Betriebsmittel und Material) mit dem Prozessmodell verknüpfen?
3. Können alle Bauvorgänge im Prozessmodell erfasst werden?
4. Können alle Abhängigkeiten zwischen den Vorgängen dargestellt werden?
5. Ist das Prozessmodell vollständig oder fehlen wichtige Parameter?

Zur 1. Leitfrage: Die Verknüpfung zwischen den Verfahren und den Bauteiltypen konnte mit CiSmo schnell und unkompliziert durchgeführt werden. Die Anzahl der Schnittstellen zwischen dem Prozess- und dem Gebäudemodell ist durch die Zuordnung der einzelnen Bauteilobjekte zu einem Bauteiltyp und die Verknüpfung dieser abstrakten Bauteiltypen mit den Verfahren sehr gering. Durch die kleinere Menge an Schnittstellen verringert sich der Definitionsauwand erheblich.

Verfahren:				
MW KS 36,5 + Dichtung				
	Geschoss 1	Geschoss 2	Geschoss 3	Geschoss 4
Abschnitt 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Abschnitt 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Abschnitt 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Abschnitt 4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Abbildung 6.7: Auswahlmatrix zur Verknüpfung der Verfahren mit Abschnitten oder Geschossen
(Bleichert 2011, S. 83)

Von den Testpersonen wurde vorgeschlagen, die Verfahren optional einzelnen Abschnitten oder Geschossen zuzuordnen, um in unterschiedlichen Abschnitten und Geschossen auch unterschiedliche Verfahren zum Einsatz bringen zu können. Die Zuordnung könnte unkompliziert über eine Auswahlmatrix geschehen (siehe Abbildung 6.7).

Zur 2. Leitfrage: Die Ressourcen ließen sich größtenteils problemlos mit dem Prozessmodell verknüpfen. Lediglich die Definitionsmöglichkeiten für die Arbeitsgruppen sind ungenügend

und führen zu Ungenauigkeiten bei den Simulationsergebnissen. Besonders bei der Verwertung der Daten des Seniorenenzentrums bereitete es Schwierigkeiten, dass in CiSmo keine geschoss- oder abschnittsweise Definition der Arbeitsgruppenstärke möglich ist, da bei diesem Projekt mit stark fluktuierender Belegschaftsstärke gearbeitet wurde. Da die Belegschaftsstärke aber nicht nur von dem Abschnitt und Geschoss, sondern auch vom Datum abhängig sein kann, konnte für dieses Problem noch keine zufriedenstellende Lösung gefunden werden.

Von den Testpersonen wurde außerdem vorgeschlagen, Auszubildende als Ausbildungsstand bei der Definition der Arbeitskräfte mit einzuführen.

Bei der Definition des Materials fehlt die Möglichkeit zu definieren, dass ein Transport *immer* ohne Kran stattfindet. Das kann z. B. bei kleinen Materialien, wie Schrauben, sinnvoll sein. Die angegebenen Transportwerte von Materialien pro Person berücksichtigen nicht die Sperrigkeit oder das Gewicht der Materialien. Für Fertigteile ist eine zusätzliche Definitionsmöglichkeit sinnvoll, die die Größe des Fertigteils berücksichtigt. Bisher finden Verknüpfungen mit den Fertigteilen nur stückbezogen statt.

Zur 3. Leitfrage: Die Bauvorgänge ließen sich alle über das verwendete Prozessmodell erfassen. Lediglich die Vernetzung der Vorgänge mit dem Gebäudemodell bereitete vereinzelt aufgrund des Detaillierungsgrads des CAD-Modells Schwierigkeiten (siehe Beurteilung des CAD-Modells).

Zur 4. Leitfrage: Die Abhängigkeiten zwischen den Vorgängen ließen sich alle komplett durch das Prozessmodell als Voraussetzungen darstellen. Lediglich in einem Fall wurde es problematisch, da ein Bauteiltyp in verschiedenen Geschossen ganz unterschiedliche Voraussetzungen hatte. Optional kann es daher notwendig sein, eine auf einzelne Geschosse oder Abschnitte bezogene Definition der Voraussetzungen zu ermöglichen.

Zur 5. Leitfrage: Als wichtiger Parameter fehlt die Definition eines Lastmoments für den Kran, da nur über das Lastmoment in der Simulation berücksichtigt werden kann, ob Fertigteile oder Materialien von dem Kran zum Bestimmungsort transportiert werden können. In CiSmo könnte der Lastverlauf über das Anzeigen von Lastabstufungen in der CAD-Zeichnung dargestellt werden (siehe Abbildung 6.8).

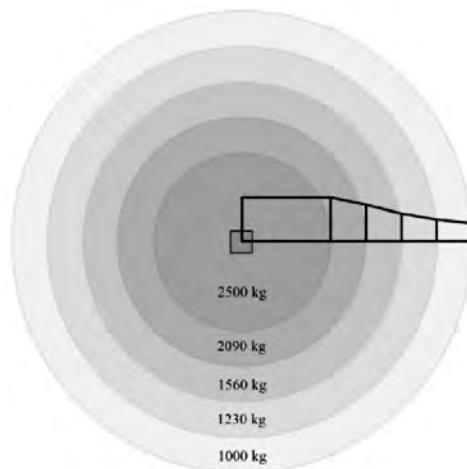


Abbildung 6.8: Lastverlauf Räder Liebherr 26 K.1 (Bleichert 2011, S. 125)

Die Erfassung der zu simulierenden Gebäudeabschnitte geschieht bisher über eine Rechteckauswahl. Bei sehr individuellen Gebäudegrundrissen ist es sinnvoll, die Auswahl über einen Polygonzug zu ermöglichen, wenn nur bestimmte Bauabschnitte simuliert werden sollen.

6.4.4 Bewertung der Benutzerfreundlichkeit

Bei der Bewertung der Benutzerfreundlichkeit wurde hervorgehoben, dass mit der Anwendung auch Laien in die Lage versetzt werden mit vertretbaren Einarbeitungsaufwand Simulationsmodelle zu generieren. Darüber hinaus wurde festgehalten, dass die Variation der Projektparameter mit der Anwendung schnell und unkompliziert durchgeführt werden kann.

Bemängelt wurde die fehlende Dokumentation oder Hilfefunktionen für das Programm. In diesem Zusammenhang wurde auch eine eindeutigere Beschriftung für die Eingabefelder vorgeschlagen. Schwierigkeiten bei der Bedienung des Programms entstanden außerdem dadurch, dass die Auflistungen in den Listenfeldern nicht alphabetisch sortiert waren.

Eine erhebliche Erleichterung bei der Dateneingabe wäre es, wenn bereits vorher eine umfangreiche Materialbibliothek bestehen würde, die eventuell im CAD-Modell integriert wäre.

Die Speicherung der projektbezogenen Daten in der CAD-Zeichnung führt zu dem Problem, dass bei einer Neuanlage der Zeichnungsdatei diese Daten verloren gehen. Der Anwender muss sie dann wieder neu erstellen und speichern. Darüber hinaus wäre es sinnvoll, den Bezug zwischen den Projekten und den zugehörigen CAD-Zeichnungen zu speichern, so dass beispielsweise die CAD-Zeichnung beim Aufrufen eines Projektes automatisch geladen wird.

Die Benutzerfreundlichkeit bei der Prozessmodellierung könnte dadurch verbessert werden, dass der Anwender bei der Definition der Vorgänge, Teilvorgänge und Sequenzierungsbedingungen durch einen Wizzard geleitet wird. Ein Wizzard besteht aus mehreren kleineren Anwendungsfenstern, die dem Anwender vorgeben, in welcher logischen Reihenfolge Eingaben getätigt werden.

Die Definition der Verfahren, Vorgänge und Teilvorgänge könnte durch bestehende oder selbstdefinierbare Vorlagen erleichtert werden. Zusätzlich ist es hilfreich Duplikate von bestehenden Verfahren oder Vorgängen anzufertigen, um diese dann modifizieren zu können. Die Definition der Sequenzierungsbedingungen geschieht in CiSmo sehr abstrakt. Aus diesem Grund wäre es für den Anwender anschaulicher, wenn die in Form von Voraussetzungen definierte Reihenfolge zwischen den Vorgängen und den Ergebnissen graphisch dargestellt würde.

Die Definition von zusätzlichen Bauteileigenschaften, um das Gebäudemodell zu detaillieren und zu individualisieren, wurde von den Testpersonen nicht verwendet und als sehr umständlich empfunden. Besser wäre es, auf ein von vornherein detaillierteres Gebäudemodell zurück zu greifen.

Bei der Baustelleneinrichtung wäre es hilfreich, wenn der Radius eines Krans mit angezeigt würde, damit der Baustelleneinrichtungsplaner diesen mit berücksichtigen kann. Von den Testern wird ebenfalls eine automatische Generierung einer neuen Situation für das Simulationsmodell gewünscht, wenn im Gebäudemodell neue Bauteile oder Abschnitten erstellt werden.

Die XML-Datei sollte außerdem standardmäßig als Vorlagendatei geladen werden. In der momentanen Version muss diese Datei vom Anwender bei jeder Generierung einer Situation neu geladen werden.

6.5 Verifikation und Validierung des Simulationsmodells

Bei der V&V des Simulationsmodells wurde überprüft, ob das Simulationsmodell fehlerfrei funktioniert, den Anforderungen der Aufgabenstellung genügt und es hinreichend mit dem realen System „Hochbaustelle“ übereinstimmt. Zur V&V des Simulationsmodells wurden daher Tests verwendet, die in den Phasen 5,5 und 5,2 des von *Rabe et al. (2008)* vorgestellten Vorgehensmodells zur V&V vorgesehen sind (siehe Abbildung 6.1). Die Phase 5,5 sieht eine

intrinsische Prüfung des Modells gegen sich selbst vor. Diese umfasst die Überprüfung der Dokumente, die das Ergebnis der Implementierungsphase beschreiben und die Prüfung des ablauffähigen Modells (*vgl. Rabe et al. 2008, S. 158*). In der Phase 5,2 erfolgt eine Prüfung des ablauffähigen Modells gegen die Aufgabenspezifikation und gegen das reale System, das in der Aufgabenspezifikation beschrieben wird (*vgl. Rabe et al. 2008, S. 163*).

Rabe et al (2008, S. 22 f.) benennen verschiedene V&V-Kriterien anhand derer sich verschiedene Aspekte des Modells beurteilen lassen. Die Gültigkeit der Kriterien in Bezug auf das Simulationsmodell wurde anhand geeigneter V&V-Techniken getestet.

6.5.1 Intrinsische Prüfung (Phase 5,5)

Die intrinsische Prüfung des Modells erfolgt anhand der V&V-Kriterien **Konsistenz**, **Vollständigkeit**, **Korrektheit** und **Plausibilität** der beschreibenden Dokumente und des ablauffähigen Simulationsmodells.

Die Prüfung der **Konsistenz** umfasste die Untersuchung, ob die Zusammenhänge zwischen beschreibenden Dokumenten und Simulationsmodell schlüssig, einheitlich und fehlerfrei abgebildet wurden (*vgl. Rabe et al. 2008, S. 158*). Ein Teil dieser beschreibenden Dokumente wurde bereits in Kapitel 5 dieser Arbeit vorgestellt. Im Rahmen der Konsistenzprüfung wurde beispielsweise die im beschreibenden Dokument verwendete Terminologie mit der im Simulationsmodell verwendeten Terminologie verglichen. In Zusammenhang mit der Konsistenzprüfung wurde die **Vollständigkeit** der Dokumente beurteilt. Im Mittelpunkt stand dabei die Fragestellung, ob alle Gliederungspunkte der Dokumentstruktur behandelt wurden oder Defizite in der Beschreibung existierten (*vgl. Rabe et al. 2008, S. 138 f.*). Als V&V-Technik zur Überprüfung der Konsistenz und der Vollständigkeit wurde in dieser Phase der „Schreibtischtest“ eingesetzt.

Die **Konsistenz** des Simulationsmodells und der verwendeten Algorithmen wurde anhand der V&V-Techniken „Debugging“ und dem bereits bei der V&V der Modellierungsumgebung CiSmo beschriebenen White-Box-Test überprüft (*vgl. Rabe et al. 2008, S. 158*).

Das Debugging wurde schon während der Implementierung des Simulationsmodells regelmäßig durchgeführt. In SeSAM wird das Debugging durch verschiedene Funktionalitäten unterstützt. Die Animation des Modells ermöglicht eine oberflächliche Beurteilung des Modellverhaltens anhand der Bewegungen der Simulationselemente. Die Werte von Zustandsvariablen

können während eines Simulationslaufs auf einer eigenen Konsole angezeigt und überprüft werden. Verschiedene „Logging level“ ermöglichen es, dass der Simulationslauf beispielsweise bereits bei Warnungen stoppt oder Fehlermeldungen ganz ignoriert werden. Gleichzeitig ist es möglich zu definieren, ob auch Variablen, die nur der Konfiguration oder Analyse dienen, angezeigt werden.

Der White-Box-Test wurde nach der vollständigen Implementierung des Simulationsmodells durchgeführt. Die in Kapitel 5 vorgestellten UML-Aktivitätsdiagramme der Agenten und der Umwelt wurden als Vorlage verwendet, um alle internen Abläufe des Modells systematisch zu durchlaufen und dabei auf Fehler zu überprüfen.

Die Prüfung der **Korrektheit** beinhaltet den Test der Modellstruktur, der Vernetzung zwischen den Modellelementen, die Vollständigkeit der Modellparameter und deren Initialisierung. Die Korrektheit wurde anhand der V&V-Technik „Test von Teilmodellen“ überprüft. Mit dieser Technik konnte die Funktion der einzelnen Komponenten des Modells getestet werden, indem zunächst nur die zu überprüfende Komponente und die für ihre Funktion unmittelbar notwendigen Modellkomponenten in eine Situation²¹ übernommen wurden. Ein Test bestand beispielsweise darin, dass nur ein Bauleiter, ein Arbeitsgruppenagent und eine Bauteilressource in einer Situation zusammengestellt wurden. Anhand dieses Szenarios ließ sich zunächst die korrekte Parametrisierung des Bauleiteragenten, des Arbeitsgruppenagenten und der Bauteilressource prüfen. Danach wurde die Kommunikation zwischen Bauleiteragenten und Arbeitsgruppenagenten betrachtet und dokumentiert. Anschließend wurde die Bearbeitung der Bauteilressource durch den Arbeitsgruppenagenten getestet, indem ein Monitoring der Zustandsvariablen des Arbeitsgruppenagenten und der Bauteilressource stattfand. Anschließend fand eine Erweiterung des Tests statt, indem zusätzliche Bauteile in das Szenario integriert wurden.

