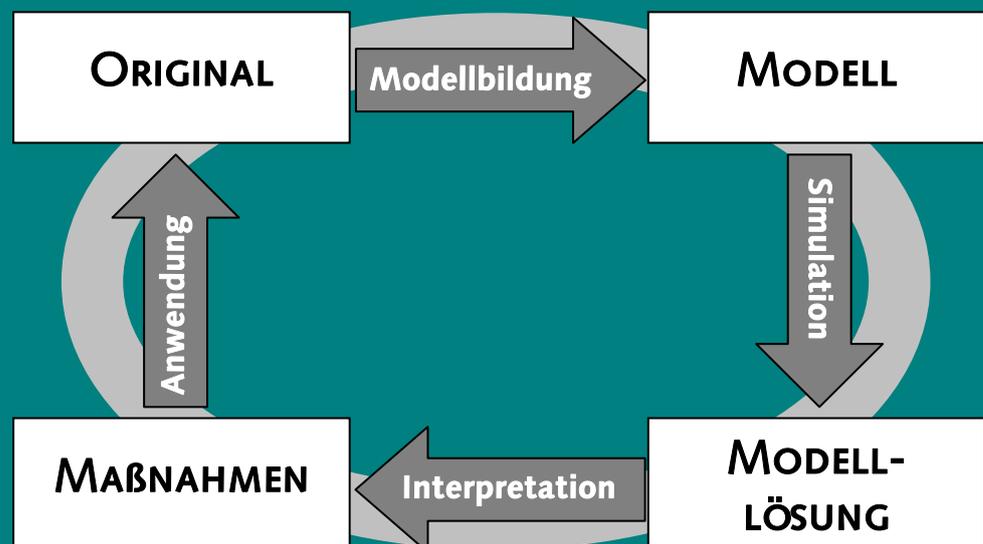


TAG DES BAUBETRIEBS 2010 TAGUNGSBEITRÄGE

MODELLIERUNG VON PROZESSEN ZUR FERTIGUNG VON UNIKATEN

FORSCHUNGSWORKSHOP ZUR SIMULATION VON BAUPROZESSEN



Beiträge

vom Forschungsworkshop zur Simulation von Bauprozessen
am 25. März 2010 in Weimar

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Bargstädt M. Sc.

Professur Baubetrieb und Bauverfahren
Fakultät Bauingenieurwesen
Bauhaus-Universität Weimar

Marienstraße 7, 99423 Weimar
Postanschrift: 99421 Weimar

Tel.: (03643) 58 4563

Fax.: (03643) 58 4565

[http://www.uni-weimar.de/cms/bauing/organisation/
baubetrieb-und-bauverfahren.html](http://www.uni-weimar.de/cms/bauing/organisation/baubetrieb-und-bauverfahren.html)

Redaktionelle Bearbeitung und Gestaltung: apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Rolf Steinmetzger

Druck: Blueprint kopie_druck_medien gmbh weimar

**SCHRIFTEN DER PROFESSUR BAUBETRIEB UND BAUVERFAHREN
NR. 19 (2010)**

**Modellierung von Prozessen
zur Fertigung von Unikaten
Forschungsworkshop
zur Simulation von Bauprozessen**

eine gemeinsame Veranstaltung von

**ASIM – Arbeitsgemeinschaft Simulation
Arbeitsgruppe „Unikatprozesse“
in der Fachgruppe
Simulation in Produktion und Logistik (SPL)**

<http://www.asim-gi.org/>

und

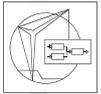
**Professur Baubetrieb und Bauverfahren
der Bauhaus-Universität Weimar**

am 25. März 2010 in Weimar

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Bargstädt M.Sc.

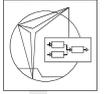
2010

Bauhaus-Universität Weimar
Fakultät Bauingenieurwesen
Professur Baubetrieb und Bauverfahren



Inhalt

Vorwort	3
PROF. DR.-ING. VOLKHARD FRANZ	
Unikatprozesse und ASIM-Aktivitäten – Bericht von der Arbeitsgruppe „Unikatprozesse“	5
DIPL.-INF. YANG JI, DR.-ING. ANDRÉ BORRMANN	
Ein Konzept zur Kopplung makroskopischer Optimierung mit mikroskopischer Simulation von Erdbauprozessen	17
PROF. DR.-ING. WOLFGANG HUHN, DIPL.-ING. SVEN RICHTER	
Eine Modellierungsmethodik für Ausführungsterminpläne im Praxistest	25
DIPL.-ING. JULIA K. VOIGTMANN	
Simulation bauleistungsorientierter Prozesse – Berücksichtigung räumlicher Aspekte, Teil 1	35
AMIR ELMAHDI M.Sc.	
Simulation bauleistungsorientierter Prozesse – Berücksichtigung räumlicher Aspekte, Teil 2	41
DIPL.-ING. ULRIKE BEIßERT	
Constraint-basierte Simulation von Bauprozessen – Studie zur Verwendung von Variablenordnungsstrategien	49
DR. RER. NAT. WOLFGANG EBER	
Simulation – von der prozeduralen zur objektorientierten Modellierung	59
DIPL.-ING. SIEGFRIED DELZER	
DK-INTEGRAL – Simulationssoftware für energieeffiziente Unikate	69
PROF. DR.-ING. THOMAS WIEDEMANN	
Architektur und Bauen 2.0 im Fokus von Simulationsuntersuchungen	79
UNIV.-PROF. DR.-ING. C. MOTZKO, DIPL.-ING. O. MEHR, DIPL.-ING. M. BERGMANN, DIPL.-ING. E. BOSKA, M.A. P. BOSKA	
Eine Ontologie für die Baubetriebswissenschaft	85
DIPL.-ING. JOHANNES WIMMER, DIPL.-ING. TIM HORENBURG, PROF. DR.-ING. DIPL.-WI.- ING. WILLIBALD A. GÜNTNER	
Erstellung einer Simulationsbibliothek für den Tiefbau	91
PROF. DR.-ING. HANS-JOACHIM BARGSTÄDT M.Sc.	
Baukalkulation durch Prozesssimulation in virtuellen Baustellenwelten	103
APL. PROF. DR.-ING. HABIL. ROLF STEINMETZGER	
Ermittlung von Maschineneinsatzzeiten für ereignisorientierte Simulationsmodelle im Baubetriebswesen	111
DIPL.-WI.-ING. CHRISTIAN FLEMMING, DIPL.-ING. MARCO WACH	
Baubetriebliche Anforderungen an die diskret ereignisorientierte Modellierung und Simulation von Prozessen zur Planung und Fertigung von Unikaten	119



Vorwort

Sehr geehrte Leser,

am 25. März 2010 veranstaltete die Professur Baubetrieb und Bauverfahren im Rahmen der jährlich stattfindenden baubetrieblichen Tagungsreihe gemeinsam mit der Arbeitsgruppe „Unikatprozesse“ in der Fachgruppe „Simulation in Produktion und Logistik“ (SPL) im Rahmen der Arbeitsgemeinschaft Simulation – ASIM einen ganztägigen Workshop mit dem Titel: „Modellierung von Prozessen zur Fertigung von Unikaten“.

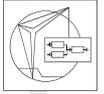
Viele Bauprozesse sind dadurch gekennzeichnet, dass sie Unikatcharakter besitzen. Unikate sind durch prototypische Einmaligkeit, Individualität, vielfältige Randbedingungen, einen geringen Grad an Standardisierung und Wiederholungen gekennzeichnet. Das erschwert die realitätsnahe Modellierung zur Simulation sogenannter Unikatprozesse. Aus diesem Grund hat sich die Arbeitsgruppe „Unikatprozesse“ gebildet, um die baubetrieblich-methodischen Grundlagen sowie die Werkzeuge der Kalkulation, Arbeitsvorbereitung sowie Produktionsplanung und -steuerung zu verbessern

Die Referenten berichteten aus ihren aktuellen Forschungsarbeiten, verdeutlichten damit die Breite der aufgeworfenen Fragestellungen und den langen aber interessanten Weg, der noch vor uns liegt. Gerade auch der Vergleich der Aufgabenstellungen bei Unikatprozessen in verschiedenen Anwendungsbereichen soll es ermöglichen, über die Disziplinengrenzen des Bauwesens hinweg gute Modellansätze und Lösungsmöglichkeiten aufzugreifen und für die eigene Problematik zu adaptieren. Die angeregte Diskussion belegte die Aktualität der Themen und das große Interesse an einer intensiven Auseinandersetzung mit der Thematik der Simulation von Unikatprozessen aus den unterschiedlichsten Perspektiven.

Alle Teilnehmer haben sich große Mühe gegeben, die Ergebnisse ihrer Arbeit auf das Papier zu bringen, und damit beigetragen, die Ergebnisse des Workshops als Grundlage weiterer Arbeiten zu fixieren. Ich freue mich, hiermit einen interessanten und vielseitigen Tagungsband herausgeben zu können, der hoffentlich eine gute Verbreitung unter der interessierten Leserschaft in Forschung und Praxis finden wird.

Weimar, im Juni 2010

Prof. Dr. Hans-Joachim Bargstädt M. Sc
Professur Baubetrieb und Bauverfahren



Unikatprozesse und ASIM-Aktivitäten – Bericht von der Arbeitsgruppe „Unikatprozesse“

1 Einbindung der Arbeitsgruppe „Unikatprozesse“

Die Arbeitsgruppe „Unikatprozesse“ ist eine Einrichtung der GI-Fachgruppe „Simulation in Produktion und Logistik“ (SPL) und damit eingebunden in die Gesellschaft für Informatik (GI).

Die **Gesellschaft für Informatik e.V.** ist die größte Vereinigung von Informatikerinnen und Informatikern im deutschsprachigen Raum. Sie versteht sich als Plattform für Informatikfachleute und Ingenieure aus Wissenschaft und Wirtschaft, Lehre und Öffentlicher Verwaltung. Die GI ist organisiert in Regionalgruppen, Fachbereiche und Fachgruppen.

Die 30 Regionalgruppen unterstützen und vertreten die Ziele der GI und sind Ansprechpartner in den Regionen. Die Fachbereiche der Gesellschaft für Informatik e.V. bündeln die Themenarbeit der Fachausschüsse (FA), Fachgruppen (FG) und Arbeitskreise (AK). Die GI betreibt mehr als hundert Fachgruppen, die durch die 13 Fachbereiche der GI abgedeckt sind.

Die Fachausschüsse sind Unterorgane einzelner Fachbereiche zur Strukturierung von gemeinsamen Themen. Die Fachausschüsse haben wiederum mehrere Fachgruppen. In den Fachgruppen findet die eigentliche, fachliche Arbeit der GI statt. Die Fachgruppen organisieren auch Fachtagungen und Workshops. Sie dokumentieren Ihre Arbeit in eigenen Zeitschriften, in Buchveröffentlichungen, Tagungsbänden oder in elektronischen Newslettern. Jede dieser Fachgruppen kann nun wieder zur zeitlich befristeten Bearbeitung spezieller Themenfelder Arbeitsgruppen bilden.

Der Fachbereich „Informatik in den Lebenswissenschaften (ILW)“ hat 14 Fachgruppen, wobei die folgenden sechs Fachgruppen in der „Arbeitsgemeinschaft Simulation“ (ASIM) gebündelt sind:

- Grundlagen und Methoden in Modellbildung und Simulation (GMMS)
- Simulation Technischer Systeme (STS)
- Simulation in Produktion und Logistik (SPL)
- Simulation von Verkehrssystemen (SVS)
- Simulation in der Betriebswirtschaft (SBW)
- Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften, Medizin und Biologie (SUGMB)

Ziel der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM) ist die Förderung und Weiterentwicklung von Modellbildung und Simulation in Grundlagen und Anwendung im deutschsprachigen Raum zur Verbesserung der Kommunikation zwischen Theorie und Praxis. Die sechs Fachgruppen beschäftigen sich mit spezifischen Gebieten von Modellbildung und Simulation.

Die ASIM-Fachgruppe Simulation in Produktion und Logistik (SPL) vertritt die Interessen und Aktivitäten bezüglich Simulationsentwicklungen und -anwendungen für logistische und produktionstechnische Fragestellungen. Sie widmet sich der Förderung und Weiterentwicklung von Modellbildung und Simulation in Produktion und Logistik durch Fachtagungen, Vortragsveranstaltungen, Diskussionsforen, Arbeitsgruppen, VDI-Richtlinien und Publikationen.



Die Fachgruppe (SPL) hat derzeit drei aktive Arbeitsgruppen:

- AG 1 Simulationsbasierte Optimierung von Produktions- und Logistikprozessen
- AG 2 Begriffe und Kennzahlen
- AG 3 Unikatprozesse

Die Arbeitsgruppe „Unikatprozesse“ wurde am 17.03.2009 auf einer Sitzung der Fachgruppe SPL in Fellbach beantragt und genehmigt.

Antragsteller waren:

- Prof. BARGSTÄDT, Universität Weimar
- Prof. BERNER, Universität Stuttgart
- Prof. FRANZ, Universität Kassel
- Prof. GEHBAUER, Universität Karlsruhe
- Prof. HUHNT, Universität Berlin
- Prof. KÖNIG, Universität Weimar
- Prof. MOTZKO, Universität Darmstadt
- Prof. RÜPPEL, Universität Darmstadt
- Prof. SCHACH, Universität Dresden
- Dipl.-Ing. STEINHAEUER, Flensburger Schiffbaugesellschaft
- Prof. ZÜLCH, Universität Karlsruhe

Die Arbeitsgruppe hat bisher drei Sitzungen durchgeführt,

- am 26.05.2009 an der Universität Kassel,
- am 15.09.2009 an der Bauhaus-Universität Weimar und
- am 12.01.2010 bei der Fa. SimPlan AG in Maintal.

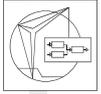
Dieser Beitrag soll über die Aktivitäten der Arbeitsgruppe berichten.

Einige wesentliche Schritte zur Vorbereitung der Gründung der Arbeitsgruppe „Unikatprozesse“:

- Workshop im Zuge der 12. ASIM-Fachtagung 26.–27.09.2006 in Kassel mit dem Thema: „Simulation von Bauprozessen“
- IBW-Fachtagung zum Thema: „Simulation in der Bauwirtschaft“ am 13.09.2007 in Kassel
- DFG-Rundgespräch 15.–16.10.2007 in Berlin zum Thema: „Brauchen wir Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Bauprozesse?“
- Forschungsworkshop zur Simulation von Bauprozessen am 31.03.2008 in Weimar, mit dem Thema: „Auf dem Weg zum digitalen (Bau-)haus-Bau“
- Die Vortragsreihe (Workshop) „Bauwesen“ im Zuge der 13. ASIM-Fachtagung 01.–02.10.2008 in Berlin
- Gründung der ASIM-Arbeitsgruppe am 17.03.2009 in Fellbach

2 Aufgaben und Ziele der Arbeitsgruppe

Die Modellierung und Simulation von Bauprozessen ist ein wichtiges neues Forschungsfeld an baubetrieblichen Lehrstühlen verschiedener Bauingenieur fakultäten in Deutschland. Die Simulation von Bauprozessen erfordert die Abbildung vieler unterschiedlich agierender Arbeitskräfte und vernetzt strukturierter Akteure mit ihren individuellen Fähigkeiten, Aufgaben und Zielen in einer sich stetig verändernden Arbeitsumgebung. Infolge der Komplexität und des hohen Aufwands hat sich die Simulation jedoch in der Praxis bisher noch nicht als eine innovative Methode zur Fertigungsplanung, Arbeitsvorbereitung und Prozessanalyse etabliert. Zur Bündelung der Aktivitäten im deutschsprachigen Raum wurde die Arbeitsgruppe „Unikatprozesse“ gegründet.