Die **Plausibilitätsprüfung** hatte zum Ziel, die Nachvollziehbarkeit der Zusammenhänge im Modell und die Schlüssigkeit der erzielten Ergebnisse zu begutachten. Im Mittelpunkt stand dabei die Fragestellung, ob das Modell erwartungsgemäß reagiert. Als V&V-Technik fand in dieser Phase ein „Ursache-Wirkungsgraph“ Verwendung, von dem Testfälle für die Prüfung der Funktionsweise des Modells abgeleitet wurden (vgl. Rabe et al. 2008, S. 159). Diese Testfälle bestanden in erster Linie aus Sensitivitätsanalysen, die zum Ziel hatten zu überprüfen,

²¹ Ausgangsszenario für einen Simulationslauf

wie sich die Ausgabeparameter bei Variationen der Eingabeparameter veränderten. Die Veränderungen der Ausgabeparameter können qualitativ durch den Ursache-Wirkungsgraph vorhergesagt werden.

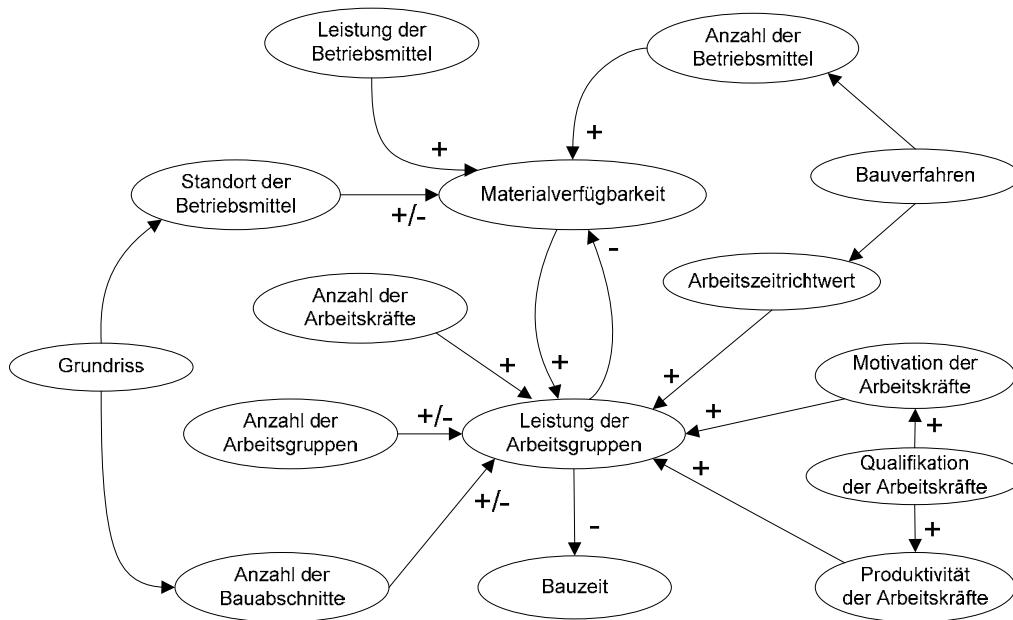


Abbildung 6.9: Ursache-Wirkungsgraph der wichtigsten Parameter des Simulationsmodells

Abbildung 6.9 zeigt den verwendeten Ursache-Wirkungsgraph mit den wichtigsten Parametern des Simulationsmodells und ihren Beziehungen zueinander. Betrachtet wurden in erster Linie Parameter, die sich direkt oder indirekt auf die Leistung der Arbeitsgruppen und damit direkt auf die Bauzeit auswirken. Die Wirkungsbeziehungen zwischen den Parametern können gleich- oder gegensinnig sein. Eine gleichsinnige Wirkung besteht, wenn durch das Anwachsen des einen Parameters der zweite Parameter ebenfalls erhöht wird. Eine gegensinnige Wirkungsbeziehung besteht, wenn sich durch das Anwachsen eines Parameters der Wert des zweiten Parameters verringert.

Eine gleichsinnige Wirkungsbeziehung wird im Graphen durch ein „+“ und eine gegensinnige durch ein „-“ gekennzeichnet (vgl. Oechslein 2004, S. 90). Die Testfälle wurden in Anlehnung an Oechslein (2004, S. 90 f.) definiert, indem ausgehend vom Wirkungsgraph (siehe Abbildung 6.9) die zu testenden Parameter tabellarisch mit einer Erläuterung ihrer Wirkungsbeziehungen aufgestellt wurden (siehe Tabelle 6.2). Ausgehend von der Erläuterung der Relationen zwischen den Parametern konnten die Testfälle für die Überprüfung der Wirkungsbeziehungen definiert werden.

Um stochastische Einflüsse auf die Ergebnisse der Simulationsläufe auszuschließen, fanden in allen Tests nur deterministische Eingabeparameter Verwendung. Das Simulationsmodell wurde mit den CAD-Daten und Parametern des in Unterkapitel 6.3.2 vorgestellten Bauprojektes „Passivhausreihensiedlung“ generiert. Bei der Bewertung der Tests ist zu beachten, dass Parameterveränderungen nicht zwangsläufig zu einer Veränderung der Bauzeit führen müssen, da eine Parameterveränderung aufgrund von Engpässen manchmal keine Auswirkung zeigt.

Tabelle 6.2: Zusammenhänge zwischen den Parametern und daraus abgeleitete Testfälle

von Größe	zu Größe	erhöht/ erniedrigt	Erklärung	Test
Anzahl der Arbeitskräfte	Leistung der Arbeitsgruppen (AG) / Bauzeit	+	Die Anzahl der Arbeiter beeinflusst die Arbeitsleistung.	Anzahl der eingesetzten Arbeitskräfte variieren (Test 1)
Motivation der Arbeitskräfte	Leistung der AG / Bauzeit	+	Die Motivation der Arbeiter verändert die Arbeitsleistung.	Veränderung der Motivation (Test 2)
Produktivität der Arbeitskräfte	Leistung der AG / Bauzeit	+	Die Produktivität der Arbeiter verändert die Arbeitsleistung.	Veränderung der Produktivität (Test 3)
Materialverfügbarkeit	Leistung der AG / Bauzeit	+	Ist das notwendige Material nicht verfügbar dann entstehen Wartezeiten.	siehe Test 4, 5, 6 und 7
Anzahl der Betriebsmittel	Materialverfügbarkeit	+	Die Anzahl der eingesetzten Betriebsmittel beeinflusst die Materialverfügbarkeit.	Anzahl der Betriebsmittel (BM) variieren (Test 4)
Leistung der Betriebsmittel	Materialverfügbarkeit	+	Die Leistung der eingesetzten Betriebsmittel beeinflusst die Materialverfügbarkeit.	Leistung der BM variieren (Test 5 und Test 7)
Leistung der Arbeitsgruppen	Materialverfügbarkeit	-	Je mehr Leistung die Arbeitsgruppen bringen, desto früher muss das Material bereitgestellt werden.	Variation der Anzahl der Arbeitskräfte und der AG, bei gleichzeitiger Variation der Anzahl oder Leistung der BM und der Anzahl der Bauabschnitte (Test 6, 7, Test 9 und 10)
Anzahl der Bauabschnitte	Leistung der Arbeitsgruppen	+/-	Die Anzahl der Bauabschnitte bestimmt, wie viele Arbeitsgruppen eines Gewerks gleichzeitig in einem Geschoss an einem Vorgang arbeiten können.	Veränderung der Anzahl der Bauabschnitte bei gleichzeitiger Variation der Anzahl der Arbeitsgruppen (Test 8)

In **Test 1** wurde überprüft, welche Auswirkungen eine Variation der Anzahl der Arbeitskräfte auf die Bauzeit hat (siehe Tabelle 6.3). Erwartungsgemäß konnte durch eine Verdopplung der Arbeitskräfte die Bauzeit fast um die Hälfte verringert werden. Dass sich die Bauzeit nicht

genau um die Hälfte reduziert, ist auf die für den Materialtransport und die für die Arbeitskräfte gleichbleibenden Weglängen zurückzuführen.

Tabelle 6.3: Parameter und Ergebnisse von Test 1

Szenario:	Ausgangsszenario	Doppelte Anzahl Arbeitskräfte
Parameter:	1 Arbeitsgruppe (AG) Maurer mit 8 Arbeitskräften (AK) 1 AG Maurer mit 4 AK 1 AG Schreiner mit 2 AK 1 AG Betonbauer mit 4 AK 1 AG Betonbauer mit 8 AK 1 AG Trockenbauer mit 4 AK 1 AG Elektriker mit 4 AK	1 AG Maurer mit 16 AK 1 AG Maurer mit 8 AK 1 AG Schreiner mit 4 AK 1 AG Betonbauer mit 8 AK 1 AG Betonbauer mit 16 AK 1 AG Trockenbauer mit 8 AK 1 AG Elektriker mit 8 AK
Bauzeit:	607,3 h	319,5 h

In **Test 2** wurde die Auswirkung der Motivation der Arbeiter auf die Bauzeit getestet. Zunächst wurde die Motivation der Arbeiter gegenüber dem Ausgangsszenario um 20 % erhöht und anschließend in Relation zum Ausgangsszenario um 20 % gesenkt.

Tabelle 6.4: Parameter und Ergebnisse von Test 2

Szenario:	Ausgangsszenario	20 % höhere Motivation	20 % niedrigere Motivation
Parameter:	Motivation der Vorarbeiter: 100 % Motivation der Gesellen: 100 % Motivation der Hilfsarbeiter: 100 %	Motivation der Vorarbeiter: 120 % Motivation der Gesellen: 120 % Motivation der Hilfsarbeiter: 120 %	Motivation der Vorarbeiter: 80 % Motivation der Gesellen: 80 % Motivation der Hilfsarbeiter: 80 %
Bauzeit:	607,3 h	512 h	751,6 h

Die Motivation oder Produktivität der Arbeiter wird im Simulationsmodell durch Motivations- oder Produktivitätskennzahlen [x] der verschiedenen Arbeitskräfte erfasst. Der Wertebereich dieser Kennzahl liegt zwischen „0“ (keine Motivation) und „2“ (doppelte Motivation). Der Standardwert beträgt „1“.

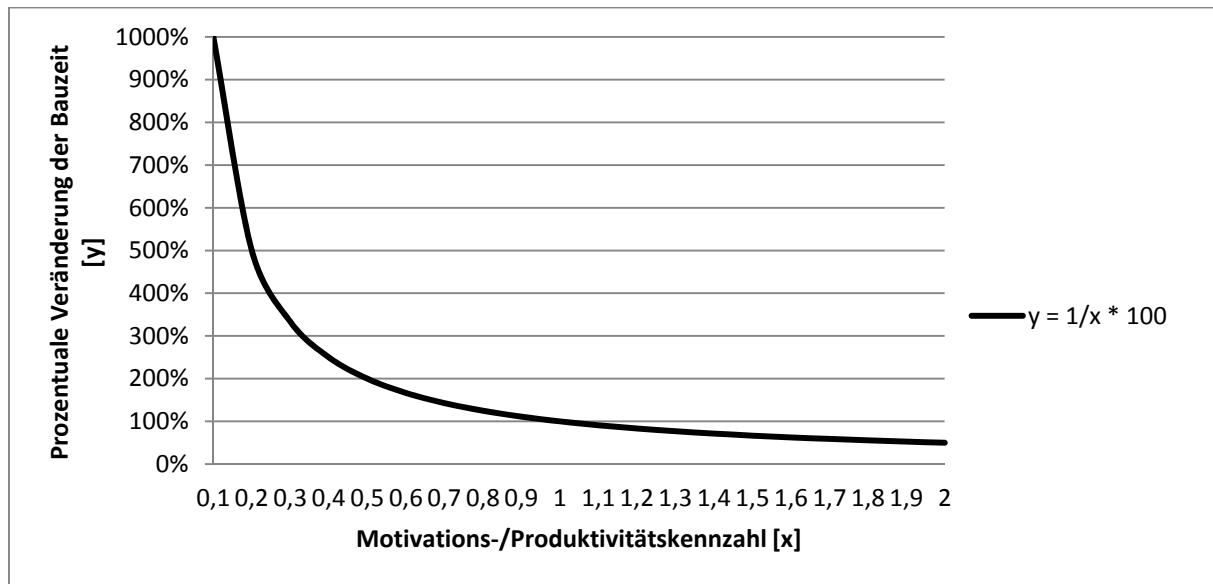


Abbildung 6.10: Berechnung der prozentualen Veränderung der Bauzeit durch die Motivationskennzahl

Würde sich die Motivation 1:1 in der Bauzeit widerspiegeln, so könnte die prozentuale Veränderung der Gesamtbauzeit durch den Kehrwert der Kennzahl berechnet werden (siehe Abbildung 6.10).

Die Steigerung der Motivation um 20 % führte im Simulationslauf zu einer Bauzeit, die bei 84,3 % der Bauzeit des Ausgangsszenarios lag (siehe Tabelle 6.4). Der Kehrwert der Motivationskennzahl führt zu folgendem Ergebnis:

$$\text{Prozent der Ausgangsbauzeit} = \frac{1}{1.2} * 100 = 83,3 \%$$

Die Anhebung der Motivation führte also nicht zu einer gleich hohen Beschleunigung der Bauzeit. Dieser Effekt war zu erwarten, da die von den Arbeitskräften zurückzulegenden Weglängen und die Zeit für die Materialtransporte durch die Motivation nicht beeinflusst werden und daher die gleiche Zeit in Anspruch nehmen wie im Ausgangsszenario. Im Szenario mit der um 20 % verringerten Motivation wurde die Gesamtbauzeit um 23,8 % verlängert.

Die Berechnung der zu erwartenden Veränderung der Bauzeit ergibt folgendes Ergebnis:

$$\text{Prozent der Ausgangsbauzeit} = \frac{1}{0.8} * 100 = 125 \%$$

Die Abweichung erklärt sich ebenfalls aus der gleichbleibenden Zeit für die Ausführung der logistischen Vorgänge, die zu einer Verringerung der Abweichung von der Gesamtbauzeit des Ausgangsszenarios führt.

Die Auswirkungen der Produktivität auf die Bauzeit stand im Mittelpunkt von **Test 3**. Gegenüber dem Ausgangsszenario wurde die Produktivität zunächst um 30 % gesteigert und anschließend um 30 % gesenkt (siehe Tabelle 6.5).

Tabelle 6.5: Parameter und Ergebnisse von Test 3

Szenario:	Ausgangsszenario	30 % höhere Produktivität	30 % niedrigere Produktivität
Parameter:	Produktivität der Vorarbeiter: 100 % Produktivität der Gesellen: 100 % Produktivität der Hilfsarbeiter: 100 %	Produktivität der Vorarbeiter: 130 % Produktivität der Gesellen: 130 % Produktivität der Hilfsarbeiter: 130 %	Produktivität der Vorarbeiter: 70 % Produktivität der Gesellen: 70 % Produktivität der Hilfsarbeiter: 70 %
Bauzeit:	607,3 h	474,5 h	854,2 h

Die gesteigerte Produktivität führte zu einer Gesamtbauzeit, die bei 78,1 % der Ausgangsbauzeit lag. Der berechnete Erwartungswert dieser Variante liegt bei 76,9 %. Die Senkung der Produktivität führte zu einer um 40,6 % längeren Bauzeit. Berechnet wurde eine um 42,9 % längere Bauzeit.

Die Verdopplung der Krane in **Test 4** hatte keine Auswirkungen auf die Bauzeit (siehe Tabelle 6.6). Das lässt darauf schließen, dass der Kran in diesem Szenario keinen Engpass darstellt.