Die Arbeitsgruppe beschäftigt sich mit Fertigungs- und Logistikprozessen und den hierzu erforderlichen Planungsprozessen. Sie betrachtet nur Produkte die einmalig sind (Unikate), wie Bauwerke im Hoch- und Tiefbau, Schiffbau, Großgerätebau, Anlagenbau, usw. Sie will sich bewusst nicht nur auf Bauprozesse beschränken. Ein Unikat ist zwar einmalig, kann aber aus vielen durchaus sich wiederholenden Teilaufgaben und -prozessen bestehen. Eine Brücke, zum Beispiel, besteht aus verschiedenen Abschnitten, die zu Teiltaktprozessen führen, die über viele Felder fast identisch sind.

Besondere Kennzeichen der Unikatprozesse im Bauwesen sind:

- ortsgebundene Arbeitsgegenstände mit großer räumlicher Ausdehnung,
- ortsveränderliche Arbeitssysteme mit technologischen Einschränkungen,
- Einmaligkeit der Planung und Ausführung,
- viele Störungen und Parameter mit stochastischen Eigenschaften,
- viele unterschiedlich agierende Akteure und Beteiligte,
- vielfältige zwingende und sinnvolle Abhängigkeiten in den Prozessen,
- Erstreckung über lange Zeiträume.

Im Allgemeinen umfasst der Begriff „Bauprozesse“ die Gestaltung, Durchführung, Überwachung, Steuerung und Organisation der Abläufe beim Entwerfen, Planen, Bauen, Betreiben und Rückbauen baulicher Anlagen.

Demnach sind die Bauprozesse zu unterteilen in

- Planungsprozesse,
- Fertigungsprozesse,
- Nutzungsprozesse,
- Rückbauprozesse.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Besonderheiten der Bauprozesse im Vergleich zur stationären Produktion aufgezeigt.

Tabelle 1: Vergleich der Bauprozesse mit der stationären Produktion an vier Kriterien

Kriterium	Stationäre Produktion	Baustelle
Fertigungsplanung	durch Serienfertigung festgelegt, einmalige Planung für viele Ausführungen	durch unterschiedliche Fertigungsbedingungen, einmalige Planung für einmalige Ausführung
Produktionsort	ortsgebunden an einer Produktionsanlage, geschützt gegen Witterungen	wechselt ständig sowohl mit dem Projekt als auch während der Produktion eines Projektes, stark witterungsabhängig
Herstellung	festgelegter getakteter Ablauf, fast ohne Behinderungen	meist gestörter Ablauf wegen vieler, unvorhersehbarer Behinderungen bedingt durch Einzigartigkeit und Einmaligkeit des Projektes
Produktionsdauer	relativ kurz sowohl für eine Serie als auch für einen Auftrag, vorab gut planbar	nicht planbar, ständige Störungen im Terminplan, erstreckt sich über Jahre (unsichere Kostenbedingungen)

Die Arbeitsgruppe beschäftigt sich nur mit der Simulation von Prozessen in Produktion und Logistik. Dies sind, zum Beispiel, alle Arbeitsabläufe während der Erstellung einer Baumaßnahme. Grundlage sind dabei die Definitionen der VDI-Richtlinie 3633.

„Simulation ist ein Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“



Mit Hilfe der Simulation soll das zeitliche Ablaufverhalten komplexer Systeme durch Experimente an einem geeigneten Modell untersucht werden, z. B. durch Variation der Produktionsmittel.

Jede Simulationsstudie arbeitet nach dem gleichen Schema:

- | | |
|------------------|---|
| 1. Systemanalyse | Der zu untersuchende Prozess wird analysiert. |
| 2. Modellierung | Der Prozess wird unter einer Reihe von konkreten Annahmen in einem Modell nachgebildet. |
| 3. Experimente | Durchführung von Versuchen/Studien am Modell |
| 4. Auswertung | Analyse der Ergebnisse und Verallgemeinerung auf die Realität |

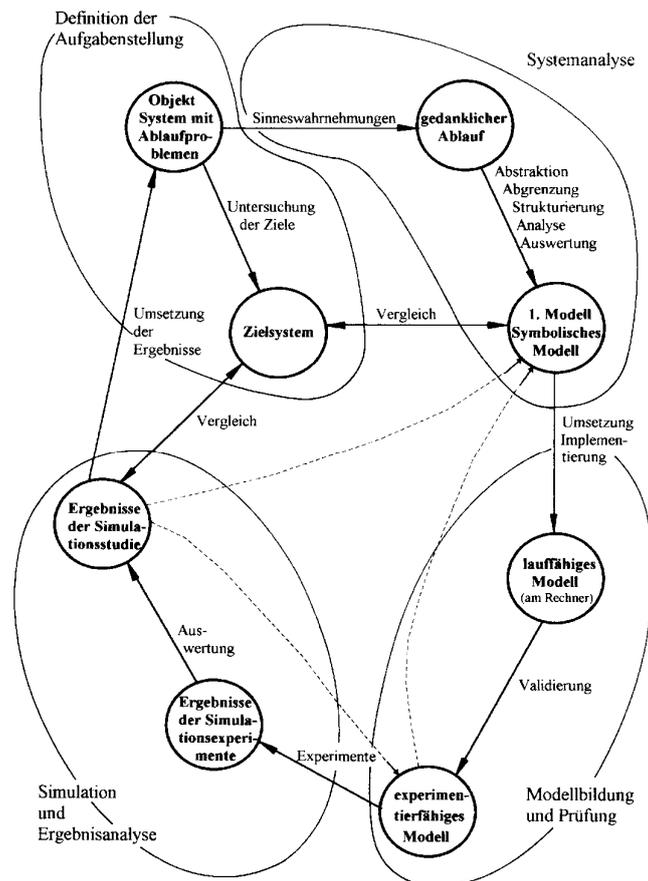


Bild 1 Ablauf einer Simulationsstudie

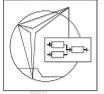
Zeitaufwand für eine Simulationsstudie:

- 25 % Systemanalyse
- 30 % Modellierung
- 20 % Validierung
- 25 % Experimente

Aufgaben der Grundlagenforschung im Bereich der Simulation von Bauprozessen bestehen darin,

- neue Simulationsverfahren zu entwickeln oder aus anderen Disziplinen abgeleitete Simulationsverfahren weiter zu vertiefen, um Bauprozesse zu modellieren,
- Methoden zu entwickeln, um Bauprozesse realitätsnah abzubilden – zur Analysierung, Visualisierung und Optimierung,
- Instrumente zu entwickeln zur Unterstützung der Koordination und Steuerung der Bauprozesse.

Basis hierzu sind die Ist-Analyse der Bauprozess und die Entwicklung von brauchbaren Simulations-tools.



Schwierigkeiten beim Einsatz der Simulation in der Baupraxis:

- Einmaligkeit einer Baustelle ⇒ für jede neue Baustelle ist ein neues Modell erforderlich
- Komplexität der Bauprozesse ⇒ das Modell muss Störungen und Unterbrechungen abbilden können
- große Anzahl an Beteiligten ⇒ erschwerte Systemanalyse
- zeitaufwendige Simulationsstudie für kurzfristige Baustellenabläufe ⇒ Kosten der Simulation übertreffen eventuell den Nutzen
- Die Baustellenbedingungen erfordern ständig neue statistische Studien ⇒ Zeitanalysen auf der Baustelle und Verteilungsfunktionen erforderlich
- Entscheidungen beruhen auf Erfahrungen der Bauleitung ⇒ hieraus resultieren oftmals keine rationalen Lösungswege

Die realitätsnahe Modellierung zur Simulation der Unikatprozesse ist sehr schwierig und nur mit einem deutlich höheren Aufwand als in der stationären Industrie möglich. Eine zu starke Reduktion und Idealisierung der Realität führt zu ungenauen Ergebnissen in der Simulationsstudie. Vorhandene Modelle und Simulationsentwicklungen aus der stationären Industrie sind zur Modellbildung von Unikatprozessen nur eingeschränkt geeignet. Erforderlich ist die Abbildung vieler unterschiedlich agierender Arbeitskräfte und Geräte mit ihren individuellen Fähigkeiten und Aufgaben in einer sich stetig verändernden Arbeitsumgebung.

Zur Modellierung der Bauprozesse gibt es derzeit verschiedene Methoden:

- die deterministische und stochastische Netzplantechnik,
- Ansätze auf Grundlage erweiterter Petri-Netze (EPK),
- spezielle Programmiersprachen zur Simulation,
- kommerzielle bausteinorientierte Simulationstools und
- agentenbasierte Simulationsentwicklungsumgebungen.

Ziel der derzeitigen Forschungsansätze an verschiedenen Universitäten ist der Einsatz der Simulation bei Unikatprozessen zur Steigerung der Effizienz und der Wirtschaftlichkeit der eingesetzten Produktionsmittel. Dabei geht es vorrangig oftmals nicht um die Optimierung der Prozesse, sondern „nur“ um die Überprüfung der Machbarkeit und Ermittlung der Reihenfolgen, der Abhängigkeiten, Einsatz der Ressourcen und der erforderlichen Zeitdauern. Hierzu sollen auch vorhandene kommerzielle Entwicklungsumgebungen für die Simulation im Bauwesen erschlossen werden, die eine Modellierung mit hoher Komplexität ermöglichen.

Zusammenfassung der Aufgaben und Ziele der Arbeitsgruppe „Unikatprozesse“

Die Arbeitsgruppe „Unikatprozesse“ möchte einen Überblick über den derzeitigen Stand der Forschung und Entwicklung sowie neue Impulse zum Einsatz der Simulation von Unikatprozessen geben. Dabei soll nach praxistauglichen Lösungen für die speziellen Probleme bei der Modellierung und Simulation von Unikatprozessen gesucht werden.

In der Arbeitsgruppe sollen

- die Besonderheiten der Unikatprozesse herausgearbeitet werden,
- die vorhandenen Ansätze zur Modellierung verglichen werden,
- eine Literatursammlung zusammen gestellt werden,
- eine Sammlung von Begriffen und Definitionen erfolgen (Wiki),
- Werkzeuge zur Modellierung und Simulation weiter entwickelt werden,
- vorhandene Tools miteinander verzahnt werden,
- die erforderlichen Schnittstellen definiert werden,
- geeignete neue Instrumente erforscht werden.



Vereinbarte Vorgehensweise für die zukünftige Arbeit der Arbeitsgruppe:

- gemeinsame Diskussionen in Arbeitsgruppensitzungen ⇒ 3 Sitzungen pro Jahr
- Organisation verschiedener Workshops und Tagungen ⇒ 1 Workshop pro Jahr
- Beteiligung an den ASIM-Fachtagungen mit eigenen Sessions ⇒ alle zwei Jahre
- gemeinsame Publikationen der Ergebnisse und Erkenntnisse

Vorstellung einiger Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Simulation von Bauprozessen am Institut für Bauwirtschaft der Universität Kassel.

Das Fachgebiet Bauorganisation und Bauverfahren am Institut für Bauwirtschaft beschäftigt sich seit mehr als 20 Jahren mit der Simulation von Bauprozessen. Zu Beginn stand die Modellierung mit modifizierten höheren Petrinetzen und erweiterten Vorgangsknotennetzplänen im Mittelpunkt der Forschung. Später kamen verschiedene Petrinetz-basierte kommerzielle Simulationsentwicklungsumgebungen zur Anwendung. Darauf aufbauend wurden der Einsatz verschiedener bausteinorientierter Simulationstools und aktuell agentenbasierte Simulatoren getestet.

Themenschwerpunkt der Forschung im Institut für Bauwirtschaft:

- Datenerfassung, Datenaufbereitung und Datenübernahme in die Simulation (simulationsrelevantes Produktmodell)
- Prüfung von Modellkonzepten aus anderen Fachdisziplinen auf ihre Anwendbarkeit im Bauwesen
- Entwicklung von Simulationstools (Simulatoren) zur Vereinfachung der Modellierung, Validierung und Durchführung der Simulationsstudien
- Entwicklung von Methoden und Instrumenten zur Visualisierung (virtuellen Darstellung von Bauabläufen)

Beispiele zur Simulation im Institut für Bauwirtschaft:

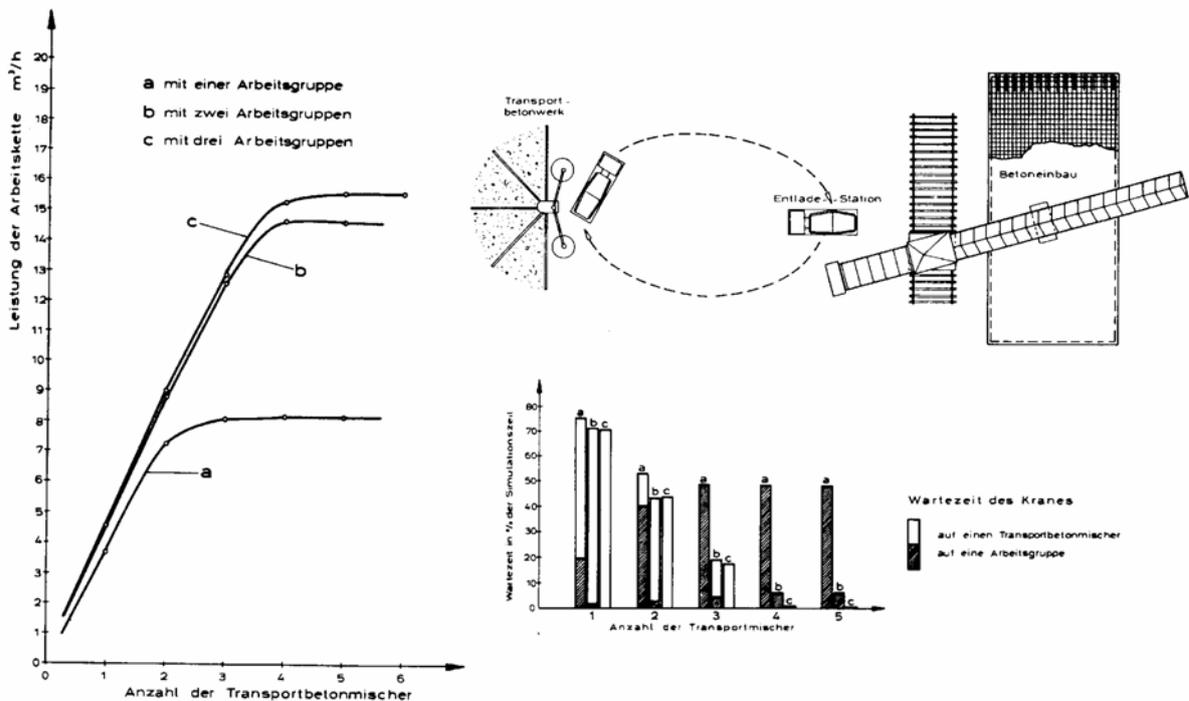


Bild 2 Simulation der Logistik des Betontransports zu einer Baustelle

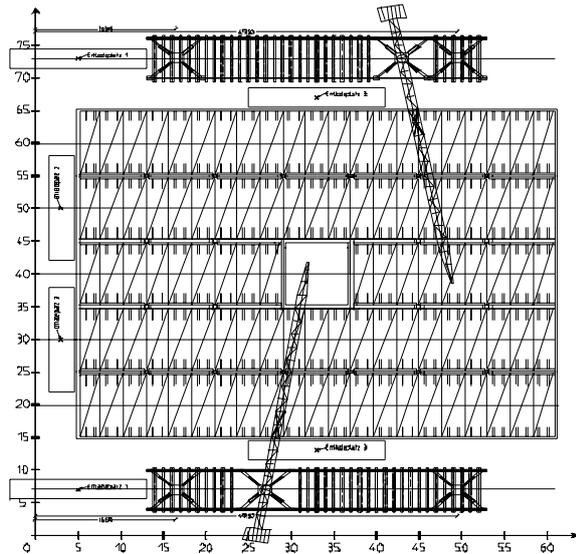


Bild 3 Simulation der Fertigteilmontage

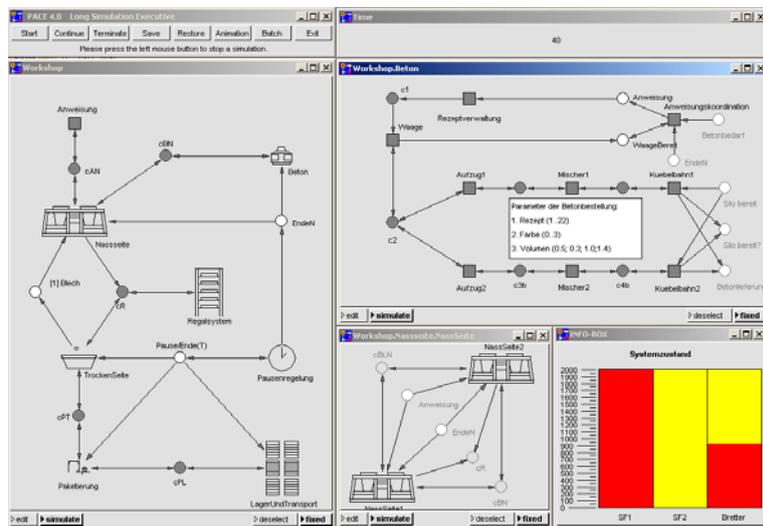


Bild 4 Simulationstool für die Pflastersteinindustrie **ConPass** (Concrete Processing Analysing and Simulation System)

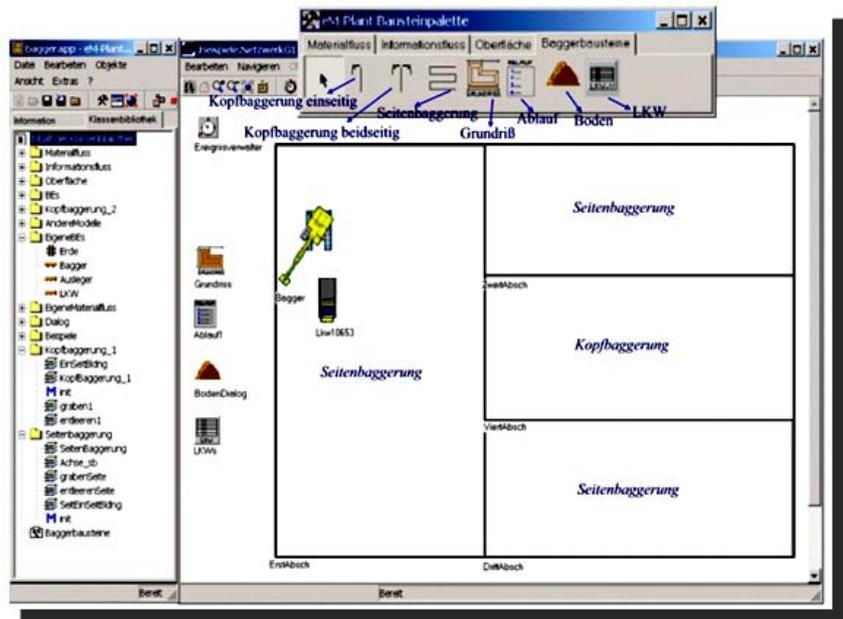


Bild 5 Beispiel einer bausteinorientierten Simulationsentwicklungsumgebung für den Einsatz im Tiefbau (Plant Simulation)



Bisher im Institut für Bauwirtschaft zur Simulation von Bauprozessen getestete und eingesetzte Konzepte und Werkzeuge:

- Petri-Netze:
 - NET, PSI-Software-Engineering, Berlin
 - SimNet, TU-Dresden
 - PACE, IPE Software, Glonn
- Ereignisgesteuerte Prozessketten (EPK)
- kommerzielle Simulationstools:
 - MicroCYCLONE 2.5, Prof. HALPIN, West-Lafayette, USA
 - Symphony, Prof. ABOURIZK, University of Alberta, Kanada
 - Simflex/2, Prof. A. REINHARDT, Universität Kassel
 - Income 3.3, Fa. Promatis Informatik
 - Plant Simulation, Siemens
- Agentenbasierte Simulation:
 - SeSAm, Shell for Simulated Agent Systems, Prof. PUPPE, Universität Würzburg

Im Mittelpunkt der Forschung steht dabei stets die Anwendung an verschiedenen konkreten Beispielen im Tiefbau, in der Baustoffindustrie und dem Hochbau. Heute liegt ein Schwerpunkt der Forschung in der Entwicklung von Schnittstellen zwischen der CAD – als Basis vieler simulationsrelevanter Parameter – und der Simulationsumgebung. Dazu wurde im Zuge eines von der DFG geförderten Forschungsprojekts ein agentenbasierter Simulator (SeSAm) in ein CAD-System (AutoCAD Architecture 2009) integriert und ein Simulator für den Hochbau (CiSmo) in die CAD-Umgebung implementiert.

Zielsetzungen der Entwicklung von CiSmo (CAD-integrierte Simulationsmodellierung für die Bauablaufsimulation im Hochbau) sind:

- Simulationsmodellierung im CAD-System,
- hoher Automatisierungsgrad bei der Datenerfassung und Aufbereitung,
- Verwendung vorhandener Daten aus der Entwurfsplanung (Gebäudemodell),
- Wiederverwendung von Daten aus abgeschlossenen Projekten (Prozessmodell),
- funktionelle und verständliche Anwenderoberfläche zur Dateneingabe, Simulation und Ergebnisauswertung,
- Verwendung eines agentenbasierten Modellierungskonzepts.

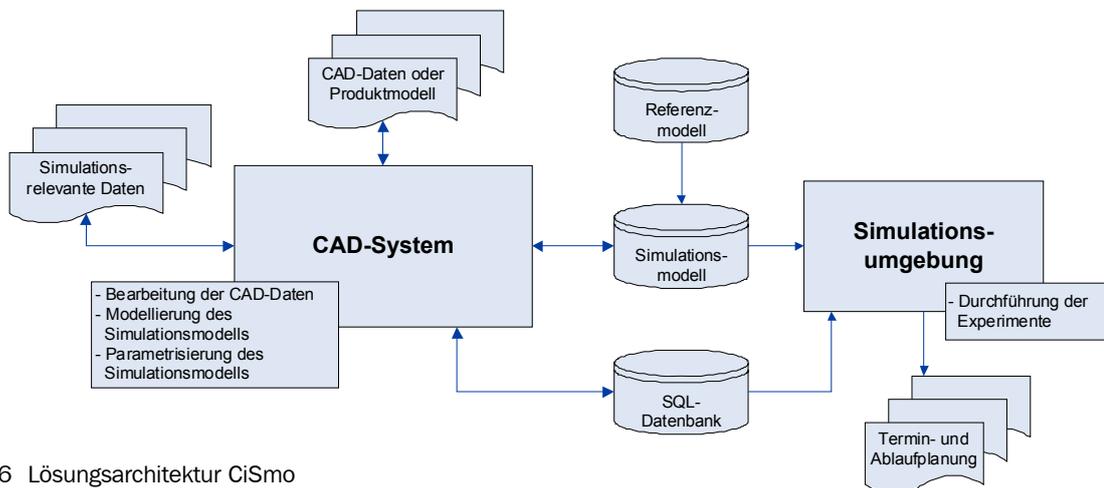
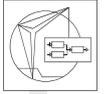


Bild 6 Lösungsarchitektur CiSmo

Derzeitiger Entwicklungsstand von CiSmo:

- Eine Modellierungsumgebung im CAD-System wurde prototypisch implementiert.
- Ein agentenbasiertes Referenzmodell wurde entwickelt.
- Ein Prozessmodell für die Beschreibung der Bauprozesse wurde entwickelt und in einer SQL-Datenbank implementiert.
- Die Modellierung und Generierung von Simulationsmodellen im CAD-System für die Rohbauphase ist möglich.



Weitere geplante Entwicklungen im Zusammenhang mit CiSMo:

- Entwicklung von Werkzeugen für die Auswertung der Simulationsläufe (Terminplanung, 3-D-Visualisierung, BE-Planung, Ressourcenauslastung, Transportlogistik)
- Erweiterung von CiSMo für die Belange des Ausbaus
- Validierung und Kalibrierung des Simulationsmodells anhand von abgeschlossenen Bauprojekten

Grundsätzlich ist der Einsatz der Simulation immer dann sinnvoll, wenn

- ein vollständiger mathematischer Optimierungsalgorithmus nicht verfügbar ist,
⇒ eine analytische Lösung ist nicht möglich;
- verfügbare analytische Methoden vereinfachende Annahmen erforderlich machen, die den Kern des eigentlichen Problems verfälschen,
⇒ unscharfe Modellierung;
- verfügbare analytische Methoden zu kompliziert sind, bzw. mit so erheblichem Aufwand verbunden sind, dass ihr Einsatz mit vertretbaren Kosten nicht praktikabel erscheint,
⇒ eine analytische Lösung ist zu schwierig, zu komplex;
- es zu kostspielig ist, reale Experimente durchzuführen,
⇒ Crash-Versuche;
- eine schnelle Prognose über die Entwicklung erforderlich ist,
⇒ aus Zeitgründen keine andere Analyse möglich.

Vorteile der Simulation bei der Planung von Bauprozessen:

- sichere Planungsentscheidungen
Alternativen können mit ihren Auswirkungen im Gesamtsystem getestet und anschließend diejenige, mit dem günstigsten Systemverhalten ausgewählt werden.
- effizientere Planungen
Alternativen, die durch eine Simulation untersucht wurden und nicht zu einer Verbesserung geführt haben, brauchen nicht weiter verfolgt werden.
- schnelle Realisierung und Reaktion
Simulationsunterstützte Planungen der Fertigungsprozesse beruhen auf einer sicheren Grundlage.
- verbesserte Abläufe
Durch eine simulationsunterstützte Ablaufplanung wird der Aufwand für die Realisierung reduziert, damit sinken die Kosten der Fertigung und kann die Qualität der Ausführung steigen.

3 Vorstellung der Aktivitäten der Arbeitsgruppe

Bericht von der ersten Sitzung der Arbeitsgruppe

Die erste Sitzung der Arbeitsgruppe fand am 26.05.2009 an der Universität Kassel mit 21 Teilnehmern statt.

Zitat aus der Einladung:

„Bei dem ersten Treffen soll es zunächst um einen intensiven Erfahrungsaustausch der unterschiedlichen Interessengruppen gehen und um die verschiedenen Sichtweisen.

Des Weiteren müssen wir die Themenfelder der Arbeitsgruppe sowie die Grenzen diskutieren und zukünftige Arbeitspakete auflisten.

Auf Basis dieser Diskussion können dann gegebenenfalls erste Arbeitsaufträge definiert und an einzelne Teilnehmer delegiert werden.“



Eingeladen waren 28 Personen, sowohl Vertreter der Industrie aus dem IT-Bereich als auch aus den Unternehmen, die sich mit der Simulation in der Anwendung beschäftigen und Vertreter aus den Hochschulen, die im Bereich der Simulation von Unikatprozessen forschen, insbesondere aus den Fakultäten für Informatik als auch aus der Bauwirtschaft.

Ablauf der ersten Sitzung der Arbeitsgruppe

Auf der 1. Sitzung nahm jeder Teilnehmer in einem kurzen Statement zu folgenden Punkten Stellung:

- Vorstellung der eigenen Tätigkeiten und Arbeitsgebiete
- eigene berufliche Herausforderungen im Bezug zur Simulation von Unikatprozessen
- Motivation für die Teilnahme an der Arbeitsgruppe
- mögliche eigene Mitwirkungsfelder
- Vorschläge für die Aufgaben und Ziele der Arbeitsgruppe

Anschließend erfolgte eine eingehende Diskussion zu dem weiteren Vorgehen der Arbeitsgruppe

Ergebnisse der ersten Sitzung der Arbeitsgruppe

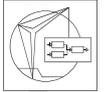
1. Die Themenschwerpunkte der Arbeitsgruppe Unikatprozesse sollen deutlich im Bereich der Simulation in Produktion und Logistik angesiedelt bleiben.
2. Die Simulation von Planungsaktivitäten soll nicht Gegenstand der Arbeitsgruppe sein.
3. Zur Simulation eingesetzt werden überwiegend Systeme auf Basis der ereignisdiskreten Simulation.
4. Die Arbeitsgruppe sollte vielfältig zusammengesetzt sein und auch Teilnehmer außerhalb des Baubereichs einschließen.
5. Gewählt wurden zum: Sprecher der Arbeitsgruppe: Prof. FRANZ und stellvertretender Sprecher: Prof. BARGSTÄDT.
6. Es ist eine Klärung bzw. Harmonisierung der wesentlichen verwendeten Begrifflichkeiten innerhalb der Arbeitsgruppe herbeizuführen. Die Begriffsklärungen sollen ausgehen von der VDI-Richtlinie 3633, den REFA-Definitionen sowie Definitionen aus dem Projektmanagement (DIN ISO 69900 ff).
7. Abgrenzung des Begriffs „Unikatprozesse“: Unikate sind einmalige Projekte mit hoher Individualität z. B.: im Bauwesen, Anlagenbau, Schiffbau usw. (Unikatfertigung).
8. Die Arbeitsgruppe beschränkt sich auf Fertigungsprozesse und deren Planung.
9. Vorhandene Modelle und Simulationsentwicklungen aus der stationären Industrie sind zur Modellbildung von Unikatprozessen nur eingeschränkt geeignet.
10. Am Anfang jeder Arbeitsgruppensitzung sollen vorab festgelegte Impulsvorträge stattfinden, auf deren Basis dann diskutiert werden kann.