Tabelle 6.6: Parameter und Ergebnisse von Test 4

Szenario:	Ausgangsszenario	Doppelte Anzahl Krane
Parameter:	1 Kran	2 Krane
Bauzeit:	607,3 h	607,6 h

Diese Annahme wird bei der Betrachtung des durchschnittlichen Auslastungsgrads des Krans über den zeitlichen Verlauf der Baumaßnahme bestätigt (siehe Abbildung 6.11). Dieser liegt im Ausgangsszenario bei lediglich 5 %. Erkennen lässt sich außerdem, dass der Auslastungsgrad des Krans zu Beginn der Bautätigkeit bei fast 10 % liegt und dann stetig sinkt. Diese Tatsache ist darauf zurückzuführen, dass die zu transportierenden Materialmengen zu Beginn der Rohbautätigkeiten sehr hoch sind.

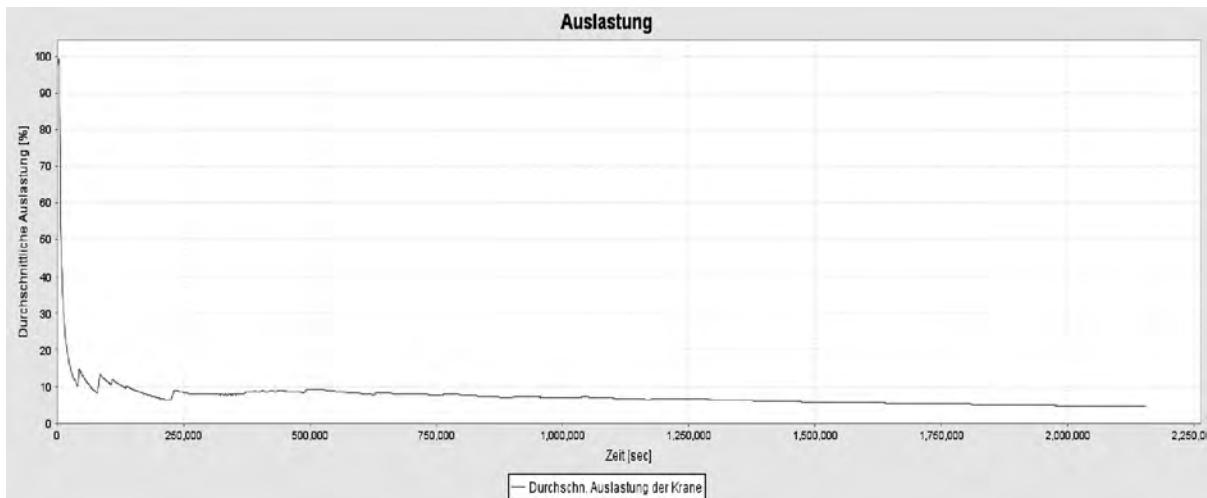


Abbildung 6.11: durchschnittliche Auslastung des Krans im Ausgangsszenario über den zeitlichen Verlauf der Baumaßnahme

In **Test 5** wurde geprüft, welche Auswirkungen ein leistungsfähigerer Kran auf die Bauzeit hat. Die Leistungsfähigkeit des Krans wurde gegenüber dem Ausgangsszenario verdoppelt, so dass mit einem ähnlichen Ergebnis wie in Test 4 zu rechnen war. Die Gesamtbauzeit verringerte sich um 1,5 % (siehe Tabelle 6.7), was auf die Beschleunigung des Materialtransports zurückzuführen ist. Die Differenz in Vergleich zu Test 4 lässt jedoch darauf schließen, dass die Steuerungsregeln des Krans überarbeitungsbedürftig sind.

Tabelle 6.7: Parameter und Ergebnisse von Test 5

Szenario:	Ausgangsszenario	leistungsfähigerer Kran
Parameter:	Ø Be- und Entladezeit Kran: 60 s Geschwindigkeit Lastfahrt Kran: 0,5 m/s Geschwindigkeit Leerfahrt Kran: 0,8 m/s	Ø Be- und Entladezeit Kran: 30 s Geschwindigkeit Lastfahrt Kran: 1 m/s Geschwindigkeit Leerfahrt Kran: 1,6 m/s
Bauzeit:	607,3 h	598,3 h

In **Test 6** wurden im Ausgangsszenario die Anzahl der eingesetzten Arbeitskräfte verdoppelt und ein Kran eingesetzt. Im Vergleichsszenario wurden zwei Krane verwendet (siehe Tabelle 6.8). Da bei einer höheren Belegschaftsstärke auf der Baustelle das Material schneller bereitgestellt werden muss, ist davon auszugehen, dass durch den Einsatz eines zweiten Krans die Bauzeit beschleunigt wird. Dieser Effekt war jedoch nicht zu beobachten. Die Auslastung der Krane lag im Ausgangsszenario bei ca. 10 % und im Vergleichsszenario erwartungsgemäß bei ca. 5 %.

Tabelle 6.8: Parameter und Ergebnisse von Test 6

Szenario:	Ausgangsszenario	doppelte Anzahl Krane
Parameter:	doppelte Anzahl Arbeitskräfte (vgl. Test 1) 1 Kran	doppelte Anzahl Arbeitskräfte 2 Krane
Bauzeit:	319,5 h	319,4 h

In **Test 7** wurde die Leistungsfähigkeit des Krans gegenüber dem Ausgangsszenario verdoppelt. Bei dieser Variante kam es wiederum zu einer Beschleunigung der Bauzeit um 3,1 %.

Tabelle 6.9: Parameter und Ergebnisse von Test 7

Szenario:	Ausgangsszenario	leistungsfähigerer Kran
Parameter:	doppelte Anzahl Arbeitskräfte (vgl. Test 1) Ø Be- und Entladezeit Kran: 60 s Geschwindigkeit Lastfahrt Kran: 0,5 m/s Geschwindigkeit Leerfahrt Kran: 0,8 m/s	doppelte Anzahl Arbeitskräfte Ø Be- und Entladezeit Kran: 30 s Geschwindigkeit Lastfahrt Kran: 1 m/s Geschwindigkeit Leerfahrt Kran: 1,6 m/s
Bauzeit:	319,5 h	309,6 h

Der Vergleich der Ergebnisse von Test 6 und Test 7 lässt wiederum darauf schließen, dass die Steuerungsregeln des Krans überarbeitungsbedürftig sind.

Der Zusammenhang zwischen der Anzahl der Bauabschnitte des Projektes und der Anzahl der eingesetzten Arbeitsgruppen stand im Mittelpunkt von **Test 8**. Im Modell können in einem Bauabschnitt zwei Arbeitsgruppen des gleichen Gewerks nicht gleichzeitig am selben Vorgang arbeiten. Werden die verfügbaren Arbeitskräfte eines Gewerks in mehrere Arbeitsgruppen eingeteilt, kann es bei einer geringen Anzahl von Bauabschnitten zu einer höheren Bauzeit kommen, da eventuell nicht alle Arbeitsgruppen gleichzeitig arbeiten können.

Tabelle 6.10: Parameter und Ergebnisse von Test 8

Szenario:	Ausgangsszenario	doppelte Anzahl Arbeitsgruppen	doppelte Anz. AG 2 Bauabschnitte
Parameter:	doppelte Anzahl Arbeitskräfte (vgl. Test 1) jew. 1 Arbeitsgruppe 1 Kran 1 Bauabschnitt	doppelte Anzahl Arbeitskräfte jew. 2 Arbeitsgruppen 1 Kran 1 Bauabschnitt	doppelte Anzahl Arbeitskräfte jew. 2 Arbeitsgruppen 1 Kran 2 Bauabschnitte
Bauzeit:	319,5 h	502,2 h	334,8 h

Dieser Effekt ließ sich im Test erwartungsgemäß beobachten. Bei einer Einteilung der Arbeitskräfte in zwei Arbeitsgruppen kam es gegenüber dem Ausgangsszenario mit jeweils nur einer Arbeitsgruppe pro Gewerk zu einem deutlichen Anstieg der Bauzeit. Erst bei einer Einteilung des Bauwerks in zwei Bauabschnitte wurde dieser Effekt wieder annähernd aufgehoben, da nun mehrere Arbeitsgruppen eines Gewerks zeitgleich in einem Geschoss arbeiten konnten.

Tabelle 6.11: Parameter und Ergebnisse von Test 9

Szenario:	1 Kran 1 Bauabschnitt	2 Krane 1 Bauabschnitt	2 Krane 2 Bauabschnitte
Parameter:	Doppelte Anzahl Arbeitskräfte jew. 2 Arbeitsgruppen 1 Kran 1 Bauabschnitt	Doppelte Anzahl Arbeitskräfte jew. 2 Arbeitsgruppen 2 Krane 1 Bauabschnitt	Doppelte Anzahl Arbeitskräfte jew. 2 Arbeitsgruppen 2 Krane 2 Bauabschnitte
Bauzeit:	502,2 h	496,8 h	324,7 h

In **Test 9** wurde die Anzahl der eingesetzten Krane und der Bauabschnitte bei jeweils zwei Arbeitsgruppen je Gewerk variiert (siehe Tabelle 6.11). Beim Einsatz von zwei Kranen und der Einteilung des Bauwerks in einen Bauabschnitt ergibt sich eine geringfügig kürzere Bauzeit, da mehrere Arbeitsgruppen teilweise gleichzeitig arbeiten und jeweils von einem Kran bedient werden können. Das volle Potential der zwei Krane und der doppelten Anzahl der Arbeitsgruppen kann jedoch erst bei der Einteilung des Bauwerks in zwei Bauabschnitte ausgeschöpft werden.

Bei diesem Szenario können fast permanent zwei Arbeitsgruppen gleichzeitig arbeiten. Gegenüber der Einteilung in zwei Bauabschnitte und dem Einsatz von einem Kran in Test 8 (334,8 h), ergibt sich beim Einsatz von zwei Kranen nochmals eine Reduzierung um fast genau 10 Stunden (324,7 h).

In **Test 10** wurde sowohl die Anzahl der Arbeitskräfte und der Arbeitsgruppen wie auch die Leistungsfähigkeit des Krans, bei gleichzeitiger Einteilung des Bauwerks in zwei Bauabschnitte, verdoppelt. Erwartet wurde eine annähernde Halbierung der Bauzeit gegenüber dem Ausgangsszenario (siehe Tabelle 6.12).

Tabelle 6.12: Parameter und Ergebnisse von Test 10

Szenario:	2 Bauabschnitte einfache Belegschaftsstärke	2 Bauabschnitte doppelte Belegschaftsstärke leistungsfähigerer Kran
Parameter:	einfache Anzahl Arbeitskräfte jew. 1 Arbeitsgruppe Ø Be- und Entladezeit Kran: 60 s Geschwindigkeit Lastfahrt Kran: 0,5 m/s Geschwindigkeit Leerfahrt Kran: 0,8 m/s 2 Bauabschnitte	doppelte Anzahl Arbeitskräfte jew. 2 Arbeitsgruppen Ø Be- und Entladezeit Kran: 30 s Geschwindigkeit Lastfahrt Kran: 1 m/s Geschwindigkeit Leerfahrt Kran: 1,6 m/s 2 Bauabschnitte
Bauzeit:	624 h	315 h

Das sich keine genaue Halbierung ergab, ist darauf zurückzuführen, dass die Weglängen, die von den Arbeitsgruppen zurückgelegt werden, gleichbleibend sind und die Geschwindigkeit der Arbeitskräfte nicht erhöht wurde.

Fast alle Wirkungsbeziehungen konnten durch die Tests bestätigt werden. Nur der Einfluss des Krans entspricht teilweise nicht den Erwartungen. Das bedeutet, dass die Steuerungsregeln des Krans überarbeitungsbedürftig sind. Die Regeln sehen vor, dass ein Kran eine Arbeitsgruppe bedient, bis alle für einen Teilvergäng notwendigen Materialien im Bauabschnitt vorliegen. Die Arbeitsgruppe wiederum kann nicht von zwei Kranen gleichzeitig beliefert werden.

6.5.2 Prüfung gegen die Aufgabenspezifikation (Phase 5,2)

In dieser V&V-Phase wurde das ausführbare Simulationsmodell zusammen mit den Daten der beiden Bauprojekte gegen die Aufgabenspezifikation und das in der Aufgabenspezifikation beschriebene reale System geprüft. Im Mittelpunkt stand dabei die Fragestellung, ob das Modell das Verhalten des realen Systems ausreichend genau darstellt. Wichtig ist daher in dieser Phase die Einbindung unabhängiger Fachexperten, deren Expertise in die Prüfung mit einfließt (*vgl. Rabe et al. 2008, S. 162 f.*). Die Fachexperten wurden durch die V&V-Technik „Validierung im Dialog“ in die Beurteilung des Modells mit einbezogen. Ein direkter Vergleich zwischen dem realen System und dem Simulationsmodell wurde durch die V&V-Techniken „Vergleich mit aufgezeichneten Daten“ und dem „Ereignisvaliditätstest“ durchgeführt. Die Schlüssigkeit der Ergebnisse und die Robustheit des Modells wurde durch die V&V-Technik „Grenzwerttests“ geprüft.

Validierung im Dialog

Bei dieser Technik erläutert der Simulationsexperte dem Fachexperten das Simulationsmodell. Der Fachexperte kann durch kritische Fragen die Ausführungen des Simulationsexperten unterbrechen und das Modell im Anschluss anhand fachlicher Kriterien beurteilen. Außerdem werden den Fachexperten Fragen, die sich auf die Beurteilung des Modells beziehen, vorgelegt.

Als unabhängige Fachexperten für die Validierung im Dialog wurden zwei Diplom-Ingenieure aus dem Bauwesen herangezogen. Beide Diplom-Ingenieure sind keine Simulationsexperten. Die Validierung im Dialog konzentrierte sich dadurch auf die fachlichen Kriterien, wie beispielsweise die Abbildung des Bauablaufs und der Baustelleneinrichtung im Modell.

Die Validierung im Dialog wurde in drei Phasen durchgeführt. In der **ersten Phase** erfolgte eine Prüfung des Modells ohne Daten. Das Hauptaugenmerk wurde dabei auf die Modellstruktur und die bereits in Abbildung 6.9 dargestellten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge im Modell gelegt (*vgl. Rabe et al. 2008, S. 163*). Die Fragen zur Beurteilung des Modells wurden auf Grundlage der bei *Rabe et al. (2008, S. 217)* genannten Fragen zur Verifikation und Validierung formuliert. Die Fragen konzentrierten sich darauf, ob die Struktur, die Komponenten, die Parameter und die Relationen des Modells die Struktur des realen Systems vollständig und korrekt darstellen. Des Weiteren wurde in den Fragen geklärt, ob die Systemgrenzen, die getroffenen Annahmen, die Detaillierung und die Ursache-Wirkungsbeziehungen geeignet sind, um das reale System im Modell abzubilden.