In der Arbeitsgruppe sollen in der Zukunft vorrangig folgende Aufgaben behandelt werden:

- Granularität von Prozessmodellen,
- Berücksichtigung unterschiedlicher Mitwirkender und Sichtweisen,
- Möglichkeiten der Industrialisierung im Bau verbessern,
- großen Anpassungsbedarf unter Zeitdruck vereinfachen,
- Robustheit der Planung und Planungssicherheit in Fertigung verbessern,
- Effizienz bei Unikaten und Kleinserien erzeugen,
- Veränderlichkeit des Betrachtungsgegenstands berücksichtigen,
- Einfluss des Produkts auf den Prozess realistisch erfassen,
- Wege der Datenbeschaffung und Datengüte verbessern,
- kontinuierliche Feststellung von Fertigungsstatus,
- Wissensstand und Einsatzbereitschaft von baubetrieblichen Tools verbessern,
- Einsatzfähigkeit und Kosteneffizienz der Simulation nachweisen,
- Diskussion zu lukrativen Anwendungsfelder weiter treiben.

Bericht von der zweiten Sitzung der Arbeitsgruppe

Die 2. Sitzung der Arbeitsgruppe fand am 15.09.09 an der Bauhaus-Universität in Weimar statt. Insgesamt nahmen 17 Personen aus Forschung und Praxis teil.



Ablauf der zweiten Sitzung der Arbeitsgruppe

Vorstellung verschiedener Forschungsinitiativen im Bereich der Modellierung und Simulation im Bauwesen: Mefisto, Forschungsverbund ForBau, SimulationsToolkit Shipbuilding, SimoFit, Alterung der Beschäftigten, energieeffiziente Bauprozesse, Universalisierung der Modellentwicklungsumgebung, Simulation mit Multiagenten-Systemen, Datenschnittstellen zwischen CAD und Simulation

Anschließend erfolgten drei Impulsvorträge mit anschließender Diskussion:

1. Definitionen zu Unikat und Unikatprozessen ⇒ Prof. BARGSTÄDT
2. Was kann die Netzplantechnik? ⇒ Prof. SCHACH
3. Möglichkeiten der Simulation ⇒ Prof. ROSE

Dabei erfolgte eine eingehende Diskussion zu den Themen:

- Festlegung von Begriffen, womit wollen wir uns beschäftigen?
- Was ist der Unterschied zwischen der Netzplantechnik und Simulation?
- Vorgehen und Ziele der Arbeitsgruppe?
- Was soll die Arbeitsgruppe leisten?

Ergebnisse der zweiten Sitzung der Arbeitsgruppe

1. Unikat kann als Produkt oder Prozess verstanden werden.
2. Die Arbeitsgruppe beschäftigt sich nur mit Fertigungs- und Logistik-Prozessen und den hierzu erforderlichen Planungsprozessen.
3. Wir betrachten nur die Herstellung von Produkten, die einmalig sind, wie die Errichtung von Bauwerken im Hoch- und Tiefbau, Schiffsbau, Anlagenbau, nicht aber Managementprojekte.
4. Ein Unikat ist zwar einmalig, aber kann aus vielen durchaus sich wiederholenden Teilaufgaben und -prozessen bestehen.
5. Ziele der Simulation können sein: die Prüfung der Durchführbarkeit, Prüfung der Auslastung von Ressourcen bei bestimmter Konstellation, Ermittlung der Kosten bei Variation der Ressourcen oder alternative Ausführungsvarianten.

Bericht von der dritten Sitzung der Arbeitsgruppe

Die dritte Sitzung der Arbeitsgruppe mit 16 Teilnehmern fand am 12.01.2010 in Maintal bei der Fa. SIMPLAN statt. An dieser Sitzung nahmen 16 Personen teil.

Ablauf der dritten Sitzung der Arbeitsgruppe

Zunächst erfolgten wieder mehrere Impulsvorträge:

- Tätigkeitsspektrum der Fa. SimPlan: Full-Service-Anbieter für die Ablaufsimulation in Produktion und Logistik ⇒ Dr. SPIECKERMANN (SimPlan)
- Was kann eine Simulationssoftware leisten? ⇒ Dr. PITSCH (INCONTROL)
- Funktionalitäten Baustein-orientierter Simulationstools ⇒ Dr. PIEPENBROCK (Siemens)
- Produktmodell und Prozessmodell im Bauwesen ⇒ Prof. HÄUBI (FH NW Schweiz)

Anschließend erfolgte eine eingehende Diskussion zu den Impulsvorträgen und zur weiteren Tätigkeit der Arbeitsgruppe.



Ergebnisse der dritten Sitzung der Arbeitsgruppe

1. Bei der Planung und Ausführung entstehen Kompetenzverschiebungen, Prozessbrüche und Datenverluste innerhalb der gesamten Lebenszyklus-Kette; hier muss nach Wegen gesucht werden, dies zu verhindern.
2. Die Arbeitsgruppe sollte die Problematik stärker strukturieren und auf die Kernprobleme ausfokussieren.
3. Bei der Modellierung kann von den Arbeitsprozessen oder von den Ressourcen des Prozesses ausgegangen werden.
4. Probleme sind u. a.: die Zeitdauer der Modellierung, der hohe Aufwand, Möglichkeit der Verifizierung und Validierung, das Aufsetzen des Modells auf den aktuellen Projektstatus, Robustheit des Modells, Datenaufbereitung zur Modellierung und die Granularität.
5. Erforderlich ist die Diskussion in der Arbeitsgruppe an einem konkreten Fallbeispiel.
6. Aufgabenverteilung für drei weitere Impulsvorträge für die nächste Sitzung:
 - „Generierung von Modellen“ ⇒ Prof. ROSE
 - „Vorstellung eines aktuellen Bauprojektes als Fallbeispiel“ ⇒ Prof. BERNER
 - „Festlegung der Aufgaben und Ziele der Arbeitsgruppe“ ⇒ Prof. FRANZ

Weitere geplante Aktivitäten der Arbeitsgruppe:

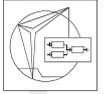
- | | |
|--------------|---|
| 25. 03. 2010 | 1. Öffentlicher Workshop der Arbeitsgruppe in Kooperation mit der Professur Baubetrieb und Bauverfahren (Prof. BARGSTÄDT) an der Bauhaus Universität Weimar |
| 27. 05. 2010 | 4. Sitzung der Arbeitsgruppe an der TU Berlin |
| Sep. 2010 | 5. Arbeitsgruppensitzung |
| 07. 10. 2010 | Ausrichtung einer Session mit 10 Vorträgen im Zuge der 14. ASIM-Fachtagung am 07.–08. 10. 2010 in Karlsruhe |
| März 2011 | 2. Öffentlicher Workshop der Arbeitsgruppe zur Simulation von Unikatprozessen an der Universität Kassel |

4 Ausblick

Die Resonanz auf die Einrichtung der Arbeitsgruppe war sehr hoch, zumindest von Seiten der Hochschulen und Softwarebüros, weniger von Seiten der Wirtschaft.

Wir erwarten und erhoffen uns für die zukünftige Arbeit der Gruppe:

- interessante Diskussionen in der Arbeitsgruppe,
- eine aktive Mitarbeit möglichst vieler Teilnehmer,
- Erfahrungs- und Gedankenaustausch,
- neue Impulse für die fach- und ortsübergreifende Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Simulation von Unikatprozessen,
- neue Erkenntnisse und branchenübergreifende Einsatzfelder,
- eine bessere Ausschöpfung des vorhandenen Potenzials,
- größere Resonanz in der Fachwelt und Akzeptanz in der Praxis,
- einen „Quantensprung“ für die Simulation in der Praxis.



Ein Konzept zur Kopplung makroskopischer Optimierung mit mikroskopischer Simulation von Erdbauprozessen²

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird ein Konzept zur Kopplung makroskopischer Optimierung mit mikroskopischer Simulation vorgestellt. Das Ziel dieses Konzepts ist, die Dauer der Erdbauarbeiten, insbesondere die Transportzeit der Erdmassen zu minimieren. In der makroskopischen Optimierung wird die Erdbaustelle als bipartiter Graph modelliert, wobei die Auftrags- und Abtragbereiche als Knoten und die Transportwege als Kanten dargestellt sind. Auf dieser Basis wird die kostenminimale Erdbewegung zwischen Einschnitten und Dämmen mit Hilfe der Linearen Programmierung (LP) exakt bestimmt, jedoch ohne Betrachtung der Prozessinformation und des Ressourceneinsatzes. Die Modellierung prozessrelevanter Information, z. B. das kinematische Verhalten der Baumaschinen, erfolgt in einem kommerziellen Ereignis-basierten Simulationssystem. Mit einer ereignisgesteuerten Ablaufsimulation kann die Dauer der Erdbauarbeiten, insbesondere die Erdtransporte, ermittelt werden. Die so bestimmten Transportdauern werden anschließend als neue Eingangsparameter für die Optimierung verwendet. Dieser Vorgang wird iterativ wiederholt bis sich stabile Werte einstellen.

Der Vorteil einer solchen bidirektionalen Kopplung besteht darin, dass prozessrelevante Informationen in die mathematische Optimierung einbezogen werden. Das Verfahren wurde auf vereinfachte Daten einer realen Demobaustelle angewendet. Dabei konnten positive Erfahrungen mit dem bidirektionalen Kopplungsansatz gesammelt werden.

1 Einführung

Die Simulation von Bauprozessen wurde in verschiedenen Bereichen des Bauwesens intensiv untersucht, zum Beispiel für den Innenausbau [1], den Trockenbau [6], den Erdbau [3] und den Brückenbau [7]. Der Nutzen des Einsatzes von Simulationsverfahren besteht darin, dass der Ausnutzungsgrad der eingesetzten Ressourcen durch detaillierte Abbildung der Prozessaktivitäten und ihrer Abhängigkeiten analysiert werden können. Probleme im Bauablauf, wie Unter- und Überkapazitäten sowie Leerläufe im Prozess, können so frühzeitig erkannt werden. Daneben können verschiedene Einsatzvarianten der Bauausführung durchgespielt und miteinander verglichen werden.

In dieser Arbeit wird die Ablaufsimulation für Erdbauprozesse untersucht. Um die Besonderheit von Erdbauprozessen zu verdeutlichen, werden in Bild 1 die Unterschiede zwischen Erdbau und Hochbau anhand verschiedener Kategorien dargestellt. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass bei der für die Ablaufsimulation notwendigen Mengenermittlung nicht nur das geplante Bauwerk, sondern auch der vorliegende Baugrund zu berücksichtigen ist. Ein weiterer Unterschied liegt im Bereich der Bauprozesse: Während der Bauablauf auf Erdbaustellen eher maschinenintensiv und transportlastig ist, dominieren die komplexen Prozessabhängigkeiten im Hochbau.

¹ E-Mailadresse der Autoren: {y.ji | borrmann}@bv.tum.de

² Das vorgestellte Projekt wird von der Bayerischen Forschungsförderung im Rahmen des Forschungsverbunds „ForBAU – Virtuelle Baustelle“ gefördert.



	Bauwerk	Baustoff	Baustellen	Bauprozesse
Erdbau	Böschung und Planum des Damms bzw. des Einschnitts, Baugrube	Natürliche Bodenmaterialien, - Geometrische Struktur - Bodenkennwerte nicht vollständig vorhersehbar	Deponie / Zwischenlager Erdtransport (Baustraße, Feldweg) Hindernisse (Wälder, Brücken, Flüsse) Witterung	Einfache Operationen: Lösen, Laden Transportieren Verteilen, Verdichten Maschinen-intensiv Komplexe Kinematik
Hochbau	Geometrie beliebig komplex	vorhersehbar	Baulogistik (Fertigteil Lieferung) Baustelleneinrichtung (Kran, Lagerung, etc.,)	Komplexe Abhängigkeiten Arbeiter-intensiv

Bild 1 Vergleich Erdbau mit Hochbau

Die wesentliche Aufgabe bei Erdbauarbeiten besteht darin, Erdstoffe an einem Ort, z. B. einem Einschnitt, zu lösen, zu einem anderen Ort, in der Regel einem Damm, zu transportieren und dort einzubauen. Für die Ablaufsimulation ist es erforderlich, die Arbeitszeit der Erdbaugeräte, wie die Spielzeit der Bagger, Durchschnittsgeschwindigkeit der Dumper, nicht nur anhand der Leistungsdaten sondern auch durch Messungen vor Ort auf der Baustelle empirisch zu bestimmen. Ferner sollen die kinematischen Prozesse der Erdbaugeräte detailliert modelliert werden, sowie die für den Erdtransport relevante Rahmenbedingungen, wie Fahrwege, Hindernisse, Verkehrseinschränkungen, im Simulationsmodell abzubilden.

Um die Effizienz der Ausführung von Erdarbeiten zu erhöhen, soll in unserem Ansatz die Wahl der Transportwege optimiert werden. In der heutigen Praxis fallen erdbaubetriebliche Entscheidungen meistens auf Basis der Projekterfahrung des zuständigen Bauleiters. Es soll ein IT-gestütztes System geben, das dem Bauleiter vor und während der Bauausführung unterstützt, die kompletten Erdbauprozesse, den zeitlichen Bauablauf besser zu kontrollieren.

2 Ablaufsimulation von Erdbauprozessen

Im Forschungsverbund ForBAU – Virtuelle Baustelle [2] wurde im Rahmen der Teilprojekte „Bau-IT“ und „Bau-SIM“ ein 3D-Modell-basiertes Simulationsframework für Erdbauprojekte entwickelt. Dieses Framework bietet die folgenden Features:

1. Bereitstellung dreidimensionaler Simulationsquelldaten [5],
2. Modellierung von Optimierungsproblemen in Erdbauprozessen [4],
3. Verwendung einer erdbauspezifischen Simulationsbibliothek [8].

Der Aufbau und die wesentlichen Komponenten dieses Frameworks sind in Bild 2 dargestellt. *ForBAU Integrator* erstellt aus den verschiedenen Teilmodellen, u. a. dem 3D-Baugrundmodell, dem 3D-Geländemodell und dem Trassenmodell, die in verschiedenen Fachdomänen der Infrastrukturplanung entstanden sind, ein integriertes 3D-Modell. Auf Basis dieses Modells wird eine Voxelisierung durchgeführt, die es erlaubt, Aushubmassen und Einbauvolumen exakter als mittels klassischer Verfahren zu bestimmen. Jedes der dabei entstehenden Voxel-Elemente enthält mehrere Parameter, wie die 3D-Position, Bodenparameter sowie die Größe (Breite, Länge und Höhe). Die Voxel können auch strukturiert bzw. gruppiert werden, um sie an verschiedene Schaufelgrößen der Bagger anzupassen.