Die Modellstruktur wurde von den Fachexperten als vollständig und die Detaillierung als ausreichend genau bewertet. In den vorhandenen Modellparametern sind für die Experten alle wichtigen Eigenschaften des Systems enthalten, es wurde aber der Vorschlag gemacht, zusätzlich Wartungsintervalle und Ausfallzeiten der Betriebsmittel zu berücksichtigen. Die Abbildung des Personals im Modell wurde als zulässig bewertet, obwohl Personalstärken im Modell nur über feste Arbeitsgruppengrößen berücksichtigt werden können. Die Experten machten aber die Anregung zu definieren, wie viele Arbeitskräfte bei einem Vorgang mindestens notwendig sind oder die Personalstärke in Abhängigkeit von der Fertigungsmenge festzulegen. Bei der Betrachtung der Ursache-Wirkungsbeziehungen im Modell machten die Fachexperten die Empfehlung, zusätzlich die Beziehungen zwischen Platzangebot und Arbeitsleistung sowie zwischen dem Einarbeitungseffekt und der Produktivität zu integrieren.

In der **zweiten Phase** der Validierung im Dialog wurde das Verhalten des ausführbaren Modells mit dem realen System verglichen. Dabei wurde das Simulationsmodell mit den Daten der beiden Bauprojekte ausgeführt und den Fachexperten anhand der Animation der Simulationsläufe vorgestellt. Danach wurden die in Kapitel 5 vorgestellten Verhaltensnetze der Agenten den Fachexperten erläutert. Die Fragen zur Beurteilung des Verhaltens bezogen sich auf die Schlüssigkeit, die Nachvollziehbarkeit, die Vollständigkeit, den Detaillierungsgrad und die Steuerungsregeln des Modellverhaltens.

Das Verhalten des Modells wurde von den Fachexperten unter den gemachten Annahmen als durchgängig schlüssig, nachvollziehbar und geeignet bewertet. Lediglich das Verhalten bzw. die Steuerungsregeln des Krans wurden bemängelt. Es wurde vorgeschlagen, dass der Kran nach jedem Arbeitseinsatz aus dem Arbeitsbereich in die Ausgangsstellung fährt. Beanstandet wurde außerdem, dass das Werkzeug des Krans (Kranhaken, Kübel etc.) nicht gewechselt wurde und beim Einsatz von mehreren Kranen keine Kollisionsprüfung stattfand. Die Steuerungsregeln des Kranen werden als überarbeitungsbedürftig bezeichnet. Die Experten halten es nicht für realistisch, dass immer nur eine Arbeitsgruppe vollständig beliefert wird. Sie schlugen vor, den Kran intelligenter zu machen, so dass er selbstständig prüfen kann, welche Arbeitsgruppen am dringendsten Material benötigen oder alternativ Prioritäten für die Materiallieferung zu vergeben.

Die **dritte Phase** der Validierung im Dialog bestand aus der Beurteilung der Eignung des Simulationsmodells für die in der Aufgabenspezifikation genannten Einsatzzwecke für das Simulationsmodell. Den Fachexperten wurde dazu zunächst die Aufgabenspezifikation vorge stellt. Die vorgelegten Fragen befassten sich damit, ob das Simulationsmodell zur Unterstützung der Aufgaben der Arbeitsvorbereitung geeignet ist, alle notwendigen Ergebnisgrößen vom Modell erzeugt werden und aus den Teilmodellen alle für den Hochbau denkbaren Modellvarianten aufgebaut werden können. Des Weiteren sollten die Experten beurteilen, ob die Animation und die Visualisierung geeignet erscheinen und das Modell durch das Laufzeitverhalten in der Praxis nutzbar ist.

Die Fachexperten bestätigten die Eignung des Simulationsmodells für die vorgesehenen Aufgaben der Arbeitsvorbereitung (Verfahrensvergleich, Bauablaufplanung, Ressourcenplanung und Baustelleneinrichtung). In Bezug auf die Benutzung des Modells machten sie den Vorschlag, die Ressourcenzuweisungen interaktiv während des Simulationslaufs ändern zu können, um die Auswirkungen direkt im Modell nachzuvollziehen. Angeregt wurde außerdem

eine Ergebnisdatenverwaltung in das Menü im CAD-System zu integrieren, um einen besseren Zugriff auf die Ergebnisdatenbank zu haben. Die Sequenzierung der Prozesse wurde zwar als effizient, aber wenig anschaulich und kompliziert bezeichnet. Die Fachexperten schlugen vor, eine graphische Darstellung der Folge zwischen den Vorgängen zu implementieren. Die Animation und Visualisierung wurde für die Arbeit der Arbeitsvorbereitung als sehr anschaulich und vollkommen ausreichend bezeichnet. Sehr positiv bewerteten sie die Ergebnisdarstellung im Terminplan mit der Möglichkeit, den zeitlichen Ressourceneinsatz nachzuvollziehen. Hervorgehoben wurde von den Fachexperten, dass die Ergebnisdatenbank darüber hinaus für eine 4-D-Simulation verwendet werden könnte. Sie bemängelten aber, dass der Kran bei der Darstellung des Ressourceneinsatzes im Terminplan fehlt. Dadurch, dass beliebig neue Vorgänge, Betriebsmittel und Ressourcen definiert werden können, wurde die Verwendungsmöglichkeit des Modells für ein großes Spektrum unterschiedlicher Hochbauszenarien bestätigt. Das Laufzeitverhalten des Modells bezeichneten die Experten als für die Praxis akzeptabel.

Vergleich mit aufgezeichneten Daten

Um das Simulationsmodell mit dem realen System zu vergleichen, wurde die V&V-Technik „Vergleich mit aufgezeichneten Daten“ verwendet. Bei dieser Technik werden Daten des realen Systems mit den Ergebnissen der Simulationsläufe verglichen. Verwendung fanden in diesem Test die Daten der in Unterkapitel 6.3 beschriebenen Bauprojekte.

Erwartet wurde, dass die Simulationslaufzeit etwas über der Zeit des realen Bauprojektes liegt. Diese Abweichung resultiert aus der im Modell ausgeführten Materiallogistik und den Bewegungen der Arbeitsgruppenagenten. In den verwendeten Arbeitszeitrichtwerten sind die Zeiten für die logistischen Vorgänge als Zuschläge bereits enthalten, so dass sie während eines Simulationslaufs doppelt berücksichtigt werden. Die Zuschläge der verwendeten Arbeitszeitrichtwerte bestehen aus ablaufbedingten Wartezeiten (5 %), sachlicher Verteilzeit (5 %), persönlicher Verteilzeit (5 %) und der Erholungszeit (10 %) (*Irmschler et al. 2000, S. 973 f.*). Im Modell werden jedoch nur die aufgrund der logistischen Vorgänge auftretenden ablaufbedingten Wartezeiten und die sachlichen Verteilzeiten teilweise berücksichtigt, so dass von einer Abweichung von deutlich unter 10 % auszugehen ist.

Für das Projekt „Passivhausreihensiedlung“ wurde als reale Vergleichszeit eine Bauzeit von 568,1 h ermittelt (*Bleichert 2011, S. 91 ff.*). Diese Zeit ist bereits um die Bauzeit einiger Vorgänge bereinigt, die in der Simulation nicht berücksichtigt werden konnten.

Die Bauzeit wurde mit den Ergebnissen aus zwei Experimenten verglichen. Als Parameter fanden bei dem ersten Experiment deterministische Zeitaufwandswerte für die Dauer der Arbeitsvorgänge Verwendung. Die logistischen Prozesse wurden weitgehend ausgeschaltet, indem für die Vorgänge kein Materialbedarf angesetzt wurde. Die gemittelte Bauzeit von 10 Simulationsläufen lag bei 580 h. Von der realen Bauzeit ergab sich damit eine Abweichung von 2,1 %. Die Abweichung war in diesem Umfang erwartet worden, da die Bewegungen der Arbeitsgruppen im Simulationsmodell zusätzliche Zeit beanspruchen.

Im zweiten Experiment fanden ebenfalls deterministische Zeitaufwandswerte Verwendung. Zusätzlich wurde in diesem Experiment die Materiallogistik in vollem Umfang berücksichtigt. Für die Kranpielzeiten kamen ebenfalls deterministische Zeitaufwandswerte zum Einsatz. Erwartet wurde diesmal eine wesentlich größere Zeitabweichung zwischen der Simulation und dem aufgenommenen Bauablauf, da die Materiallogistik in der Simulation zusätzliche Zeit in Anspruch nimmt. Bei der Durchführung der Experimente ergab sich bei 10 Simulationsläufen eine gemittelte Bauzeit von 604,9 h. Diese Zeit entspricht einer Abweichung von 6,5 % von der realen Bauzeit.

Die Daten des Bauprojektes „Altenpflegeheim“ wurden für einen Einzelvergleich der Bauzeiten von 22 verschiedenen Bauteiltypen herangezogen. Aus diesem Vergleich konnten die Gründe für die Abweichungen zwischen realer und simulierter Bauzeit detailliert nachvollzogen werden. In diesem Experiment wurde die Materiallogistik vernachlässigt und die Dauer der Arbeitsvorgänge durch deterministische Zeitaufwandswerte berücksichtigt (*vgl. Schneider 2011, S. 109 ff.*).

Tabelle 6.13: Vergleichszeiten einzelner Bauteiltypen aus dem Projekt "Altenpflegeheim"

Bauteiltyp	reale Vergleichszeit	simulierte Bauzeit	Abweichung
KS 24,0	7560 s	13560 s	44,2 %
KS 11,5	594630 s	639750 s	7,1 %
MW 36,5	8063392 s	8093540 s	0,4 %
Bodenplatte	4205880 s	4209580 s	0,1 %

Tabelle 6.13 enthält die Vergleichszeiten einzelner Bauteiltypen aus diesem Experiment. Die Abweichungen zwischen der realen und der simulierten Zeit schwanken in Abhängigkeit vom Bauteiltyp sehr stark.

Die Analyse ergab, dass die Größe der Abweichung von folgenden Faktoren abhängig ist (vgl. Schneider 2011, S. 111 f.):

1. dem zugehörigen Zeitaufwandswert des Bauteiltyps
2. der Anzahl der Bauteile eines Bauteiltyps
3. der Verteilung der Bauteile eines Bauteiltyps im Gebäude
4. der Masse der Bauteile eines Bauteiltyps

So besitzt beispielsweise die *Bodenplatte* eine große Masse und es existiert nur eine Bodenplatte im Gebäude. Die Bewegungen der Arbeitsgruppen haben bei dieser Tätigkeit daher nur einen geringen Anteil an der Gesamtbauzeit. Dem Bauteiltyp *KS 24,0* gehören im Gebäude nur sehr wenige, kleine Bauteile an, die darüber hinaus auf alle Geschosse verteilt sind. Der Zeitaufwandswert für die Fertigung der Bauteile des Bauteiltyps *KS 24,0* ist Verhältnismäßig niedrig. Die Bewegungszeit der Arbeitsgruppe macht aus diesen Gründen prozentual einen sehr hohen Anteil an der simulierten Bauzeit aus.

In einem weiteren Experiment wurde die Fertigung einzelner Bauteiltypen unter Berücksichtigung der Materiallogistik simuliert. Erwartungsgemäß ergaben sich zusätzliche Zeitabweichungen, die in direkter Abhängigkeit von der für die Fertigung des Bauteiltyps benötigten Materialmenge standen. Vorgänge, bei denen das Material vom Kran in den Bauabschnitt und nicht direkt an das Bauteil geliefert wurde, zeigten größere zeitliche Abweichungen von der Ausgangszeit.

Die im zweiten Experiment erzielte Abweichung von 6,5 % von der realen Bauzeit lässt sich denen in den verwendeten Arbeitszeitrichtwerten angesetzten ablaufbedingten Wartezeiten (5 %) und der sachlichen Verteilzeit (5 %) zuordnen. Dass diese Zeiten für einen genaueren Vergleich zwischen simulierter und realer Bauzeit nicht pauschal abgezogen werden können, zeigt jedoch der Vergleich der Einzelzeiten. Der logistische Zeitanteil an der Bautätigkeit ist im Simulationsmodell sehr stark von dem zu fertigenden Bauteil, dem Grundriss des Gebäudes und der Fertigungsmenge abhängig.

Ereignisvaliditätstest

Als weitere V&V-Technik zum Vergleich des Simulationsmodells mit dem realen System wurde der „Ereignisvaliditätstest“ eingesetzt. Bei diesem Test werden die im Simulationsmodell auftretenden Ereignisse mit den Ereignissen im realen System verglichen (vgl. Rabe et al. 2008, S. 99).

Tabelle 6.14: Vergleichsdaten des realen Bauprojektes

Pos. Nr. LV	Tätigkeit	Vor- gänger	Beziehung zum Vorgänger	Zeit	Anfangs- datum	End- datum
02.011	Kiesschicht unter Folie d = 15 cm liefern und einbauen	03.013	E/A	9,60 h	25.6.07	26.6.07
04.002	Feuchtigkeitssperre PE-Folie 0,3	02.011	E/A	2,16 h	26.6.07	26.6.07
04.001	Sauberkeitsschicht C12/15 d=5- 10 cm	04.002	E/A	3,96 h	26.6.07	27.6.07
04.024	Dämmeschicht unter Bodenplatte d=30 cm	04.001	E/A	7,59 h	28.6.07	28.6.07
04.006	Stb-Sohle C20/25 d=60 cm schalen	04.024	E/A	8,32 h	28.6.07	2.7.07
04.006	Stb-Sohle C20/25 d=30 cm bewehren	04.024	E/A	51,94 h	2.7.07	5.7.07
04.006	Stb-Sohle C20/25 d=30 cm betonieren	04.024	E/A	9,13 h	5.7.07	5.7.07

Im Test wurde ein Vergleich der Reihenfolge der Bauvorgänge im Bauprojekt mit der Reihenfolge der Vorgänge im Simulationslauf durchgeführt. Auf Grundlage dieses Tests war es möglich zu beurteilen, ob die Sequenzierungsbedingungen aus dem Prozessmodell korrekt im Simulationsmodell verarbeitet werden und ob sich die in Form von Voraussetzungen definierten Sequenzierungsbedingungen im Prozessmodell für die Abbildung des Bauablaufs eignen.

Als Ausgangsdaten des Tests wurden die Daten aus dem Bauprojekt „Passivhausreihensiedlung“ verwendet. Tabelle 6.14 enthält Vergleichsdaten des realen Bauprojektes mit den Anordnungsbeziehungen der Vorgänge und dem Anfangs- und Enddatum der jeweiligen Bauaktivität. Der dargestellte Ausschnitt aus dem Bauprojekt bezieht sich auf die Fertigung der Bodenplatte des Gebäudes. Abbildung 6.12 enthält den Terminplan in Form eines Ganntdiagramms, der auf Basis der Ergebnisse eines Simulationslaufs generiert wurde.