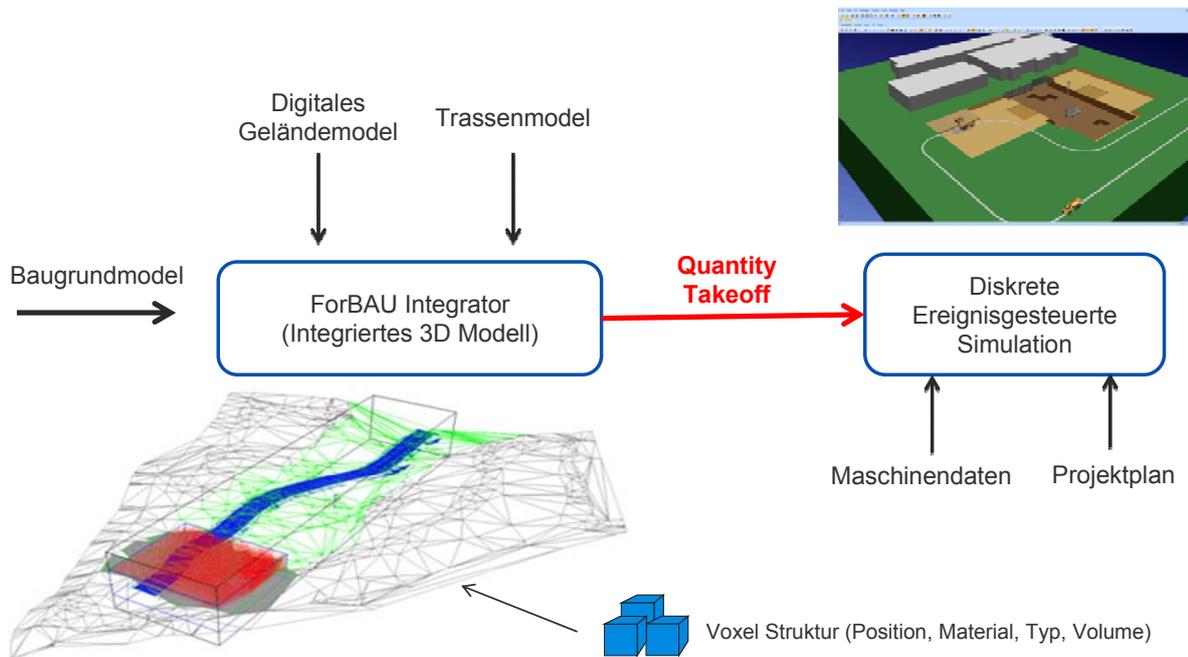


Bild 2 Konzeptübersicht des ForBAU Simulationsframeworks

Für die Planung der Erdtransportwege und Baustelleneinrichtungsobjekte, wie Zwischenlager und Deponien, stellt der *ForBAU Integrator* eine graphische Oberfläche zur Verfügung. Dabei wird eine Katasterkarte hinterlegt, die es erlaubt, die Transportplanung auf intuitive Weise durchzuführen. Die Voxeldaten und die Baustelleneinrichtungsinformation werden über eine XML-Schnittstelle in das Simulationssystem importiert.

Das ForBAU Simulationsframework enthält eine kommerzielle, bausteinorientierte Simulationsumgebung. Auf Basis dieser Umgebung wurde im Rahmen des ForBAU-Projekts eine bauspezifische Simulationsbibliothek erstellt [9]. Zusätzliche Informationen, wie Projektplan und Maschinenkennwerte, werden von externen Datenquellen in das Simulationssystem importiert. In Bild 3 ist eine Klassifizierung der Simulationsquelldaten dargestellt. Der prinzipielle Aufbau eines Simulationsmodells wird in Bild 4 verdeutlicht.

Quantitäten der Erdbewegung - Position - Volumen - Bodenkennwerte und der Erdbaumaschinen - Anzahl der Bagger / LKWs / Raupen	Kennwerte der Baumaschinen - Geschwindigkeit, - Größe des Baggerlöffels - Größe der Mulde eines Dumpers / LKWs - Verdichtungsleistung - Spielzeit - Umlaufzeit
Projektplan (Terminierung) - zeitliche Zusammenhänge Prozessbeschreibung - von wo nach wo wie viele Erdstoffe	Baustelleneinrichtung / Umgebungsdaten - Zwischenlager, Deponie - Baustraßen - Hindernisse (Brücke, Flüsse, usw.)

Bild 3 Klassifizierung Simulationsquelldaten



Die grundlegenden Komponenten, auch Bausteine genannt, bestehen aus Modulen, Verbindungselementen, Ressourcen und Aktivitäten. Die zwei Basismodule im Erdbauprozessmodell sind „Erdabtrag“ und „Erdauftrag“, verknüpft durch ein Verbindungselement, z. B. eine Baustraße. Sowohl das Basismodul als auch das Verbindungselement können Aktivitäten und Ressourcen enthalten.

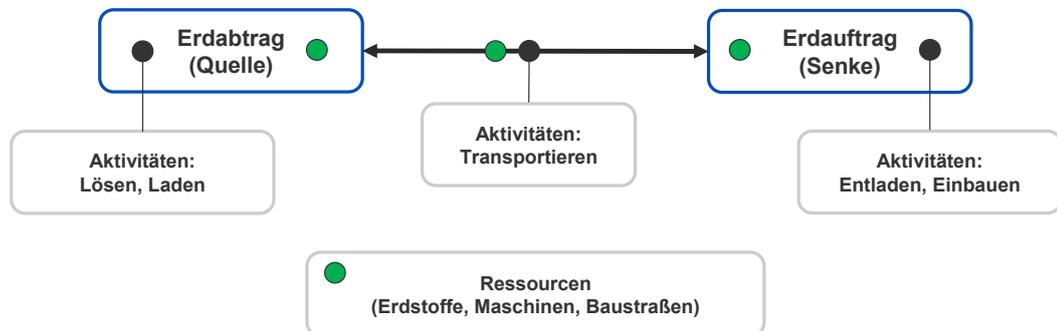


Bild 4 Prinzip ereignisgesteuerter Ablaufsimulation von Erdbauprozessen

Wie in Bild 4 zu sehen ist, gehören die Aktivitäten Lösen und Laden zum Modul „Erdabtrag“ und die Aktivitäten Entladen und Einbauen zum Modul „Erdauftrag“. Die Aktivität Transportieren bildet das Verbindungselement. Die Ressourcen werden im Simulationssystem in verschiedenen Kategorien verwaltet:

- Quantitäten, z. B. Volumen der Erdbewegung, Anzahl der LKWs, Kapazität der Lagerplätze und Fahrwege,
- Baustelleneinrichtungsobjekte, z. B. Zwischenlager und Deponie,
- Erdbaugeräte, z. B. Bagger, LKW, Dumper, Raupe und Walzen,
- Betriebsplanungsdaten, z. B. Zeitplan, Transportstrategie.

Mit Hilfe des ForBAU-Simulationsframeworks ist es möglich, die Abläufe auf Erdbaustellen frühzeitig und detailliert zu analysieren und verschiedene Varianten des Ressourceneinsatzes zu untersuchen. Die Simulationsergebnisse geben dem Erdbauplaner Auskunft darüber, wie viel Zeit der Erdtransport bei einem gegebenen Ressourceneinsatz in Anspruch nehmen wird [8].

3 Optimierung der Erdbewegung

Eine weitere Funktionalität des ForBAU-Simulationsframeworks ist die optimale Festlegung der Transportwege auf Basis des zentralen 3D-Modells, d. h. die Zuordnung von Einschnitts- zu Dammbereichen (Bild 5 oben). Diese Information ist eine wichtige Ausgangsinformation für die Simulation von Erdbauprozessen. Ziel ist es, Erdmaterial, das im Einschnittsbereich ausgehoben wird, in möglichst großem Umfang für den Einbau in Dammbereichen zu verwenden, um Zusatzkosten für den Einkauf fremder Erdmaterialien bzw. das Zwischenlagern bzw. Deponieren überflüssiger Erdstoffe zu minimieren. Die Zuordnung von Einschnitts- zu Dammbereichen sollte dabei so erfolgen, dass die zurückzulegenden Wege für die Transportmittel minimal sind. Aus dieser Aufgabenstellung ergibt sich ein klassisches Optimierungsproblem, das mit Hilfe eines gewichteten bipartiten Graphen beschrieben und mittels linearer Optimierungstechnik gelöst werden kann (Bild 5 links unten).

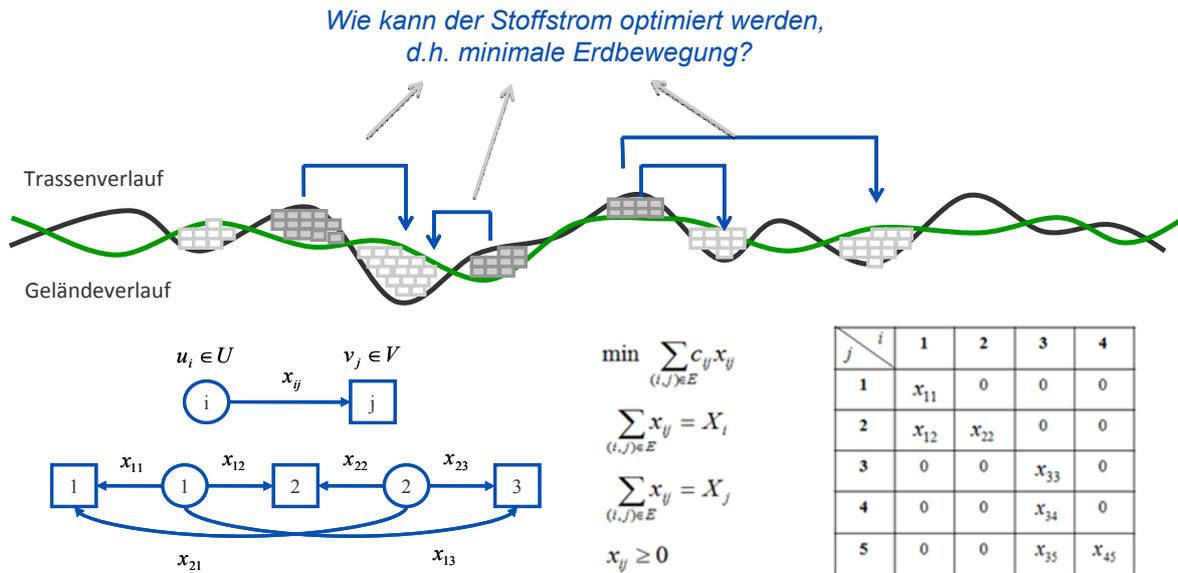
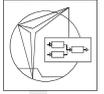


Bild 5 Mathematische Optimierung der gesamten Erdbewegung

Die Information zu Einschnitts- bzw. Dammbereichen, vor allem die Volumina, die Positionen und die Materialeigenschaften, wurden bereits vom *ForBAU Integrator* mit Hilfe des Voxelisierungsalgorithmus bestimmt. Die Position und die Größe sowie die Anzahl der Zwischenlager und Deponien werden vom Benutzer festgelegt. Aus Sicht der graphentheoretischen Modellierung unterscheiden sich Deponie und Dammbereich nicht, weil beide Elemente nur Materialfluss aufnehmen können, analog gilt das auch für Zwischenlager und Einschnittsbereich. Dabei ist zu beachten, dass der Begriff des Zwischenlagers hier nur im Sinne der Zwischenlagerung eingekaufter Erdstoffe zu verstehen ist.

Das als lineares Programm (LP) formulierte Optimierungsproblem lässt sich mit dem LP Solver GLPK [10] mit Rechenleistung eines Standard-PCs in einer akzeptablen Zeit exakt lösen. Die Lösung ist eine Matrix, deren Einträge die Volumina der zu transportierenden Erdstoffe zwischen jeweiligem Damm und Einschnitt sind (Bild 5 rechts unten).

4 Bidirektionales Kopplungskonzept

Eine bidirektionale Kopplung der Ablaufsimulation von Erdbauprozessen mit der Optimierung der Erdbewegung ist eine konzeptionelle Erweiterung des *ForBAU Simulationsframeworks* (Bild 6).

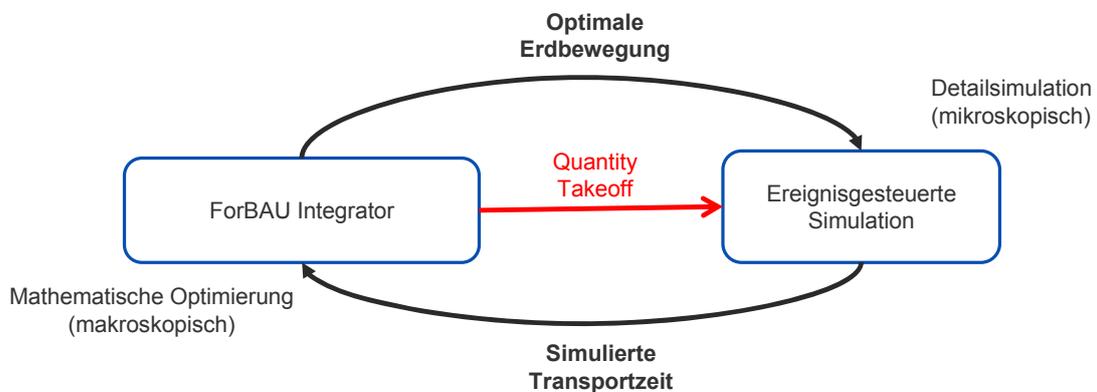


Bild 6 Bidirektionales Kopplungskonzept



Die ermittelten Mengen und die optimierten Transportwege werden über eine directionale Verbindung vom *ForBAU Integrator* in das Simulationssystem übergeben. Nach Ablauf der Simulation wird die ermittelte Transportzeit durch eine Rückkopplung wieder in den *ForBAU Integrator* eingespeist. Dieser führt eine erneute Optimierung der Transportwege durch, allerdings unter Berücksichtigung der neuen Transportzeiten als Kantengewichte. Der Vorteil einer bidirektionalen Kopplung besteht darin, dass die Dauer des Erdtransports iterativ optimiert wird. Wie es in Bild 7 veranschaulicht wird, werden im ersten Schritt die optimalen Transportwege für die Erdbewegung („von wo nach wo, wie viele Erdstoffe“) anhand der initialen Transportdauer $t^0_{i,j}$, die durch Division der Entfernung zwischen Damm i und Einschnitt j mit der Durchschnittsgeschwindigkeit der Transporter ermittelt wird, festgelegt. Die resultierte Transportmatrix $x^0_{i,j}$ wird in die Simulationsumgebung importiert. Im nächsten Schritt ergibt sich aus der Ablaufsimulation die entsprechende Transportdauer-Matrix („von wo nach wo in wie viel Zeit“) $t^1_{i,j}$, zwischen entsprechenden Einschnitt- und Dammbereichen, die wiederum als Eingangsparameter für die Optimierung der Erdbewegung importiert wird. Nun ist die erste Iteration zwischen Simulation und Optimierung abgeschlossen. Weitere Iterationen erfolgen automatisch durch die bidirektionale Kopplung solange, bis die Transportdauer $t^n_{i,j}$ konvergiert oder die vordefinierte Anzahl der Iterationsschritte erreicht wird. In Bild 7 werden die zwei Kopplungsparameter in Matrixform dargestellt – auf der rechten Seite die optimale Erdbewegung aus der Optimierung, auf der anderen Seite die entsprechende Transportdauer aus der Simulation.