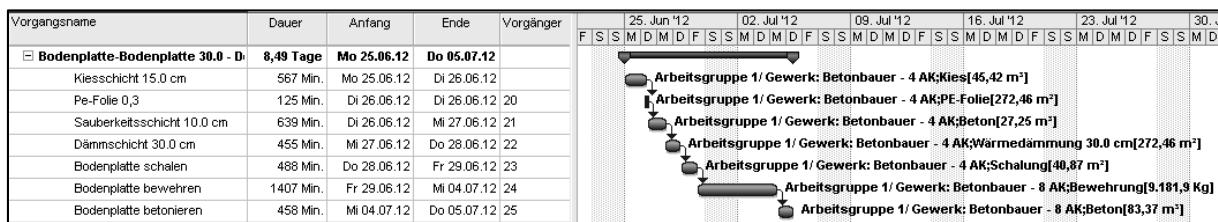


Abbildung 6.12: Ausschnitt aus dem Terminplan der auf Basis der Simulationsergebnisse generiert wurde

Aus dem Ganntdiagramm gehen ebenfalls die Anordnungsbeziehungen zwischen den simulierten Vorgängen hervor. Die Eignung des Simulations- und des Prozessmodells für die Abbildung der Reihenfolge zwischen den Bauvorgängen konnte anhand dieses Vergleichs für das im Test verwendete Bauprojekt nachgewiesen werden.

Grenzwerttest

Um die Schlüssigkeit der Ergebnisse bei der Verwendung von Extremdaten und die Auswirkungen einzelner Modelleigenschaften und Modellkomponenten auf das Gesamtsystemverhalten zu testen, wurden verschiedene Grenzwerttests durchgeführt. Im Mittelpunkt der Tests standen die logistischen Vorgänge. Als Testdaten wurden die Parameter des Projektes „Passivhausreihensiedlung“ verwendet. Die mit den Extremwerten durchgeföhrten Simulationsläufe wurden mit zwei Szenarien verglichen. Das erste Vergleichsszenario wurde komplett ohne Materiallogistik und das zweite mit Normwerten für die Materiallogistik simuliert (siehe Tabelle 6.15). Zwischen diesen beiden Szenarien bestand ein zeitlicher Unterschied von 24,9 h.

Im ersten Grenzwerttest wurde die Krangeschwindigkeit mit 1000 m/s und die Be- und Entladezeiten des Krans mit 1 s auf Extremwerte gesetzt. Der Einfluss des Krans auf die Gesamlaufzeit wurde dadurch minimiert. Gegenüber dem Szenario mit den Normwerten ergab sich eine um 16,6 h schnellere Bauzeit.

Im zweiten Grenzwerttest wurde die Schrittgeschwindigkeit der Arbeitskräfte auf 1000 m/s erhöht. Die durch die Arbeitskräfte verursachten Transportzeiten wurden dadurch extrem beschleunigt. Gegenüber dem Szenario mit Normwerten wurde die Bauzeit um 8,3 h verringert.

Im dritten Grenzwerttest wurden sowohl die Extremwerte für die Kranspielzeiten wie auch für die Schrittgeschwindigkeit der Arbeitskräfte verwendet. Die Gesamlaufzeit beschleunigte sich gegenüber dem Normwertszenario um 23,3 h.

Tabelle 6.15: Grenzwerttests zur Materiallogistik

Sze-nario:	Ausgangs-szenario	Mit Material-logistik	schneller Kran	schnelle Arbeitskräfte	schneller Kran und AK
Para-meter:	Schrittgeschwindigkeit: 1 m/s Ø Be- und Entladezeit Kran: 60 s Keine Materiallogistik Geschwindigkeit Lastfahrt Kran: 0,5 m/s Geschwindigkeit Leerfahrt Kran: 0,8 m/s	Schrittgeschwindigkeit: 1 m/s Ø Be- und Entladezeit Kran: 1 s Geschwindigkeit Lastfahrt Kran: 1000 m/s Geschwindigkeit Leerfahrt Kran: 1000 m/s	Schrittgeschwindigkeit: 1000 m/s Ø Be- und Entladezeit Kran: 60 s Geschwindigkeit Lastfahrt Kran: 0,5 m/s Geschwindigkeit Leerfahrt Kran: 0,8 m/s	Schrittgeschwindigkeit: 1000 m/s Ø Be- und Entladezeit Kran: 1 s Geschwindigkeit Lastfahrt Kran: 1000 m/s Geschwindigkeit Leerfahrt Kran: 1000 m/s	
Bauzeit:	580 h	604,9 h	588,3 h	596,6 h	581,6 h

Die Ergebnisse der Grenzwerttests entsprechen den Erwartungen. Die Summe der Abweichungen vom Normszenario aus dem ersten und zweiten Grenzwerttest (16,6 h und 8,3 h) entspricht genau der Differenz zwischen den Läufen mit und ohne Materiallogistik (24,9 h). Liegen die Schrittgeschwindigkeit und die Spielzeit des Krans bei Extremwerten ergibt sich mit 581,6 h in etwa die gleiche Laufzeit wie bei deaktivierter Materiallogistik mit 580 h. Werden die Einflüsse der verschiedenen Logistikparameter durch Extremwerte minimiert ergeben sich daher weiterhin plausible Simulationsergebnisse.

Laufzeitverhalten des Simulationsmodells

Für den Test des Laufzeitverhaltens wurden verschiedene Simulationsläufe auf einem Laptop ausgeführt und die Zeiten für die jeweiligen Simulationsläufe aufgenommen. Der verwendete Laptop verfügt über einen Intel Core 2 Duo Prozessor mit einer Leistung von 2,8 GHz. Für den Test wurde das Projekt „Passivhausreihensiedlung“ verwendet. Die Parameter des Projektes wurden für den Test variiert, um unterschiedliche Bauzeiten zu erhalten.

Aus diesem Test und dem Vergleich mit der Laufzeit des Projektes „Altenpflegeheim“ lässt sich nachweisen, dass die Laufzeit sehr stark abhängig von der simulierten Gesamtbauzeit und der Anzahl der im Modell enthaltenen Objekte ist.

Tabelle 6.16: Laufzeitverhalten des Modells unter verschiedenen Testbedingungen

Testbedingungen	Bauzeit	Laufzeit
ohne Animation	606,1 h	12 min.
mit Animation	606,4 h	15 min.
20 % höhere Motivation der Arbeitskräfte, ohne Animation	512,1 h	10 min.
Doppelte Anzahl an Arbeitskräften, ohne Animation	319,5 h	7 min.

Für eine größere Anzahl an Tests ist die Laufzeit des Modells zu lang. SeSAM bietet jedoch die Funktionalität, die einzelnen Simulationsläufe eines Experiments auf mehreren Rechnern verteilt laufen zu lassen. Die hohen Laufzeiten ergeben sich aus der im Modell verwendeten diskreten-zeitgesteuerten Simulationsmethode. Bei dieser Zeitablaufsteuerung wird die Simulationszeit jeweils um ein festes Zeitinkrement erhöht (siehe Kapitel 2.1). Durch die Verwendung einer diskret-ereignisorientierten Zeitablaufsteuerung könnte die Simulationszeit erheblich beschleunigt werden. Jedoch wären dafür umfangreiche Arbeiten am Simulationsmodell notwendig.

6.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die wichtigsten Ergebnisse dieses Kapitels beziehen sich auf die Validität der Anwendung CiSmo und des zugehörigen Simulationsmodells.

Die Eignung der **Anwendung** ließ sich in Bezug auf die Parametereingabe und -variation, die Prozessmodellierung, die Modellgenerierung und das verwendete CAD-Modell beurteilen.

Die Testpersonen bestätigten, dass eine schnelle **Parametereingabe und –variation** mit der Anwendung möglich ist, auch wenn die Benutzerfreundlichkeit in einigen Punkten verbessert werden sollte. Durch einen in Form eines Wizards geführten Menüaufbau könnte eine weitere Beschleunigung der Parametereingabe erreicht werden. Die Parametervariation für die Durchführung verschiedener Experimente konnte durch die Testpersonen unkompliziert und schnell umgesetzt werden. Bei gleichbleibender Gebäudestruktur müssen mit Hilfe der Anwendung nur Datenbankeinträge manipuliert werden, um Simulationsläufe mit geänderten Parametern ausführen zu können. Durch die Verknüpfung der abstrakten Bauteiltypen mit den Bauverfahren und die abstrakte Definition der Voraussetzungen ist die Anzahl an Schnittstellen zwischen Gebäude- und Prozessmodell sehr gering. Der Wechsel der eingesetzten Bauver-

fahren ist dadurch schnell durchführbar, so dass sich das Werkzeug sehr gut für Verfahrensvergleiche eignet.

Durch die Eingabe der Daten zweier unterschiedlicher Bauprojekte konnte nachgewiesen werden, dass das **Prozessmodell** für eine vollständige Erfassung der benötigten Ressourcen und der Bauvorgänge geeignet ist. Die durch das Prozessmodell in Form von Voraussetzungen definierten Sequenzierungsbedingungen konnten alle in den beiden Bauprojekten vorkommenden Reihenfolgebedingungen zwischen den Bauvorgängen abbilden. Bemängelt wurde lediglich die sehr abstrakte Definition der Voraussetzungen. Durch die Einbindung einer graphischen Darstellung der Reihenfolge zwischen den Vorgängen könnte die Modellierung anschaulicher gestaltet werden.

Sowohl von denen in die Tests einbezogenen Diplomanden wie auch von den involvierten Fachexperten wurde die einfache und schnelle **Modellgenerierung** durch das System hervorgehoben. Beide Testpersonen der Anwendung CiSmo waren in der Lage, selbstständig Experimente zu definieren und in der agentenbasierten Simulationsumgebung SeSAM auszuführen. Hervorzuheben ist, dass eine Testperson überhaupt keine Kenntnisse in Bezug auf die Simulationsumgebung und die zweite lediglich Kenntnisse der Basisfunktionen besaß. Es lässt sich daher festhalten, dass

- eine Nutzung des Systems möglich ist ohne Simulationsexperte zu sein,
- kein oder nur geringes Expertenwissen im Simulationswerkzeug notwendig ist und
- eine schnelle Modellgenerierung bei relativ geringem Aufwand für die Parametrisierung und Modellierung mit dem System durchführbar ist.

Die Eignung des verwendeten bauteilorientierten **CAD-Modells** wurde aufgrund des zu geringen Detaillierungsgrads kritisch bewertet. Viele Vorgänge konnten nur durch die Verwendung von pauschalisierten Werten mit den Bauteiltypen des Gebäudemodells verbunden werden. Die Möglichkeit zur Definition zusätzlicher Bauteileigenschaften wurde von den Testpersonen als zu kompliziert empfunden. Das verwendete Prozessmodell lässt sich aufgrund seines Aufbaus aber auch alternativ mit detaillierteren BIM-basierten CAD-Modellen verknüpfen, so dass dieser Nachteil ausgeglichen werden kann.

Die prinzipielle Eignung des **Simulationsmodells** konnte in verschiedenen Tests nachgewiesen werden. Die Eignung der Modellstruktur, des Modellverhaltens und der vom Simulati-

onsmodell erzeugten Ergebnisse wurde mit der „Validierung im Dialog“ durch Fachexperten bestätigt. Es wurden jedoch eine Reihe von Anregungen zur weiteren Detaillierung des Modells gemacht, wie z. B. durch die Berücksichtigung des Platzangebots oder die Verknüpfung der verschiedenen Vorgänge mit bestimmten Personalstärken.

Die im Modell verwendeten Wirkungsbeziehungen wurden von den Fachexperten als gültig bezeichnet. Die korrekte Abbildung der Wirkungsbeziehungen im Modell konnte anhand von Tests nachgewiesen werden, die auf der Grundlage eines Ursache-Wirkungsgraphen aufgestellt wurden. Das Modell reagierte in den Tests erwartungsgemäß. Es wurde jedoch festgestellt, dass die Steuerungsregeln des Krans überarbeitungsbedürftig sind. Die komplette Anlieferung aller für einen Bauvorgang benötigten Materialien durch den Kran spiegelt das reale Systemverhalten nicht hinreichend genau wider. Die Anlieferung sollte sich eher am Materialbedarf der Arbeitsgruppen orientieren, der durch den Baufortschritt entsteht.

Die Übereinstimmung mit dem realen System wurde anhand des Vergleichs der Ergebnisse der Simulationsläufe mit den Ergebnissen der realen Bauprojekte überprüft. Die Arbeitszeiten wurden korrekt im Modell abgebildet und die aufgrund der zusätzlich im Modell berücksichtigten Materiallogistik entstandenen Abweichungen von der realen Bauzeit entsprachen den Erwartungen. Um eine bessere Passung der Ergebnisse zu erhalten, müssen die verwendeten Arbeitszeitrichtwerte, um die bereits berücksichtigten Aufwandszeiten für logistische Tätigkeiten bereinigt werden. Ein pauschalierter Abzug erscheint nicht sinnvoll, da der Logistikaufwand von einer ganzen Reihe von Faktoren abhängig ist. Eine umfangreiche empirische Erfassung der logistischen Aufwandswerte ist daher notwendig. Durch Grenzwerttests konnte aber die Schlüssigkeit des Verhaltens der logistischen Teilmodelle bestätigt werden.

Durch den Ereignisvaliditätstest konnte nachgewiesen werden, dass die Reihenfolgebedingungen im Modell korrekt ausgewertet wurden und die Reihenfolge der Bautätigkeiten im Modell der Reihenfolge im realen System entsprachen. Durch die Sequenzierungsbedingungen konnten alle in den beiden Bauprojekten auftretenden Fälle abgebildet werden.

7 Fazit und Ausblick

Die Simulation konnte sich bisher als Methodik zur Prognose des Bauablaufs in der Arbeitsvorbereitung im Hochbau nicht durchsetzen. Begründet wird dieser Sachverhalt durch den hohen Arbeitsaufwand, der aufgrund des Unikatcharakters der Bauprojekte mit einer Simulationsstudie im Bauwesen verbunden ist. In dieser Arbeit wurden die wissenschaftlichen Grundlagen für eine Beschleunigung der Parametrisierung und Modellierung von Simulationsmodellen für Hochbauprojekte erarbeitet. Als Ausgangspunkt wurde ein Prozessmodell entwickelt, das die Prozesse und Ressourcen eines Hochbauprojektes abbildet und sich mit einem bauteilorientierten Gebäudemodell zu einem simulationsrelevanten Produktmodell integrieren lässt. Gleichzeitig wurde ein agentenbasiertes Simulationsmodell entworfen, welches durch die Daten dieses Produktmodells parametrisiert wird. Auf der Grundlage des Prozess- und des Simulationsmodells wurde die Modellierungsumgebung CiSmo prototypisch implementiert. Durch die Verwendung der CAD-Daten als Systemlast und der wiederverwendbaren Prozessbeschreibung konnte mit der Modellierungsumgebung eine erhebliche Reduzierung des Arbeitsaufwandes bei der Dateneingabe und der Modellierung des Simulationsmodells erreicht werden, so dass erstmals der Einsatz der Simulation als Standardmethodik in der Arbeitsvorbereitung denkbar ist.

7.1 Zusammenfassende Bewertung des Prozessmodells

Bei der Entwicklung des Prozessmodells wurde insbesondere auf eine geringe Anzahl an Schnittstellen zwischen Gebäude- und Prozessmodell Wert gelegt, um eine schnelle Verknüpfung der beiden Modelle zu gewährleisten. Diese Zielsetzung konnte erreicht werden, indem die Verfahren mit abstrakten Bauteiltypen und dadurch mit einer ganzen „Klasse“ von Bauteilen verbunden werden. Da die Verfahren aus mehreren Vorgängen bestehen, können in einem Schritt mehrere Vorgänge mit dem Gebäudemodell verbunden werden, was die Anzahl an Schnittstellen zwischen Gebäude- und Prozessmodell weiter reduziert. Für die Sequenzierung der Vorgänge wurde eine Methodik entwickelt, die es ermöglicht, die Reihenfolgebedingungen zwischen den Vorgängen allgemeingültig für alle Bauteile eines Bauteiltypen zu definieren. Durch die Verwendung von zusätzlichen Bauteileigenschaften lässt sich eine größere Menge an Bauteilen zu einem Bauteiltyp zusammenfassen. Die Anzahl an verschiedenen Bauteiltypen und damit auch die Anzahl der Schnittstellen zu den Verfahren des Prozessmodells wird dadurch weiter verringert.

In Bezug auf seine Anwendungsmöglichkeiten besitzt das Prozessmodell eine sehr hohe Flexibilität, da der Anwender die Prozesse und deren Voraussetzungen sowie die notwendigen Ressourcen komplett selbst definieren und strukturieren kann. Die Prozesse lassen sich mit dem entwickelten Prozessmodell in einer vom Anwender gewünschten Detailtiefe modellieren. Eine solche Flexibilität ist für die Unikatfertigung im Hochbau in jedem Fall erforderlich, um auch neue Bauverfahren integrieren zu können. Bei häufiger Verwendung ergibt sich automatisch eine Verringerung des Arbeitsaufwandes für die Prozessmodellierung, da die einmal definierten Bausteine des Prozessmodells (Verfahren, Vorgänge, Teilvorgänge und Ressourcen) in anderen Projekten wiederverwendet werden können.

Das Prozessmodell lässt sich problemlos mit den Gebäudemodellen verschiedener CAD-Systeme verknüpfen. Unterschiede im Detaillierungslevel zwischen Gebäude- und Simulationsmodell lassen sich durch die Integration zusätzlicher Bauteileigenschaften überwinden. Der Detaillierungsgrad kann dadurch vom Anwender sowohl auf der Seite des Gebäude- wie auch auf der Seite des Prozessmodells selbst definiert werden.

7.2 Fazit in Bezug auf das agentenbasierte Simulationsmodell

Das entwickelte agentenbasierte Simulationsmodell besitzt einen sehr hohen Detaillierungsgrad. Im Modell werden sowohl die Haupttätigkeit am Gewerk, die logistischen Vorgänge und die Interaktionen der Arbeitsgruppen mit größeren Betriebsmitteln betrachtet. Dadurch lässt sich sowohl der Auslastungsgrad von Arbeitskräften als auch von großen Arbeitsmaschinen bestimmen. Dass der Parametrisierungs- und Modellierungsaufwand des Modells dennoch gering ist, wird durch die Instanziierung der Betriebsmittel und Arbeitskräfte von vordefinierten Agentenklassen gewährleistet.

Das räumlich und organisatorisch verteilte Arbeiten auf der Baustelle ließ sich in dem agentenbasierten Simulationsmodell realitätsnah abbilden. Das ist insbesondere auf die Kommunikations- und Orientierungsfähigkeit der Agenten zurückzuführen. Durch die Kommunikationsfähigkeit können die Arbeiten auf verschiedene Arbeitsgruppen verteilt werden, die diese dann unabhängig unter Betrachtung der eigenen Zielstellung ausführen. Dadurch kann es wie auf der realen Baustelle zu Konfliktsituationen um begrenzt vorhandene Ressourcen kommen. Die Sensoren der Agenten können das heterogene räumliche Umfeld auf der Baustelle selbstständig erfassen und sind dadurch in der Lage, selbstständig Wege zu berechnen. Die aufwendige Definition von Wegenetzen kann daher entfallen.

Da die Agenten nicht über Schnittstellen, sondern über Nachrichten kommunizieren, kann das Modell leicht um weitere Agentenklassen erweitert werden. Die neuen Agentenklassen müssen lediglich in der Lage sein, die ausgetauschten Nachrichteninhalte zu interpretieren. Das Modell bietet dadurch die für die Unikatfertigung notwendige Flexibilität, da es möglich ist, neue Bauverfahren und neue Betriebsmittel zu integrieren.

Das entwickelte Modell besitzt den Nachteil einer relativ hohen Laufzeit. Diese ist insbesondere auf die durch das Simulationswerkzeug vorgegebene zeitdiskrete Zeitablaufsteuerung zurückzuführen. Erste Versuche haben gezeigt, dass durch eine Kombination von farbigen Petri-Netzen mit einem agentenbasierten Modell, bei gleicher Datenbasis eine erhebliche Beschleunigung der Simulationslaufzeit erreicht werden kann (*Samkari et al. 2012*).

7.3 Fazit in Bezug auf die prototypische Implementierung

Mit der prototypischen Implementierung des Modellierungswerkzeugs CiSmo konnte nachgewiesen werden, dass sich der Parametrisierungs- und Modellierungsaufwand für ein Simulationsmodell im Hochbau erheblich senken lässt. Für die Erfassung der Systemlast in Form des Gebäudemodells fällt kein Arbeitsaufwand an, wenn die Daten im erforderlichen CAD-Format vorliegen. Sind die notwendigen Prozess- und Ressourcendaten in der Datenbank vorhanden, so müssen lediglich die Bauteiltypen des Gebäudemodells mit den zu verwendenden Bauverfahren verknüpft werden, um auf dieser Basis automatisch ein Simulationsmodell zu generieren. Die Eignung der Modellierungsumgebung und des zugehörigen Simulationsmodells für die Aufgaben der Arbeitsvorbereitung konnte anhand verschiedener Tests nachgewiesen werden. Die Tests belegen außerdem, dass auch Anwender ohne ausgeprägte Erfahrungen auf dem Gebiet der Simulation in der Lage sind, mit der Modellierungsumgebung Simulationsmodelle zu erstellen und Experimente durchzuführen.

Für eine weitere Verwertung der Arbeitsergebnisse müsste der wirtschaftliche und organisatorische Nutzen der Modellierungsumgebung evaluiert werden. Ein erster Schritt in diese Richtung könnte aus einem testweisen baubegleitenden Einsatz der Modellierungsumgebung in einem Pilotprojekt bestehen.

Des Weiteren haben die in Kapitel 6 durchgeführten Tests gezeigt, dass das bauteilorientierte CAD-Modell der Anwendung Architecture nicht detailliert genug ist, um alle Bauvorgänge ohne Pauschalisierungen mit dem Gebäudemodell verknüpfen zu können. Für eine wirtschaftliche Verwertung könnte alternativ die ebenfalls von der Firma Autodesk entwickelte CAD-

Umgebung Revit verwendet werden. Revit bietet gegenüber Architecture den Vorteil, dass in dem Gebäudemodell auch kleinste Bauteile abgebildet werden können. Durch den in Revit verwendeten Modellierungsansatz des Building Information Modelling (BIM) sind die in dem Gebäudemodell enthaltenen Informationen außerdem wesentlich umfangreicher und vernetzter als in der lediglich bauteilorientierten CAD-Umgebung Architecture. Erste Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Implementierung des entwickelten Ansatzes in dieser CAD-Umgebung möglich ist (*Astour 2011*).

7.4 Ausblick

An die Ergebnisse dieser Arbeit knüpfen bereits vier weitere Promotionsvorhaben an. Diese befassen sich mit der automatischen Generierung von Terminplänen aus dem entwickelten Prozess- und dem Gebäudemodell, mit der Optimierung der Bauabläufe auf Grundlage der Simulationsergebnisse, mit der Entwicklung von Ansätzen zur Unterstützung der Baustelleneinrichtung und mit der Integration zusätzlicher Parameter in das Prozessmodell, die eine Beurteilung der Ökobilanz des Herstellungsprozesses ermöglichen.

Darüberhinaus lässt sich das entwickelte Prozessmodell in weiteren Bereichen ausbauen. Zum einen ist es denkbar, das Simulationsmodell durch die Einführung zusätzlicher Parameter zu detaillieren, zum anderen ist es aber auch möglich, den Anwendungsbereich für den das Simulationsmodell ausgelegt ist, zu erweitern. Eine Detaillierung des Simulationsmodells könnte z. B. durch die Integration von Wetterparametern erfolgen. Denkbar ist auch eine Schnittstelle zu einer Online-Wetterdatenbank, die automatisch aktuelle Wettervorhersagen in das Modell integriert. Eine größere Detailtreue würde sich auch durch die Weiterentwicklung der Personalverwaltung ergeben. Hier ist insbesondere die Entwicklung eines Ansatzes notwendig, um die Personalschwankungen in den unterschiedlichen Bauabschnitten und an verschiedenen Arbeitstagen realistisch abzubilden.

Eine genaue Betrachtung aller Prozesse der Baustellenlogistik im Simulationsmodell könnte durch eine Erweiterung der Systemgrenzen des Modells erreicht werden. Dazu müsste das Modell um Parameter und Komponenten für die Beschreibung der Materialanlieferung und der Abfallbeseitigung ergänzt werden.

Eine Verknüpfung des Gebäudemodells mit einer Bau-Ist Erfassung, z. B. durch Kameraeinsatz (*Mehr 2011*) oder die Verwendung von RFID-Chips, würde es ermöglichen, den aktuellen Stand der Bauarbeiten im Simulationsmodell zu berücksichtigen. Dadurch könnten bei

Störungen des Baugeschehens neue Varianten des Bauablaufs durch die Simulation prognostiziert werden.

Die Ergebnisse der Validierungsphase haben gezeigt, dass eine Erfassung von Zeitdaten notwendig ist, bei denen die logistischen Vorgänge getrennt von der eigentlichen Haupttätigkeit am Gewerk betrachtet werden. Systematische Zeitaufnahmen könnten außerdem zeigen, welche stochastischen Verteilungen die Arbeitszeiten und logistischen Tätigkeiten im Hochbau realitätsnah abbilden können.

Im Bereich der Visualisierung sind sowohl Arbeiten denkbar, die sich mit der 3-D Visualisierung der agentenbasierten Simulationsläufe wie auch mit der Offline-4-D Visualisierung der Bauabläufe im CAD-Modell befassen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit lassen sich aber auch auf andere Bereiche der Unikatfertigung übertragen, bei denen die Entwurfsplanung des Produktes in einer CAD-Umgebung angefertigt wird. Im Bauwesen ist insbesondere eine Anwendung auf Erdbauprozesse denkbar. Für den Tiefbau existieren CAD-Anwendungen, die eine 3-D Darstellung der Erdkörper und Tiefbauwerke ermöglichen. Diese ließen sich mit einem erdbauspezifischen Prozessmodell verbinden, um so ebenfalls eine Datenbasis für die Generierung von Simulationsmodellen zu erhalten. Ein solcher Ansatz würde eine konsequente Weiterentwicklung der Arbeit von *Chahrour (2007)* darstellen, die 2-D CAD-Daten als Grundlage für ein simulationsspezifisches Produktmodell verwendete.

8 Literaturverzeichnis

- Aalami, F. und Fischer, M. (1998). "Joint product and process model elaboration based on construction method models", The life-cycle of IT innovations in construction – Technology transfer from research to practice, Proc. CIB W78 conference, June 3-5, Stockholm, Royal Institute of Technology, Dept. of Construction Management, Stockholm.
- Abolghasemzadeh, P. und Rätzke, M. (2009). Building Information Model (BIM) basierte, immersive Evakuierungssimulation, Forum Bauinformatik 2009, 23.- 25. September 2009, Universität Karlsruhe, universitätsverlag karlsruhe, Karlsruhe.
- Arbeitszeit-Richtwerte Hochbau (2010). Arbeitszeit-Richtwerte Hochbau, Zeittechnik-Verlag GmbH, Neu-Isenburg.
- ASIM (1997). „Leitfaden für Simulationsbenutzer in Produktion und Logistik“, Arbeitsgemeinschaft Simulation in der Gesellschaft für Informatik: Bericht aus den Fachgruppen, Heft 58.
- Astour, H. (2011). "Entwicklung eines Konzeptes zur Verknüpfung von CiSmo mit einer BIM-Applikationsumgebung (Autodesk Revit) und Implementierung am Beispiel der Wandparameter", Diplomarbeit, Institut für Bauwirtschaft, Universität Kassel.
- AutoCAD (2009). Entwickler-Dokumentation von AutoCAD 2009, Entwicklerhandbuch für ActiveX und VBA.
- Autodesk (2010). Building Information Modelling in Practice, letzter Zugriff am 22. März 2010, <http://images.autodesk.com/emea_dach_main_germany/files/bim_in_practice.pdf>.
- Balzert, H. (1999). Lehrbuch Grundlagen der Informatik, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg - Berlin.
- Bauer, H. (1994). Baubetrieb, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Bauriedel, C., Donath, D. und König, R. (2006). Simulations-Patterns zur Erforschung räumlicher Prozesse, Forum Bauinformatik 2006: Junge Wissenschaftler forschen, Verlag der Bauhaus-Universität, Bauhaus-Universität Weimar.
- Beißert, U. (2010). „Constraint-basierte Simulation von Bauprozessen – Studie zur Verwendung von Variablenordnungsstrategien“ Tag des Baubetriebs 2010, „Modellierung von Prozessen zur Fertigung von Unikaten, Forschungsworkshop zur Simulation von Bauprozessen“, Tag des

Baubetriebs 2010 - Modellierung von Prozessen zur Fertigung von Unikaten, Forschungsworkshop zur Simulation von Bauprozessen, Bauhaus Universität Weimar, Weimar März 2010.

Beißert, U., König, M. und Bargstädt, H.-J. (2008). „Simulation von Ausführungsstrategien mit Hilfe von Soft Constraints und lokaler Suche“, Advances in Simulation for Production and Logistics Applications - Tagungsband 13. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Berlin 01. - 02. Oktober 2008, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

Berg, G. (1984). REFA in der Baupraxis - Teil 1 Grundlagen, ztv-Verlag, Frankfurt/Main.

Bergmann, M. (2009). Agentenbasierte Simulation von Montageprozessen, in U.-P.D.-I. C. Motzko [Hrsg.]: Festschrift anlässlich des 30-jährigen Bestehens des Instituts für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt - Baubetriebliche Aufgaben, VDI Verlag GmbH Düsseldorf, Technische Universität Darmstadt.

Bergmann, M. (2011). "Ergonomiegestützte Multiagentensimulation von Montageprozessen im Baubetrieb: Entwurf und Erprobung eines Vorgehensmodells zur Modellierung, Experimentation und den Datenaustausch", Dissertation, Bauingenieurwesen und Geodäsie, TU Darmstadt, Darmstadt.

Bielefeld, B. und Feuerabend, T. (2007). Baukosten- und Terminplanung, Grundlagen - Methoden - Durchführung, Birkhäuser - Verlag für Architekten, Basel - Boston - Berlin.