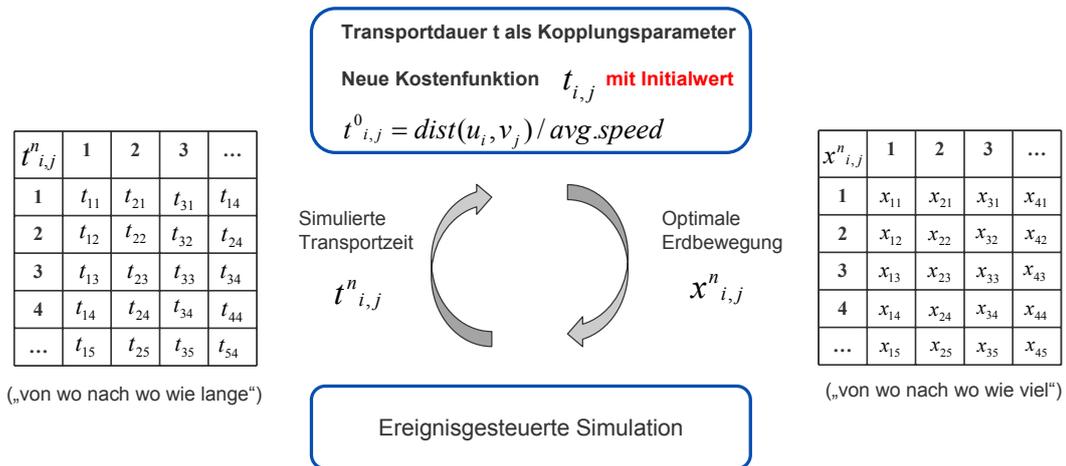


Bild 7 Spezifikation des Kopplungskonzepts

5 Testversuch und erste Ergebnisse

Das vorgestellte Kopplungskonzept wurde bereits als Softwareprototyp implementiert. Für den Testzweck wurden verschiedene Planungsdaten auf einer Demo-Straßenbaustelle erhoben. Das zentrale 3D-Modell wird im *ForBAU Integrator* erstellt. In Bild 8 sind die gesamte Transportdauer und die wichtigen Konfigurationsparameter dargestellt.

Dabei ist zu beachten, dass das Simulationsergebnis in diesem Testversuch nur eine Tendenz des Transportzeitverlaufs nach mehreren Iterationen zeigen kann. Der Ressourceneinsatz sowie die Rahmenbedingungen für den Erdbaubetrieb wurden stark vereinfacht, d. h. z. B. keine Störfaktoren, wie Wettereinfluss, Reparatur und Wartung der Maschinen, Pausen, Verkehrsbedingung usw. berücksichtigt. Auf Grund dieser Vereinfachung konvergiert die Transportzeit nach nur vier Schritten. Das zeigt einerseits, dass das bidirektionale Kopplungskonzept prinzipiell funktioniert, andererseits, dass weitere Untersuchungen mit verschiedenen Konfigurationsparametern durchgeführt werden müssen.

Länge der Strecke: 12 km
 Anzahl der Einschnitte: 16
 Anzahl der Dämme: 17
 Zwei Bauabschnitte (parallele Bearbeitung):
 Einschnitt 8 bis Damm 9
 Einschnitt 8 bis Einschnitt 16
 Anzahl der LKWs pro Abschnitt: 5
 Anzahl der Bagger pro Abschnitt: 2
 LKW-Geschwindigkeit im Durchschnitt: 20 km/h

Iteration	Transportzeit
1	5:13:08:41.783
2	5:13:07:57.310
3	5:13:07:56.610
4	5:13:07:56.610

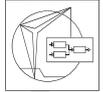


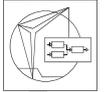
Bild 8 Simulationsparameter und erste Testergebnisse

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein bidirektionales Kopplungskonzept zwischen makroskopischer Optimierung und mikroskopischer Ablaufsimulation, basierend auf dem im Forschungsverbund ForBAU entwickelten Simulationsframework, vorgestellt. Ziel dieses Ansatzes ist, die Gesamtdauer von Erdbauprozessen und insbesondere die Transportzeit von Erdstoffen zu minimieren. Ein erster Testversuch mit Daten aus einem realen Straßenbauprojekt bestätigt, dass die gesamte Transportzeit iterativ minimiert werden kann und das Verfahren in wenigen Iterationsschritten konvergiert. In zukünftigen Arbeiten werden weitere Untersuchungen mit verschiedenen Konfigurationsparametern durchgeführt. Ein weiterer Schritt ist, die simulierte Transportzeit mit der gemessenen Transportdauer auf dieser Erdbaustelle zu vergleichen, um die Praxistauglichkeit des ForBAU-Simulationsframeworks zu evaluieren.

Literatur

- [1] H.-J. BARGSTÄDT, J. VOIGTMANN: Simulation von Baulogistikprozessen im Ausbau, ASIM-Fachtagung 2008, S. 131–140, 2008
- [2] A. BORRMANN, Y. JI, I.-C. WU, M. OBERGRIEBER, E. RANK, C. KLAUBERT, W. GÜNTNER: ForBAU – The virtual construction site project. In Proc. of the 26th CIB-W78 Conference on Managing IT in Construction. Istanbul, Turkey, October 2009.
- [3] R. CHAHROUR: Integration von CAD und Simulation auf Basis von Produktmodellen im Erdbau. Institut für Bauwirtschaft an der Universität Kassel (Hrsg.): Schriftenreihe Bauwirtschaft, S. I. Forschung. Kassel University Press, Kassel, 2007.
- [4] Y. JI, F. SEIPP, A. BORRMANN, S. RUZIKA, E. RANK: Mathematical Modeling of Earthwork Optimization Problems. In Proc. of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering 2010 (ICCCBE 2010), Nottingham, UK, Juli 2010.
- [5] Y. JI, A. BORRMANN, E. RANK, J. WIMMER, W. GÜNTNER: An Integrated 3D Simulation Framework for Earthwork Processes. In Proc. of the 26th CIB-W78 Conference on Managing IT in Construction. Istanbul, Turkey, October 2009.
- [6] M. KÖNIG, U. BEISSERT, H.-J. BARGSTÄDT: Ereignis-diskrete Simulation von Trockenbauarbeiten – Konzept, Implementierung und Anwendung. In: Tagungsband des 1. IBW-Workshops, Simulation in der Bauwirtschaft 13. September 2007, S. 15–28. Universität Kassel 2007
- [7] I.-C. WU, A. BORRMANN; E. RANK; U. BEIßER; M. KÖNIG: A Pattern-based Approach for Facilitating Schedule Generation and Cost Analysis in Bridge Construction Projects. In: Proc. Of the 26th CIB-w78 Conference on Managing IT in Construction; Istanbul, Turkey, 2009, pp. 93–100
- [8] J. WIMMER, Y. JI, T. HORENBURG, A. BORRMANN, W. GÜNTNER, E. RANK: Evaluation of the 3D Model-based Earthwork Process Simulation in Practice. In Proc. of the 14th ASIM-Conference Simulation in Production and Logistic (ASIM2010), Karlsruhe, Germany, October 2010, (to appear).
- [9] J. WIMMER, T. HORENBURG, W. A. GÜNTNER: Erstellung einer Simulationsbibliothek für den Tiefbau. In: Tagungsband des Simulationsworkshops an der Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, Deutschland, März, 2010.



Eine Modellierungsmethodik für Ausführungsterminpläne im Praxistest

Kurzfassung

An der Technischen Universität, am Fachgebiet Bauinformatik wurde eine Modellierungsmethodik entwickelt, die es erlaubt, aus der Zerlegung eines Bauwerks in Bauteile die Menge der Aktivitäten eines Bauprojektes abzuleiten. Für diesen Ansatz werden Prozessvorlagen genutzt, welche den Herstellungsprozess von Bauteilen mit Hilfe von Aktivitäts-Zustandsparen sowie deren Beziehungen untereinander beschreiben. Die durch die Zerlegung eines Bauwerks in seine Bauteile und die Zuordnung zu Prozessvorlagen gewonnenen Teilprozesse beinhalten alle zur Herstellung eines speziellen Bauteils notwendigen Aktivitäten und Zustände des Bauteils. Spezielle Zustände eines Bauteils bilden die Voraussetzung für Aktivitäten innerhalb von Teilprozessen anderer Bauteile. Diese zusätzlichen Voraussetzungen sind neben der Zerlegung des Bauwerks in Bauteile und der Zuordnung der Bauteile zu Prozessvorlagen der für die Modellierungsmethodik nötige Eingabeaufwand des Nutzers. In diesem Artikel wird die praktische Anwendung dieser Modellierungsmethodik an realen Bauprojekten gezeigt.

Einleitung

Die traditionell durchgeführte Terminplanung verlangt vom Bearbeiter die Eingabe einer Menge von Vorgängen, Dauern sowie Zeitpunkten bzw. Meilensteinen und die Spezifikation der Abhängigkeiten innerhalb der angegebenen Vorgänge und Meilensteine. Die Erfahrung des Terminplaners bestimmt dabei die Qualität des Terminplans. Er ist verantwortlich für die Ausarbeitung der Liste der Vorgänge. Auf Grund des hohen Spezifikationsaufwands werden üblicherweise nur ausgewählte Abhängigkeiten zwischen den Vorgängen angegeben. Im Ergebnis entsteht ein Terminplan, in dem die Vollständigkeit der Vorgänge nicht formal geprüft werden kann. Die Vollständigkeit der Abhängigkeiten ist nicht sichergestellt. Eine Prüfung des Terminplans wird per Inspektion vom Bearbeiter durchgeführt.

Aus dieser Arbeitsweise resultieren potenzielle Fehlerquellen. Diese potenziellen Fehlerquellen in einem Terminplan werden mit der Anwendung der am Fachgebiet Bauinformatik entwickelten Modellierungsmethodik reduziert [1]. Der hier vorgestellte Modellierungsansatz stellt, im Gegensatz zu anderen Forschungsvorhaben wie z. B. ForBau[2], in dem es um die Entwicklung und Vernetzung von Werkzeugen für die durchgängige modellgestützte Projektbearbeitung geht, Methoden zur Gestaltung von Prozessen bereit. Adressiert wird somit ein spezifisches Problem, das eine ganzheitliche IT-basierte Lösung ergänzt. Dieser Artikel zeigt die praktische Anwendung der Methodik. Die Methodik wurde pilothaft implementiert. Die Pilotimplementierung wurde in dem vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung geförderten Projekt „Einführung einer formalen Methode zur Entwicklung qualitativ hochwertiger Ausführungsterminpläne in die Baupraxis“ in realen Projekten eingesetzt. Die Erkenntnisse aus diesem Einsatz sind im vorliegenden Beitrag zusammengestellt.

Modellierungsmethodik

Die Modellierungsmethodik ist in ihren wesentlichen Bestandteilen im Folgenden kurz beschrieben, Detailliertere Ausführungen zur Methodik sind beispielsweise in [1], [3] und [4] veröffentlicht worden. Die Modellierungsmethodik stellt die Vollständigkeit, die Korrektheit und die Konsistenz eines Prozes-



ses auf der Grundlage der vom Nutzer spezifizierten Eingangsdaten sicher. Im Folgenden werden die für die Anwendung der Modellierungsmethodik notwendigen Arbeitsschritte erläutert.

Teilprozessvorlagen

Teilprozessvorlagen beschreiben den Herstellprozess von Bauteilen auf der Grundlage von Aktivitäts-Zustandspaaren und deren Relation zueinander. Teilprozessvorlagen können mehrfach projektspezifisch für verschiedene Bauteile verwendet werden.

Zerlegung des Bauwerks in Bauteile

Bauwerke werden in Bauteile zerlegt. Projektspezifisch ist eine geeignete Detaillierung zu wählen. Die Zerlegung des Bauwerks in Bauteile hat großen Einfluss auf die Detaillierung des Gesamtprozesses, da die Aktivitäten auf Basis der Herstellprozesse der Bauteile generiert werden. So ist es beispielsweise möglich, alle aufgehenden Bauteile eines Geschosses in nur einem Bauteil zu modellieren oder jede Wand oder Stütze als einzelnes Bauteil zu spezifizieren. Diese unterschiedlichen Detaillierungen in der Zerlegung resultieren in sehr unterschiedlich umfangreichen Prozessen.

Strukturierung

Ein wichtiger Bestandteil der Modellierung ist die Strukturierung der Informationen. Zur Strukturierung dienen Bäume. Projektspezifische Strukturierungen basieren häufig auf der Struktur der jeweiligen baulichen Anlage, beispielsweise entsprechend der vertikalen und horizontalen Lage. Neben projektspezifischen Strukturierungen können auch Strukturierungen auf der Grundlage der DIN 276 [5] oder der Dynamischen Baudaten [6] genutzt werden.

Zuordnung von Prozessvorlagen zu Bauteilen

Durch die Zuordnung von projektunabhängigen Teilprozessvorlagen zu Bauteilen werden Teilprozesse generiert. Die in den Teilprozessvorlagen enthaltenen Aktivitätsvorlagen und Zustandsvorlagen werden für das zugeordnete Bauteil instanziiert. Der entstandene Teilprozess beinhaltet neben den Aktivitäts-Zustandspaaren die in den Teilprozessvorlagen enthaltenen Relationen zwischen diesen Paaren. Jeder durch die Zuordnung von Teilprozessvorlagen zu Bauteilen generierte Teilprozess ist unabhängig von allen anderen so erzeugten Teilprozessen. Ist die Menge der Bauteile eines Bauwerks vollständig und die Zuordnung zu den Teilprozessvorlagen erfolgt, so ist auch die Liste der erzeugten Aktivitäten und technologischen Abhängigkeiten vollständig.

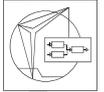
Spezifikation zusätzlicher Voraussetzungen

Das Ergebnis einer jeden generierten Aufgabe ist ein Bauteil in einem Zustand. Die technologischen Abhängigkeiten innerhalb des Herstellprozesses des gleichen Bauteils sind bereits durch die Instanziierung einer Teilprozessvorlage erzeugt worden. Zusätzliche technologische Abhängigkeiten zwischen Aufgaben an unterschiedlichen Bauteilen müssen vom Bearbeiter angegeben werden. Die Abhängigkeiten werden in der Form spezifiziert, dass Zustände eines Bauteils als Voraussetzung für die Ausführbarkeit einer Aufgabe an einem anderen Bauteil angegeben werden. Auf dieser Grundlage entsteht ein Gesamtprozess, welcher die Herstellung, den Umbau oder den Rückbau eines Bauwerks beschreibt. Dieses Grundgerüst kann in einen Terminplan exportiert werden.

Nacharbeiten am Terminplan

Der Bearbeiter hat den generierten Prozess zu vervollständigen. Dazu gehört die Angabe der Dauern der einzelnen Aufgaben, die Angabe des Projektstarts und eventueller anderer Meilensteine des Projekts. Ebenso können zusätzliche Abhängigkeiten, die z. B. aus beschränkt zur Verfügung stehenden Ressourcen resultieren angegeben werden.

Erstellung von Ausführungsterminplänen in der Baupraxis



Im Rahmen des Forschungsprojekts „Einführung einer formalen Methode zur Entwicklung qualitativ hochwertiger Ausführungsterminpläne in die Baupraxis“, gefördert vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, arbeiteten die BMC AG als Praxispartner und Mitarbeiter des Fachgebiets Bauinformatik der TU Berlin als wissenschaftlicher Partner zwischen Februar 2008 und Januar 2010 gemeinsam an realen Bauprojekten. In der ersten Projektphase wurden Bauprojekte von beiden Beteiligten parallel, von den Mitarbeitern der BMC AG nach traditioneller Herangehensweise und von Mitarbeitern der TU Berlin mit Hilfe der in diesem Artikel beschriebenen Modellierungsmethodik bearbeitet. In der zweiten Projektphase bearbeitete der Praxispartner seine Bauprojekte ausschließlich mit der Modellierungsmethodik.