Bleichert, O. (2011). "Validierung und Verifizierung des Simulationssystems CiSmo anhand der Anwendung beim Bau einer Passivhaus-Reihensiedlung", Diplomarbeit, Institut für Bauwirtschaft, Universität Kassel.

BMBF (2009). MEFISTO - Management - Führung - Information - Simulation im Bauwesen, letzter Zugriff am 22. März 2010, <http://www.pt-it.pt-dlr.de/_media/Mefisto-Infoblatt.pdf>.

BMVBB (2011). Strukturdaten zur Produktion und Beschäftigung im Baugewerbe - Berechnungen für das Jahr 2010, BMVBB-Online-Publikation, Nr. 19/2011, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBB), http://www.bbsr.bund.de/cln_032/nn_112742/BBSR/DE/FP/ZB/Auftragsforschung/1Wertschoepfung/2010/Strukturdaten2010/03__ergebnisse.html, zuletzt abgerufen am: 10.04.2012.

Boenert, L. und Blömeke, M. (2003). „Logistikkonzepte im Schlüsselfertigung zur Erhöhung der Kostenführerschaft“, Bauingenieur 78 (2003) 6, 2003, S. 277-283.

- Busse, T., Molkenthin, F. und Hinkelmann, R. (2007). A software concept of a numerical modelling system for an adaptive simulation of coupled hydrodynamic processes, Forum Bauinformatik 2007 - Junge Wissenschaftler forschen, Verlag der Technischen Universität Graz, TU Graz.
- Chahrour, R. (2007). Integration von CAD und Simulation auf Basis von Produktmodellen im Erdbau, Dissertation, Institut für Bauwirtschaft, Universität Kassel, kassel university press, Kassel.
- Chahrour, R. und Franz, V. (2004). „Computersimulation im Baubetrieb - Forschungsstand, innovative Einsatzmöglichkeiten.“, in K. Mertins, M. Rabe [Hrsg.]: Experiences from the Future – New Methods and Applications in Simulation for Production and Logistics, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- Chahrour, R. und Franz, V. (2006). „Integration von CAD und Simulation zur Analyse von Erdbauprozessen“, Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Universität Kassel, 26.-27. September 2006, SCS Publishing House, San Diego - Erlangen.
- Chen, P.P.-S. (1976). "The entity-relationship model-toward a unified view of data", Special issue: papers from the international conference on very large data bases: September 22–24, 1975, Framingham, MA, ACM, New York.
- Daum, B. (2004). Java-Entwicklung mit Eclipse 3, dpunkt.verlag GmbH, Heidelberg.
- Denk, H. (2003). Softwaremodelle für einen rechtsgemäßen, agentenbasierten virtuellen Marktplatz für Ausschreibung, Angebotsbearbeitung und Vergabe von Bauleistungen, Dissertation, Institut für Massivbau, TU Darmstadt, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- DIN 69900 (2009). Projektmanagement - Netzplantechnik; Beschreibungen und Begriffe, Normenausschuss Qualitätsmanagement, Statistik und Zertifizierungsgrundlagen (NQSZ) im DIN, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- Dornhaus, A., Klügl, F., Oechslein, C., Puppe, F. und Chittka, L. (2006). "Benefits of recruitment in Honey Bees: effects of ecology and colony size in an individual-based model", Behavioral Ecology 17, 18 Januar 2006, S. 336-344.
- Drees, G. und Spranz, D. (1976). Handbuch der Arbeitsvorbereitung in Bauunternehmen, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin.
- Drogoul, A., Vanbergue, D. und Meurisse, T. (2002). "Multi-agent Based Simulation: Where are the Agents?", Third International Workshop, MABS 2002, Bologna, Italy, July 2002, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.

Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R. und Liston, K. (2008). "BIM Handbook: A guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors", John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey.

Eymann, T. und Padovan, B. (1999). „Eine Multi-Agenten Simulation zur ökonomischen Analyse der dezentralen Koordination von Wertschöpfungsketten“, Wirtschaftsinformatik Proceedings, Association for Information Systems.

Ferber, J. (2001). „Multiagentensysteme – Eine Einführung in die Verteilte Künstliche Intelligenz“, Addison-Wesley Verlag, München.

Fiedler, E. (2006). Berechnung und Simulation von Quell-Luftströmungen, TAB - Technik am Bau - Fachzeitschrift für Technische Gebäudeausrüstung, Heft 10, 2006, S. 72-77.

Fischer, M. und Aalami, F. (1996). "Scheduling with Computer-Interpretable Construction Method Models", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE 122 (1996) 4, 1996, S. 337-347.

Fischer, M., Aalami, F., Kuhne, C. und Ripberger, A. (1999). "Cost-loaded production model für planing and control", Proc. 8th Int. Conf. on Durability of Building Materials and Components, CIB W78 Workshop, Vancouver, Canada 1999.

Franklin, S. und Graesser, A. (1996). "Is it an Agent, or just a Program?: A Taxonomy for Autonomous Agents", Proceedings of the Third International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages, Budapest 12.-13. August 1996, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.

Franz, V. (1997). „Steuerung und Kontrolle des Ablaufes der Ausführungsplanung durch Petri-Netze“, Projekt Management, 1. Quartal 1997, S. 16-27.

Gloor, C.D. (2005). "Distributed Intelligence in real World mobility Simulations", Dissertation, ETH Zürich, Zürich.

Günthner, W.A., Klaubert, C. und Schorr, M. (2008). „Forschungsverbund "Virtuelle Baustelle" (ForBAU) digitale Werkzeuge für die Bauplanung und -abwicklung“, Tag des Baubetriebs 2008 - Auf dem Weg zum digitalen (Bau-)Haus-Bau - Forschungsworkshop zur Simulation von Bauprozessen, Bauhaus Universität Weimar.

- Günthner, W.A. und Kraul, R. (2008). „Ablaufsimulation zur Planung von Bauprojekten am Beispiel eines U-Bahnhofs“, Tag des Baubetriebs 2008 - Auf dem Weg zum digitalen (Bau-)Haus-Bau - Forschungsworkshop zur Simulation von Bauprozessen, Bauhaus-Universität Weimar.
- Günthner, W. A., Rank, E., Vogt, N., Euringer, T., Stockbauer, W., Hartmann, E. und Hirzinger, G. (2010). Virtuelle Baustelle - Digitale Werkzeuge für die Bauplanung und -abwicklung, Abschlussbericht, TU München, Hochschule Regensburg, FAU Erlangen-Nürnberg, Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum, ForBAU – Bayerischer Forschungsverbund Virtuelle Baustelle, München, Erlangen-Nürnberg, Regensburg.
- Halpin, D.W. (1973). An Investigation of the use of simulation networks for modeling construction operations, Dissertation, Dept. of Civil Engineering, University of Illinois, Illinois.
- Halpin, D.W., AbouRizk, S.M. und Mohamed, Y. (2006). "Modeling Construction Operations Using Cyclone Based Systems", Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Universität Kassel, 26.-27. September 2006, SCS Publishing House, San Diego - Erlangen.
- Hanff, J. (2009). Modellorientierte Softwareunterstützung bei der Arbeitsvorbereitung und Bauausführung, 19. Kassel-Darmstädter Baubetriebsseminar Schalungstechnik 19.11.-20.11.2009, Kassel.
- Hartmann, A. (2004). Innovationsmanagement in Bauunternehmen – Entwicklung eines organisatorischen Gestaltungsmodells zur Generierung innovativer Gesamtlösungen, Dissertation, Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ETH Zürich, vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich, Zürich.
- Herrler, R. (2007). Agentenbasierte Simulation zur Ablaufoptimierung in Krankenhäusern und anderen verteilten, dynamischen Umgebungen, Dissertation, Fakultät für Mathematik und Informatik, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Würzburg.
- Hoffmann, F. (2000). Ungenutzte Potentiale in der Ablauf- und Fertigungsplanung im Betonbau, Dissertation, Bauingenieurwesen, Universität Kassel, Selbstverlag, Kassel.
- Hofstadler, C. (2007). „Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- <http://www.fipa.org> (2011). The Foundation for Intelligent Physical Agents, letzter Zugriff am 14. November 2011, <<http://www.fipa.org>>.

Huhnt, W. und Enge, F. (2007). „Simulationsmodelle für die Ausführung von Bauleistungen“ , Tagungsband des 1. IBW-Workshop Simulation in der Bauwirtschaft, kassel university press, Universität Kassel.

Huhnt, W. und Richter, S. (2010). Eine Modellierungsmethodik für Ausführungsterminpläne im Praxistest, Tag des Baubetriebs 2010 - Modellierung von Prozessen zur Fertigung von Unikaten, Forschungsworkshop zur Simulation von Bauprozessen, Bauhaus Universität Weimar, Weimar März 2010.

Igl, W. (2002). Komplexes Problemlösen in Multiagentensimulationsszenarien: Untersuchungen zur Formalisierung von Strategien zur Bekämpfung von Waldbränden , Diplomarbeit, Psychologie, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Würzburg.

Irmschler, H.-J., Schubert, P. und Funk, P. (2000). Mauerwerk-Kalender 2000, Ernst und Sohn, Berlin.

Kecher, C. (2007). „UML 2.0 - Das umfassende Handbuch“, 2nd, Galileo Press, Bonn.

Klügl, F. (2001). „Multiagentensimulation - Konzepte, Werkzeuge, Anwendung.“, Addison-Wesley Verlag, München.

Klügl, F. (2006). „Multiagentensimulation“, Informatik Spektrum, Vol. 29 (2006), Nr. 6, Dezember 2006, S. 412-417.

Klügl, F. und Bazzan, A.L. C. (2004). "Route Decision Behaviour in a Commuting Scenario: Simple Heuristics Adaptation and Effect of Traffic Forecast", Journal of Artificial Societies and Social Simulation vol. 7, no. 1, Januar 2004.

Klügl, F., Oechslein, C., Puppe, F. und Dornhaus, A. (2002). "Multi-Agent Modelling in Comparison to Standard Modelling.", AIS'2002 (Artificial Intelligence, Simulation and Planning in High Autonomy Systems), 07. - 10. April 2002, SCS Publishing House, Lisbon, Portugal.

König, M. und Beißert, U. (2008). „Constraint-basierte Simulation von Bauprozessen“, Tag des Baubetriebs 2008 - Auf dem Weg zum digitalen (Bau-)Haus-Bau - Forschungsworkshop zur Simulation von Bauprozessen, Bauhaus Universität Weimar.

König, M. und Marx, A. (2011). "Aufbereitung von Multimodellen für Simulationsstudien zur Ausführungsplanung", Tagungsband des 2. Mefisto Kongresses, TU Dresden, Dresden Oktober 2011.

- Kugler, M. (2009). Prozessdatenmodell für die Simulation im Hochbau, Tagungsband des 20. Assistententreffens der Bereiche Bauwirtschaft, Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik, 01.-03. April 2009 an der Universität Kassel, kassel university press, Kassel.
- Kugler, M. und Franz, V. (2007a). „Entwurf eines multiagentenbasierten Referenzmodells für Simulationen im Hochbau“, Tagungsband des 1. IBW-Workshop Simulation in der Bauwirtschaft, 13. September 2007, Universität Kassel, kassel university press, Universität Kassel.
- Kugler, M. und Franz, V. (2008). Einsatz der Simulation zur Effizienzsteigerung von Produktionsprozessen im Bauwesen, Advances in Simulation for Production and Logistics Applications - Tagungsband 13. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Berlin 01. - 02. Oktober 2008, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- Kugler, M. und Franz, V. (2009). "Development of a Simulation System for the Preparation of Work in Building Construction", Computation in Civil Engineering - EG-ICE Conference 2009, TU Berlin, Heftreihe des Instituts für Bauingenieurwesen, Shaker Verlag, Aachen.
- Kugler, M. und Franz, V. (2010). "CiSmo - CAD-integrierte Simulationsmodellierung für die Bauablaufsimulation im Hochbau", in G. Zülch, P. Stock [Hrsg.]: Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal - Tagungsband der 14. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Karlsruhe 7. u. 8. Oktober 2010, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe.
- Kugler, M., Kordi, B., Franz, V. und Samkari, K. (2011). Linking Product and Process Data in the Modelling Environment 'Cismo', Proceedings of the 11th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality 2011, Verlag der Bauhaus Universität Weimar, Bauhaus Universität Weimar.
- Kuhne, C., Ripberger, A., Aalami, F. und Schub, A. (2000). „Neue Ansätze zur Projektplanung und Baustellensteuerung“, Bauingenieur, Band 75, Januar 2000, S. 15-21.
- Kuhn, A. und Wenzel, S. (2008). „Simulation logistischer Systeme“, in D. Arnold, H. Isermann, A. Kuhn, H. Tempelmeier, K. Furmans [Hrsg.]: Handbuch Logistik, 3rd, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Künstner, G. (1984). REFA in der Baupraxis - Teil 3 Arbeitsgestaltung, ztv-Verlag, Neu-Isenburg.

Mehr, O. (2011). Polysensorale Bauprozessidentifikation durch kognitive Systeme, Dissertation, Institut für Baubetrieb, TU Darmstadt.

Meister, K., Rieser, M., Ciari, F., Horni, A., Balmer, M. und Axhausen, K.W. (2009). „Anwendung eines agentenbasierten Modells der Verkehrsnachfrage auf die Schweiz“, Straßenverkehrstechnik 53 (5), 2009, S. 269-280.

Microsoft (2010). Entwicklung mit ADO, letzter Zugriff am 18. Juni 2010, <<http://msdn.microsoft.com/de-de/library/bb979546.aspx>>.

Mukherjee, A. (2005). "A Multi-Agent Framework for General Purpose Situational Simulations in Construction Management", Dissertation, University of Washington, Washington.

Mukherjee, A. und Rojas, E. (2003). "Applying Multi-Agents for General Purpose Situational Simulations in Construction Management", ASCE Construction Research Council, Ph.D. Research Symposium, Nashville.

Mukherjee, A., Rojas, E.M. und Winn, W.D. (2004). "Implementing a General Purpose Framework Using Multi-Agents for Construction Management Education", Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference.

Nagel, U., Götting, K., Hänel, K. und Wagner, C. (1990). „Ausbauprosesse“, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, Leipzig.

Nassar, K. (2002). "Simulation Gaming in Construction: ER, The Equipment Replacement Game", Journal of Construction Education, Vol. 7, No. 1, Spring 2002, S. 16-30.

Odell, J., Van Dyke Parunak, H. und Fleischer, M. (2003). "The Role of Roles in Designing Effective Agent Organizations", in L.C. . Z. F. . O. A. . C. J. Garcia A. [Hrsg.]: Software Engineering for Large-Scale Multi-Agent Systems, Springer-Verlag, Berlin.

Oechslein, C. (2004). Vorgehensmodell mit integrierter Spezifikations- und Implementierungssprache für Multiagentensimulationen, Dissertation, Fakultät für Mathematik und Informatik, Universität Würzburg, Würzburg.

Pawlaszczyk, D. (2006). Scalable Multi Agent Based Simulation - Considering Efficient Simulation of Transport Logistics Networks, Tagungsband der 12. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, September 2006, SCS Publ. House, Universität Kassel.

- Rabe, M., Spiekermann, S. und Wenzel, S. (2008). „Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik“, Springer Verlag Berlin Heidelberg, Mai 2008, Berlin/Maintal/Kassel.
- REFA (1991). Planung und Steuerung - Teil 1, Carl Hanser Verlag, München.
- REFA (1993). Methodenlehre der Betriebsorganisation : Lexikon der Betriebsorganisation., Carl Hanser Verlag, München.
- REFA (1994). Ausgewählte Methoden des Arbeitsstudiums, Carl Hanser Verlag, München.
- Rudolph, D. (2000). „AutoCAD-Objekte“, Sybex-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- Rüppel, U. (2007). „Vernetzt-kooperative Planungsprozesse im Konstruktiven Ingenieurbau“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Samkari, K., Kugler, M., Kordi, B. und Franz, V. (2012). "Colored Petri-net and Multi-Agents: A combination for a time-efficient evaluation of a simulation study in construction projects", 2012 ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering, als Paper angenommen, aber noch nicht erschienen, Clearwater Beach, Florida, USA.
- Sawhney, A., Bashford, H., Walsh, K. und Mulky, A.R. (2003). "Agent-Based Modeling and Simulation in Construction.", Proceedings of the 35th conference on Winter simulation: driving innovation, December 07-10, 2003, New Orleans, Louisiana.
- Schapke, S.-E. und Fuchs, S. (2011). "Mefisto – Eine multimodellbasierte Plattform für das Bauprojektmanagement", Tagungsband des 2. Mefisto Kongresses, Technische Universität Dresden, Dresden Oktober 2011.
- Scheifele, D.R. (1991). Bauprojektablauf - Grundlagen und Modelle für eine effiziente Ablaufplanung im Bauwesen, Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln.
- Schmidt, B. (2000). „Die Modellierung menschlichen Verhaltens“, SCS-Europe BVBA, Ghent, Belgium.
- Schneider, D. (2011). "Evaluierung eines Simulationssystems für die Bauablaufplanung im Hochbau anhand der Anwendung beim Bau eines Altenpflegeheims", Diplomarbeit, Institut für Bauwirtschaft, Universität Kassel.
- Seidl, R. (2009). „Eine Multi-Agentensimulation der Wahrnehmung wasserbezogener Klimarisiken“, Metropolis, Marburg.

Steinhauer, D. (2006). „Simulation im Schiffbau - Unterstützung von Werftplanung, Produktionsplanung und Produktentwicklung bei der Flensburger Schiffbau-Gesellschaft“, Tagungsband der 12. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Universität Kassel, 26.-27. September 2006, SCS Publishing House, San Diego - Erlangen.

Steinhauer, D. (2007). „Simulation im Schiffbau und Kooperation mit der Universität Weimar“, 1. IBW Workshop Simulation in der Bauwirtschaft, 13. September 2007, Universität Kassel, kassel university press, Universität Kassel.

Steinhauer, D. (2008). „Planung komplexer Montageabläufe mit Hilfe der constraint-basierten Simulation“, Advances in Simulation for Production and Logistics Applications - Tagungsband 13. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Berlin 01. - 02. Oktober 2008, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

Stolzenberg, B. (2002). Skript zur Vorlesung "Datenbanktechnik für Bauingenieure - Das ENTITY-RELATIONSHIP-Modell", Fachbereich Bauinformatik, Universität Kassel.

Stolzenberg, B. (2003). Skript zur Vorlesungen "Datenbanktechnik für Bauingenieure - Das RELATIONEN-Modell", Fachbereich Bauinformatik, Universität Kassel.

Suthpin, J. (2005). „AutoCAD 2006 VBA – A Programmer´s Reference“, Apress.

Triebig, C., Credner, T., Klügl, F., Fischer, P., Deppisch, A. und Landvogt, S. (2005). "Agent-based Simulation For Testing Control Software of High Bay Warehouses", Proceedings of the 4th International Central and Eastern European Conference on Multi-Agent Systems (CEEMAS 2005).

Ulbrich, A., Kraul, R., Tilke, C., Agarwal, M. und Günthner, W. A. (September 2009). "Agent Simulation of Flour Silo Installations as Planning Tool for Decision-Making", Proceedings of the 21st European Modeling and Simulation Symposium (EMSS2009), Puerto de La Cruz, Spain.

Van Tol, A.A. und Abourizk, S. M. (2006). "Simulation modeling decision support through belief networks", Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 14, Issue 5, Juli 2006, S. 614-640.

VDI 3633 - Begriffsdefinitionen (1996). Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen, Richtlinie, VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluß Logistik, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.

- VDI 3633 - Blatt 1 (1993). Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen - Grundlagen, Blatt 1, Richtlinie, VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluß Logistik, VDI 3633, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- VOB (2009). Vergabe und Vertragsordnung für Bauleistungen, Beuth Verlag GmbH, Berlin - Wien - Zürich.
- Voigtmann, J.K. (2010). Simulation baulogistischer Prozesse – Berücksichtigung räumlicher Aspekte, Teil 1, Tag des Baubetriebs 2010 - Modellierung von Prozessen zur Fertigung von Unikaten, Forschungsworkshop zur Simulation von Bauprozessen, Bauhaus Universität Weimar, Weimar März 2010.
- Voigtmann, J.K. und Bargstädt, H.-J. (2008). „Simulation von Baustellenlogistikprozessen im Ausbau“, Advances in Simulation for Production and Logistics Applications - Tagungsband 13. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Berlin 01. - 02. Oktober 2008, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- Wagner, G., Giurca, A., Pehla, M. und Werner, J. (2008). „Modellierung und Simulation von Multiagenten-Systemen“, Forum der Forschung, Wissenschaftsmagazin der Brandenburgische Technischen Universität Cottbus, 12. Jahrgang, Heft 21, Dezember 2008, S. 47-52.
- Weber, J. (2006). „Simulation von Logistikkonzepten auf Baustellen“, Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Universität Kassel, 26.-27. September 2006, SCS Publishing House, San Diego - Erlangen.
- Weber, J. (2007a). „Automatische Generierung von Simulationsmodellen auf Basis von CAD-Daten“, 1. IBW Workshop Simulation in der Bauwirtschaft, 13. September 2007, Universität Kassel, kassel university press, Universität Kassel.
- Weber, J. (2007b). Simulation von Logistikprozessen auf Baustellen auf Basis von 3D-CAD Daten, Dissertation, Maschinenbau, Universität Dortmund, Dortmund.
- Weiβ, G. und Jakob, R. (2005). „Agentenorientierte Softwareentwicklung“, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York.
- Wenzel, S. (2000). „Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik“, SCS Ghent, Dortmund.

Wenzel, S., Weiß, M., Collisis-Böhmer, S., Pitsch, H. und Rose, O. (2008). „Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik - Planung und Durchführung von Simulationsstudien“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Weyns, D., Omicini, A. und Odell, J. (2007). "Environment as a first class abstraction in multiagent systems", Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, Vol. 14, Number 1, Februar 2007, S. 5-30.

Wiegand, B. (2009). Implementierung eines Wegfindungsalgorithmus für agentenbasierte Simulationsmodelle im Hochbau, Diplomarbeit, Bauorganisation und Bauverfahren - Institut für Bauwirtschaft, Universität Kassel, Kassel.

Wimmer, J., Horenburg, T. und Günthner, W.A. (2010). „Erstellung einer Simulationsbibliothek für den Tiefbau“, Tag des Baubetriebs 2010 - Modellierung von Prozessen zur Fertigung von Unikaten, Forschungsworkshop zur Simulation von Bauprozessen, Bauhaus Universität Weimar, Weimar.

Wooldridge, M. und Jennings, N.R. (1995). "Intelligent Agents: Theory and Practice", The Knowledge Engineering Review, Volume 10, Issue 02, Juni 1995, S. 115-152.

www.bmvbs.de (2007). www.bmvbs.de, letzter Zugriff am 03. Oktober 2008, <www.bmvbs.de>.

www.creative-patterns.com (2010). <http://www.creative-patterns.com>, letzter Zugriff am 17. März 2010, <<http://www.creative-patterns.com>>.

Zülch, G. und Börkircher, M. (2006). „Modellierung und Simulation von Bauprozessen: Planungsunterstützung im Baubetrieb unter Berücksichtigung von Bauablaufstörungen“, Tagungsband der 12. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, September 2006, SCS Publ. House, Universität Kassel.

Kontakt:

Institut für Bauwirtschaft
Universität Kassel
Mönchebergstr. 7
34125 Kassel

Fachgebiete:

		Sekretariate:
Bauorganisation und Bauverfahren	Prof. Franz	0561 / 804 2615
Baubetriebswirtschaft	Prof. Racky	0561 / 804 2619
Bauinformatik	Dipl.-Ing. Kugler	0561 / 804 2619
Bauwirtschaft/Projektentwicklung	Prof. Busch	0561 / 804 3632

**Schriftenreihe Bauwirtschaft
des Instituts für Bauwirtschaft der Universität Kassel**

I - Forschung

Band 1: Schopbach, Holger (2001)

Ansätze zur Kostensenkung in Konstruktion und Baubetrieb
durch Einsatz mathematischer Optimierungsmethoden

Band 2: Grau, Heidrun (2002)

Zielorientiertes Geschäftsprozessmanagement zur Förderung der Wirtschaftlichkeit von Abbundzentren

Band 3: Arnold, Daniel (2005)

Entwicklung einer Methodik für Innovationsprozesse im Wohnungsbau

Band 4: Schmitt, Roland (2005)

Die Beschaffung von Schalungsgeräten und den zugehörigen
Ingenieurleistungen nach deren Outsourcing

Band 5: Heinrich, Nils (2006)

Entwicklung von Parametern zur Risikobewertung für Projektentwicklungen auf brachgefallenen Flächen - am Beispiel freizeitlich orientierter Projekte

Band 6: Mittelstädt, Norbert (2006)

Leitlinie zur projektbezogenen Spezifikation und erfolgsabhängigen Honorarbemessung von extern beauftragten Projektmanagement-Leistungen

Band 7: Chahrour, Racha (2007)

Integration von CAD und Simulation auf Basis von Produktmodellen im Erdbau

Band 8: Mieth, Petra (2007)

Weiterbildung des Personals als Erfolgsfaktor der strategischen Unternehmensplanung in Bauunternehmen. Ein praxisnahes Konzept zur Qualifizierung von Unternehmensbauleitern

Band 9: Mergl, Oliver (2007)

Flexibilisierung von Baustrukturen durch Modularisierung zur Verbesserung des Nutzungspotenziales am Beispiel industrieller Produktionsstätten des Automobilbaus

Band 10: Eitelhuber, Andreas (2007)

Partnerschaftliche Zusammenarbeit in der Bauwirtschaft – Ansätze zu kooperativem Projektmanagement im Industriebau

Band 11: Hermelink, Andreas (2008)

Ein systemtheoretisch orientierter Beitrag zur Entwicklung einer nachhaltigkeitsgerechten Technikbewertung angewandt auf den mehrgeschossigen Wohnungsbau im Niedrigstenergie-Standard

Band 12: Utsch, Jens H. (2008)

Entscheidungskomplexorientiertes Controlling – ein Beitrag zur Unterstützung der Planung und Entscheidungsfindung im Baubetrieb

Band 13: Pauli, Christian (2009)

Entwicklung einer Entscheidungshilfe zur Beurteilung der PPP-Eignung kommunaler Bauvorhaben

Band 14: Fistera, Detlev (2009)

Revitalisierung brachgefallener Wohnbauflächen. Indikatorenbildung zur multikriteriellen Untersuchung und prophylaktischen Abschätzung von entstehenden Wohnbaubrachen

Band 15: Dobler, Thomas (2009)

Entwicklung der Archintra-Methodik als Beitrag zur Verbesserung von Bauprozessen

Band 16: Strack, Stefan (2010)

Entwicklung eines Bewertungssystems für Redevelopment-Maßnahmen von leer stehenden Gebäuden für Wohnzwecke

Band 17: Körtgen, Manfred (2010)

Optimierungsansätze zur prozessorientierten Abwicklung komplexer Baumaßnahmen unter Einsatz neuer Informations- und Kommunikationssysteme

Band 18: Stichnoth, Philipp (2010)

Entwicklung von Handlungsempfehlungen und Arbeitsmitteln für die Kalkulation betriebsphasenspezifischer Leistungen im Rahmen von PPP-Projekten im Schulbau

Band 19: Deppenmeier, Jens (2011)

Lebenszyklusorientierte Planung von Erschließungskonzepten in Hochhäusern am Beispiel von Aufzugsanlagen. Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Lebenszykluskosten mit Hilfe von Verkehrsberechnungs-Simulationen unter Berücksichtigung der Transportstrategie

Band 20: Schleicher, Melanie (2012)

Komplexitätsmanagement bei der Baupreisermittlung im Schlüsselfertigbau

Band 21: Altmüller, Patrick (2012)

Entwicklung einer differenzierten Preisgleitklausel für Funktionsbauverträge im Straßenbau

Band 22: Kugler, Martin (2012)

CAD-integrierte Modellierung von agentenbasierten Simulationsmodellen für die Bauablaufsimulation im Hochbau

II - Lehre**Band 1: Institut für Bauwirtschaft (Hrsg.)**

Seminar Sommersemester 2003, Hochhäuser

III - Tagungen und Berichte

Band 1: Institut für Bauwirtschaft (Hrsg.)

Tagungsband zum Symposium 2002

Projektentwicklung brachgefallener Flächen am 13. September 2002

Band 2: Racky, Prof. Dr.-Ing. Peter (Hrsg.)

3. IBW-Symposium, 17. September 2004 an der Universität Kassel.

Partnerschaftliche Vertragsmodelle für Bauprojekte

Band 3: Racky, Prof. Dr.-Ing. Peter (Hrsg.)

4. IBW-Symposium, 15. September 2006 an der Universität Kassel.

Innovative Abwicklungsformen für Bauprojekte: Partnering und PPP

Band 4: Franz, Prof. Dr.-Ing. Volkhard (Hrsg.)

1. IBW-Workshop, 13. September 2007 an der Universität Kassel.

Simulation in der Bauwirtschaft

Band 5: Busch, Prof. Dr.-Ing. Antonius (Hrsg.)

5. IBW-Symposium, 26. September 2008 an der Universität Kassel.

Projektentwicklung brachgefallener Flächen und Immobilien

Band 6: Institut für Bauwirtschaft (Hrsg.)

Tagungsband des 20. Assistententreffens der Bereiche Bauwirtschaft,

Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik, 01. – 03. April 2009 an der

Universität Kassel

Band 7: Racky, Prof. Dr.-Ing. Peter (Hrsg.)

Forum Baubetrieb, 4. November 2009 an der Universität Kassel.

Kooperationsorientierte Projektabwicklung im Hochbau

Band 8: Franz, Prof. Dr.-Ing. Volkhard (Hrsg.)

2. IBW-Workshop, 24. März 2011 an der Universität Kassel.

Simulation von Unikatprozessen – Neue Anwendungen aus

Forschung und Praxis

Weitere Informationen zur Schriftenreihe unter www.upress.uni-kassel.de

ISBN 978-3-86219-392-9