Am Fachgebiet Bauinformatik wurde eine Pilotimplementierung „Construction“ für die hier beschriebene Modellierungsmethodik entwickelt und im Forschungsprojekt von beiden Partnern eingesetzt.

Terminplanung für das Elektrogewerk in einer Tiefgarage

Das erste gemeinsam bearbeitete Bauprojekt umfasste die Erstellung eines Bauablaufplans zum Zwecke der Beschleunigung des Bauvorhabens. Das Projekt umfasste vier verschiedene Turmbauwerke und eine darunter liegende fünfgeschossige Tiefgarage, welche in Bild 1 schematisch dargestellt sind.

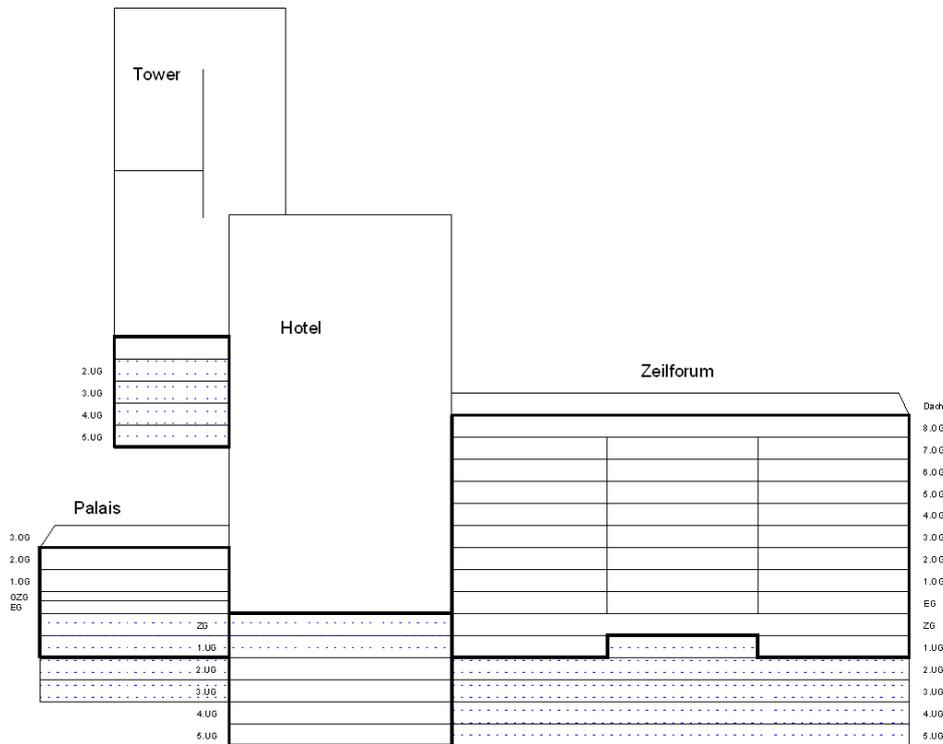


Bild 1 Schematische Darstellung des ersten gemeinsam bearbeiteten Bauvorhabens

Die BMC AG wurde mit der Erstellung eines Terminplans für das Elektrogewerk beauftragt. Beide Teams, Mitarbeiter der BMC AG und Mitarbeiter der TU Berlin, wurden vom Auftraggeber mit den gleichen Informationen versorgt.

Die beiden Teams bearbeiteten gleichzeitig die Aufgabe der Erstellung eines Ausführungsterminplans. Das Team der TU Berlin nutzte die Pilotimplementierung „Construction“, das Team der BMC AG erarbeitete den Terminplan mit traditionellen Mitteln.



Beide Partner begannen die Bearbeitung der Aufgabe gemeinsam mit Überlegungen zur Strukturierung des Projekts. Schnell stellte sich heraus, dass die bereits in den Grobterminplänen des Auftraggebers genutzte Strukturierung, einmal horizontal und einmal vertikal auch von den Projektpartnern genutzt werden musste, um gegenüber dem Auftraggeber vergleichbare Ergebnisse liefern zu können.

Das Team der TU Berlin begann mit der Einarbeitung der Strukturierung in die Pilotimplementierung und verfeinerte diese, um die parallel zu diesem Arbeitsschritt bereits geplante Zerlegung des Bauwerks in Bauteile ausreichend detailliert strukturieren zu können. In Bild 2 ist ein Auszug der Strukturierung des Projektes gezeigt.

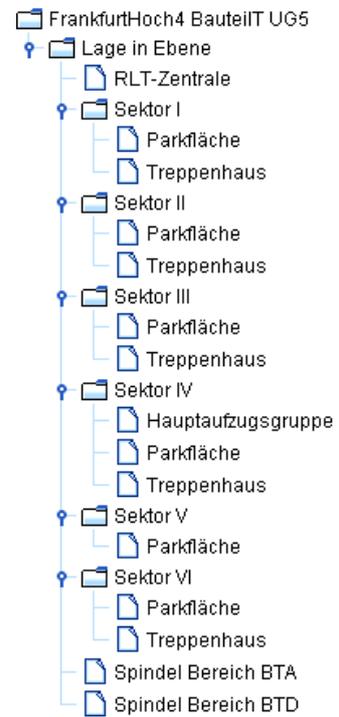


Bild 2 Horizontale Strukturierung des Projekts

Die Zerlegung des Bauwerks in Bauteile wurde in einem zweiten Arbeitsschritt ebenfalls in Construction eingegeben. Die Anzahl der Bauteile allein für das Elektrogewerk und seine angrenzenden Bauteile summierte sich in einem ersten Versuch auf über 1000. Das Team der TU Berlin musste nach diesem Bearbeitungsschritt feststellen, dass diese detaillierte Bauwerkszerlegung nicht zielführend sein wird. Die Bauwerkszerlegung wurde wiederholt. Zur Reduzierung der Anzahl der Bauteile wurden Systeme gebildet, z. B. für Lautsprecheranlagen, Brandmeldeanlagen usw.

Der nächste Schritt der Bearbeitung wurde in Zusammenarbeit mit dem Partner BMC AG vorbereitet. Für die angelegten Systeme mussten die Herstellprozesse modelliert werden. Dieser Arbeitsschritt erfolgte in enger Abstimmung mit den für das Elektrogewerk zuständigen Personen. Die erarbeiteten Herstellprozesse wurden in Construction modelliert. In Bild 3 sind die Zustände eines dieser Herstellprozesse gezeigt. Zum Erreichen eines jeden Zustands ist eine Aktivität erforderlich, die im Ergebnis zum jeweiligen Zustand führt. In Bild 4 sind die Paare von Aktivität und Zustand dargestellt.

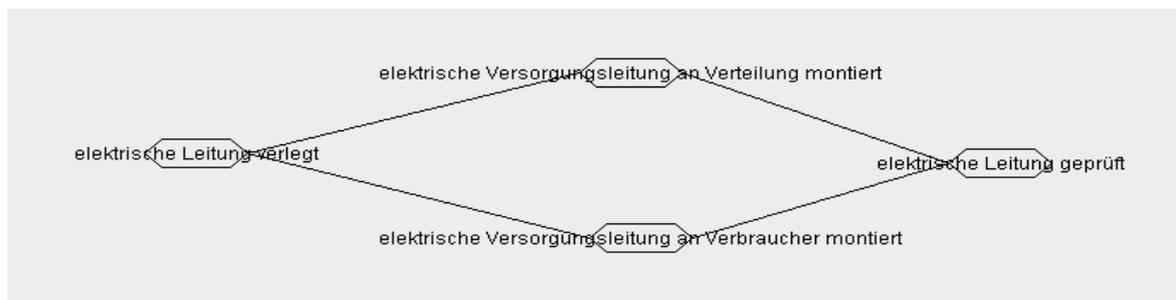
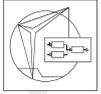


Bild 3 Zustände im Herstellprozess einer elektrischen Leitung



Aktivität	Zustand
elektrische Leitung an Verbraucher anschließen	elektrische Leitung an Verbraucher angeschlossen
elektrische Leitung an Versorger anschließen	elektrische Leitung an Versorger angeschlossen
elektrische Leitung prüfen	elektrische Leitung geprüft
elektrische Leitung verlegen	elektrische Leitung verlegt

Bild 4 Aktivitäten und Zustände im Herstellprozess einer elektrischen Leitung

Die Herstellprozesse wurden den entsprechenden Bauteilsystemen zugeordnet. Als Ergebnis dieses Arbeitsschrittes entstand bereits die Liste aller für das Elektrogewerk nötigen Aufgaben inklusive der Abhängigkeiten der Aufgaben, die an einem Bauteil während des Herstellprozesses ausgeführt werden müssen.

Im letzten Schritt der Bearbeitung wurden die zusätzlichen Voraussetzungen zwischen Zuständen und Aufgaben verschiedener Bauteile in Construction angegeben. Dies ist ein wesentlicher Arbeitsschritt, der in anderer Vorgehensweise auch in der klassischen Herangehensweise auf der Basis von Vorgängen z. B. in der Terminplanungssoftware MS Project® ausgeführt wird. Die Erarbeitung dieser zusätzlichen Voraussetzungen wird aber durch die Möglichkeiten der Modellierungsmethodik durch den bauteilbasierten Ansatz und die vielfältigen Strukturierungsmöglichkeiten wesentlich vereinfacht. Ebenso ist die Fehleranfälligkeit dieses Arbeitsschrittes durch verschiedene Randbedingungen, wie beispielsweise die Visualisierung der zeitlichen Abhängigkeiten, oder die durch die Pilotimplementierung automatisch geprüfte Zyklensfreiheit erheblich reduziert.

Vergleich der Ergebnisse

Drei Kriterien wurden für den Vergleich der Ergebnisse herangezogen:

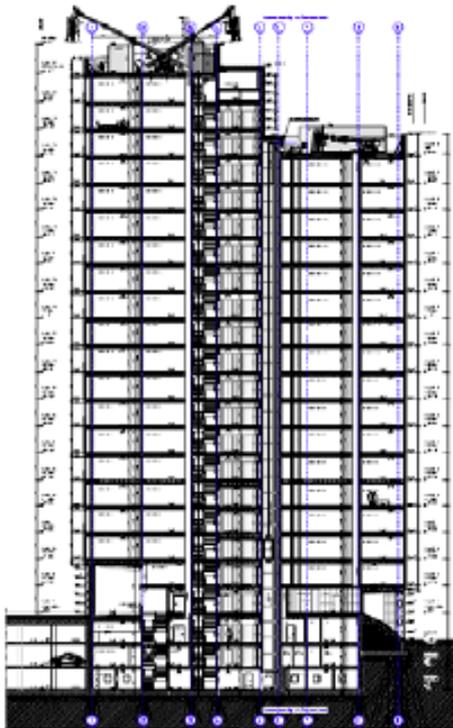
- der Aufwand der Bearbeitung,
- die Korrektheit der Ergebnisse und
- die Detaillierung des Terminplans.

Auf der Seite des Teams der TU Berlin war in dieser frühen Projektphase ein relativ hoher Aufwand für die Erstellung von Teilprozessvorlagen nötig. Dazu gehören zum einen die korrekte Erarbeitung von Herstellprozessen für teilweise sehr spezielle Bauteile und zum anderen der einmalige Aufwand der Eingabe in die Pilotimplementierung Construction. Dem gegenüber steht die unternehmensweite Verfügbarkeit der Herstellprozesse von Bauteilen nach der einmaligen Modellierung. Die Nutzung dieser Herstellprozesse in verschiedenen Projekten reduziert den Arbeitsaufwand. Für die reine Projektbearbeitung ergaben sich keine wesentlichen Aufwandsunterschiede zwischen den beiden Bearbeitungsteams.

Im Ergebnis entstand beim Team der TU Berlin ein vollständig verknüpfter Terminplan mit mehr als 1500 Aufgaben, allein für die Arbeiten des Elektrogewerks und angrenzender Bauteile im fünften Untergeschoss der Tiefgarage, im Gegensatz zum weniger detailliert und geringer verknüpften Terminplan der BMC AG. Während dieses Bauprojekts – dem ersten real bearbeiteten Bauvorhaben für das Team der TU Berlin innerhalb des Forschungsvorhabens – war ein Lernprozess im Umgang mit Construction nötig. Als Ergebnis dieses Lernprozesses konnte u. A. herausgestellt werden, dass großer Wert auf die wegen des Bearbeitungsaufwandes nötige Detaillierung und die saubere Strukturierung gelegt werden sollte.

Ausführungsterminplan für Rohbauerstellung

Ein weiteres von beiden Partnern parallel bearbeitetes Projekt umfasste die Erstellung eines Ausführungsterminplans für die Rohbauarbeiten eines Wohnhauses in Hamburg. Ein Schnitt ist in Bild 5 dargestellt. Wie im vorhergehenden Projekt des Forschungsvorhabens auch, standen beiden Teams die gleichen Informationen des Auftraggebers zur Verfügung.



Das Vorgehen des Teams der TU Berlin bei der Bearbeitung der Aufgabe unter Verwendung der Modellierungsmethodik entsprach der Bearbeitung des ersten Projekts und folgte wiederum den strukturierten Vorgaben der Modellierungsmethodik.

Die Strukturierung des Projekts bildete die Grundlage der Bearbeitung. Diese lehnte sich wiederum eng an die bereits in den Grobterminplänen des Auftraggebers vorhandenen horizontalen und vertikalen Strukturierungen an, wurde aber vom Team der TU Berlin verfeinert, um der höheren Detaillierung des entstehenden Terminplans gerecht zu werden.

Bild 5 Schnitt des Rohbaus in Hamburg

Bei der Zerlegung des Bauwerks in seine Bauteile konnte von der Bearbeitung des ersten Projekts profitiert werden. Für das 20-geschossige Bauwerk mit weitestgehend gleichen Grundrissen in den Geschossen wurden wiederum Systeme entwickelt. Diese Systeme umfassten z. B. die gesamten Wände eines Herstellverfahrens eines Strukturierungsabschnitts oder die gesamten Mauerwerkschächte eines Strukturierungsabschnittes. So wurden etwa 270 Bauteile definiert.

Bei der Zuordnung der Bauteile zu den jeweiligen Herstellprozessen konnte das Team der TU Berlin bereits in diesem Projekt von in der Pilotimplementierung Construction spezifizierten Herstellprozessen aus früheren Arbeiten profitieren.

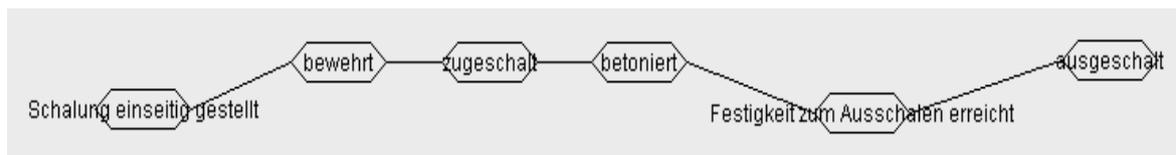


Bild 6 Zustände im Herstellprozess einer Stahlbetonwand in Ortbetonausführung

Aktivität	Zustand
Schalung einseitig stellen	Schalung einseitig gestellt
ausschalen	ausgeschalt
betonieren	betoniert
bewehren	bewehrt
warten	Festigkeit zum Ausschalen erreicht
zuschalen	zugeschalt

Bild 7 Aktivitäten und Zustände im Herstellprozess einer Stahlbetonwand in Ortbetonausführung

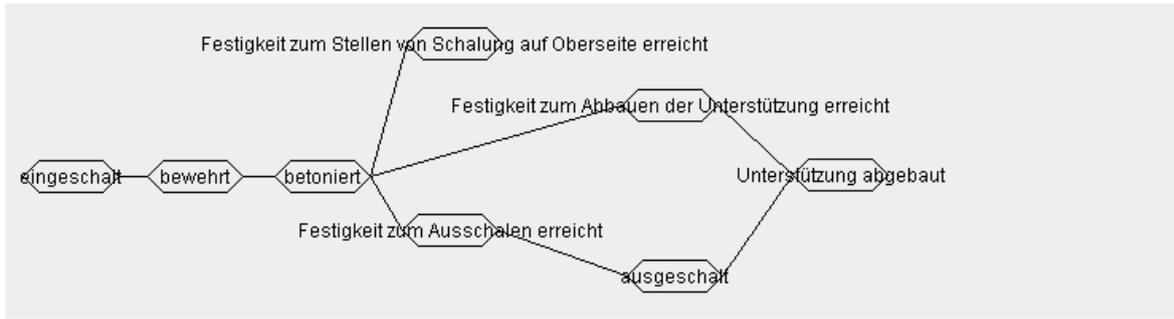
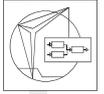


Bild 8 Zustände im Herstellprozess einer Stahlbetondecke in Ortbetonausführung

Aktivität	Zustand
Unterstützung abbauen	Unterstützung abgebaut
ausschalen	ausgeschalt
betonieren	betoniert
bewehren	bewehrt
einschalen	eingeschalt
warten	Festigkeit zum Stellen von Schalung auf Oberseite erreicht
warten	Festigkeit zum Ausschalen erreicht
warten	Festigkeit zum Abbauen der Unterstuetzung erreicht

Bild 9 Aktivitäten und Zustände im Herstellprozess einer Stahlbetondecke in Ortbetonausführung

Bei der Zuordnung der Bauteile zu den jeweiligen Herstellprozessen wurden beispielsweise die in Bild 6 bis Bild 9 gezeigten Herstellprozesse verwendet, um eine vollständige Liste aller für die Errichtung des Rohbaus notwendigen Aufgaben und der zwischen den Aufgaben zur Herstellung eines Bauteils vorhandenen technologischen Abhängigkeiten zu generieren.

Die Spezifikation der zusätzlichen Abhängigkeiten zwischen Aufgaben zur Herstellung von Bauteilen und Zuständen anderer Bauteile als Voraussetzung zum Beginn dieser Aufgaben bildet den nächsten Bearbeitungsschritt des Teams der TU Berlin. Die durch den bauteilbasierten Ansatz der Modellierungsmethodik bereits geringe Fehleranfälligkeit und Vollständigkeit der Angabe wurde durch die Kontrollmöglichkeit der ebenfalls im Rahmen dieses Projekts genutzten Möglichkeit der 4D-Visualisierung weiter erhöht.

Den Abschluss der Bearbeitung des Projekt durch die Mitarbeiter der TU Berlin bildete die Mengenermittlung für dieses Bauvorhaben. Mit Hilfe dieser Daten und den entsprechenden Aufwandswerten konnte für jede der generierten Aktivitäten eine Dauer ermittelt werden und in Construction den jeweiligen Aktivitäten zugeordnet werden.



Erarbeitung einer 4D-Animation

Parallel zur Erarbeitung des Terminplans wurde auf demselben Datenmodell eine dreidimensionale Geometrie für die Bauteile erstellt. In Bild 10 ist das 3D-Modell gezeigt.

Mit Hilfe dieser Visualisierung konnte die Erarbeitung der zusätzlichen Voraussetzungen wesentlich vereinfacht werden. Es konnte parallel zur Eingabe der zusätzlichen Voraussetzungen die Richtigkeit, aber vor allen Dingen die Vollständigkeit der zusätzlichen Abhängigkeiten durch die Visualisierung kontrolliert werden. Die Visualisierung bietet vielfältige Möglichkeiten der Darstellung, beispielsweise die Illustration des Bauablaufs unter dem Aspekt der Gewerke welche die Bauteile im Bauablauf bearbeiten.

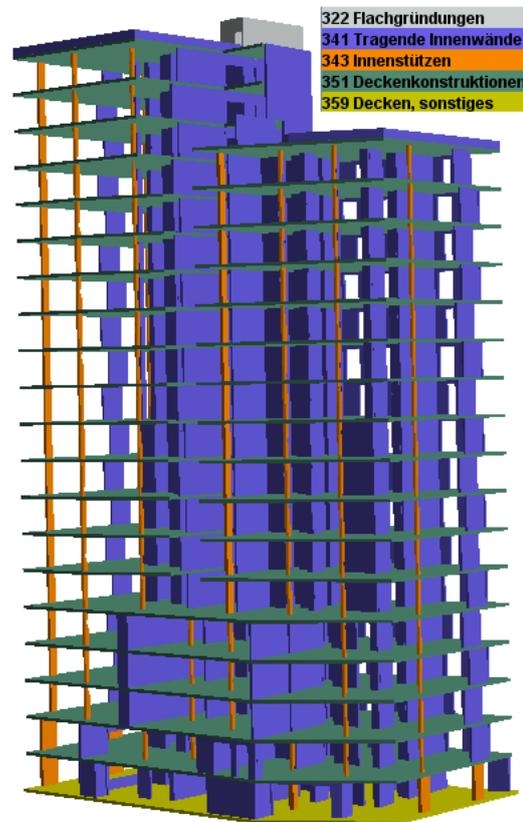


Bild 10 3D-Modell

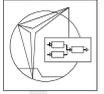
Vergleich der Ergebnisse

Beide Teams erarbeiteten, wie es die Aufgabenstellung verlangte, inhaltlich vergleichbare Terminpläne inklusive der Dauern aller Aufgaben. In dieser Projektphase konnte das Team der TU Berlin bereits von der Verwendung der vorhandenen Teilprozessvorlagen profitieren. Dieser Umstand verhalf zu einer vergleichbaren Bearbeitungszeit des Projekts. Der Terminplan der TU Berlin umfasst im Gegensatz zu dem der BMC AG doppelt so viele Aufgaben und Verknüpfungen, was bereits einen Mehrwert in Bezug auf die Detaillierung im Terminplan darstellt. Im Zuge der Bearbeitung wurde parallel zur Erstellung des Terminplans ein 3D-Modell des zu errichtenden Bauwerks modelliert, mit dessen Hilfe eine 4D-Visualisierung möglich wurde. Diese wurde vom Team der TU Berlin primär zur Kontrolle der unterschiedlichen Elemente der Modellierungsmethodik, z. B. der Vollständigkeit der Zerlegung des Bauwerks in seine Bauteile und der zusätzlichen Abhängigkeiten, genutzt.

Zusammenfassung

Dieses Projekt zeigte den Beteiligten deutlich den Mehrwert der Anwendung der Modellierungsmethode. In vergleichbarer Zeit können Terminpläne mit einer vollständigen Liste der Aufgaben erarbeitet werden. Es kann sichergestellt werden, dass die technologischen Abhängigkeiten des Terminplans korrekt sind. Die mit der Modellierungsmethodik erstellten Terminpläne besitzen in der Regel einen deutlich höheren Detaillierungsgrad im Vergleich zur Traditionellen Art der Erstellung. Ein weiterer Mehrwert wird durch die unternehmensweite Nutzbarkeit einmal angelegter Herstellprozesse generiert.

Durch den bauteilbasierten Ansatz der Modellierungsmethodik ist es – mit vergleichsweise geringem Aufwand auf dem gleichen Datenmodell – möglich, eine 4D-Animation zu nutzen.



Der Praxispartner, die BMC AG, äußerte sich durchgehend positiv zum vorgestellten Ansatz. Die strukturierte Arbeitsweise, die korrekten Ergebnisse und natürlich die unter wirtschaftlichem Gesichtspunkt mögliche Anwendbarkeit der Methodik stellte die BMC AG als positive Aspekte heraus. Darüber hinaus wurde von den Vertretern der BMC AG die direkte Anbindung an eine 4D-Animation, die mit relativ geringem Aufwand möglich ist, ausgesprochen positiv angesehen, da hierdurch komplexe Abläufe anschaulich werden.

Ausblick

Schon in der letzten Phase des hier beschriebenen Projekts konnte ein weiterführendes Forschungsprojekt für die noch anstehenden Herausforderungen akquiriert werden. Weitere Arbeiten werden die Verwaltung von Versionen, die automatische Bestimmung der Auswirkungen von Änderungen, die integrierte Modellierung von Planung und Ausführung sowie die Anbindung des Systems an einen Projektarbeitsraum sein. Diese technischen Belange werden noch ergänzt um die Entwicklung von Vorlagen für die Bearbeitung von Planungsunterlagen.

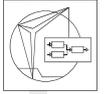
Das Forschungsprojekt „IT für Bauprozesse: IT-gestützte Methoden für die Gestaltung von Planung und Ausführung“ bietet die Rahmenbedingen um die genannten Aufgabenstellungen erfolgreich umzusetzen. Dieses Vorhaben wird durch die TSB Technologiestiftung Berlin aus Mitteln des Zukunftsfonds des Landes Berlin gefördert, kofinanziert von der Europäischen Union – Europäischer Fonds für Regionale Entwicklung. Investition in Ihre Zukunft!

Danksagung

Die Ergebnisse die in diesem Beitrag veröffentlicht werden, wurden im Rahmen des Forschungsprojektes „Einführung einer formalen Methode zur Entwicklung qualitativ hochwertiger Ausführungsterminpläne in die Baupraxis“ zusammen mit dem Praxispartner BMC Baumanagement & Controlling AG, Berlin erarbeitet. Das Vorhaben wurde gefördert vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. (Förderkennzeichen: 03WWBE003)

Literatur

- [1] HUHNT, W., ENGE, F. (2006) Can algorithms support the specification of construction schedules?, ITcon Vol. 11, Special Issue Process Modelling, Process Management and Collaboration, pg. 547–564, <http://www.itcon.org/2006/39>
- [2] ForBAU Forschungsverbund „Virtuelle Baustelle“, <http://www.fml.mw.tum.de/forbau/> letzter Zugriff 21. 04. 2010
- [3] HUHNT, W., LAWRENCE, J. (2004). “Methodik zur Modellierung konsistenter Soll-Vorgaben für komplexe Planungsprozesse im Bauwesen.“Bauingenieur, Band 79, pp. 50–56.
- [4] HUHNT, W. (2009). Process Modelling in Civil Engineering. Structural Engineering International 1/2009: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 91–101.
- [5] DIN 276-1: Kosten im Hochbau – Teil 1: Hochbau. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, 2008.



Simulation bauleistungslogistischer Prozesse – Berücksichtigung räumlicher Aspekte, Teil 1

Hintergrund

Die Simulation von Bauproduktionsprozessen ist in jüngster Zeit zunehmend Gegenstand baubetrieblicher Forschungsaktivitäten. Aktuelle Forschungsvorhaben bzw. -verbände, z. B. Mefisto oder ForBAU, befassen sich dabei u. a. mit der Identifizierung kritischer Prozesse auf Baustellen.

Insbesondere Ausbaurbeiten und die zugehörigen unterstützenden Bauleistungslogistikprozesse unterliegen einer hohen zeitlichen, räumlichen und typspezifischen Variabilität [1]. Die damit vorhandene Vielzahl von Gestaltungsmöglichkeiten des Gesamtsystems Baustelle sowie die enge Verzahnung von Bau- und Logistikprozessen widersprechen jedoch der Forderung nach einfachen Simulationsmodellen. Eine schnelle und sichere Identifizierung und Beseitigung von Engpässen im Bauablauf wird mit steigendem Komplexitätsgrad erschwert. Zur Reduzierung des Modellierungs- und Simulationsaufwands ist eine Beschränkung der zu betrachtenden Prozesse wünschenswert. Im Hinblick auf das Gesamtsystem Baustelle muss daher der grundsätzliche Einfluss verschiedener logistischer Tätigkeiten und Randbedingungen auf den Gesamtbauablauf hinterfragt werden.

Der vorliegende Beitrag untersucht exemplarisch den Einfluss räumlicher Aspekte, insbesondere die Zuordnung der Arbeitsbereiche auf den simulierten Gesamtbauprozess.

Simulationsmodell

Das Simulationsmodell verfolgt den zur Untersuchung von Ausbaustrategien entwickelten Constraint-basierten Ansatz von KÖNIG et al. [2], [3]. Es verwendet den Simulation Toolkit Shipbuilding (STS Schiffsbaukasten) [4] und wurde mit dem Simulationsprogramm Plant Simulation [5] umgesetzt. Zur detaillierten Untersuchung logistischer Prozesse wurde das Modell um entsprechende Funktionalitäten erweitert [6] und weist hinsichtlich der berücksichtigten Logistikaspekte einen hohen Detaillierungsgrad auf (Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht über berücksichtigte Aspekte zur Gestaltung einer Logistikstrategie (Auszug)

Logistischer Aspekt	Beschreibung
Untergliederung logistischer Prozesse	Unterteilung logistischer Prozesse in Entladen, Einlagern, Umräumen, Aufräumen, Wege (zwischen Arbeitsorten), Material holen und bringen
Berücksichtigung von Zuständigkeiten	Logistische Prozesse können unterschiedlichen Personengruppen (Baubausführende/Logistiker) zugeordnet werden.
mögliche Priorisierung logistischer Prozesse	Bestimmte logistische Prozesse können bevorzugt werden.
Unterscheidung nach Gewerken	Jedem Gewerk ist eine eigene Logistikstrategie zuzuordnen.
Beachtung logistischer Prozess- und Materialeigenschaften	Attribute werden beachtet, wie z. B. Lieferumfänge, Stapelbarkeit der Materialien, notwendiger Arbeitsplatzbedarf



Damit ermöglicht das Simulationsmodell die Auswahl einer geeigneten Logistikstrategie ebenso wie die Analyse der damit verbundenen Personalauslastung. Weitere mögliche Einsatzbereiche sind u. a. die Planung und Dimensionierung der Baustelleneinrichtung, das Erzeugen von Lieferterminplänen und die Lagerflächenplanung.

Alle für die Berücksichtigung baulogistischer Belange notwendigen Routinen sind in einem eigenen Modellbaustein 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. Die Zusammenarbeit zwischen den Bausteinen ist exemplarisch am Beispiel der Erzeugung von Umlageraufträgen in Bild 1 dargestellt.

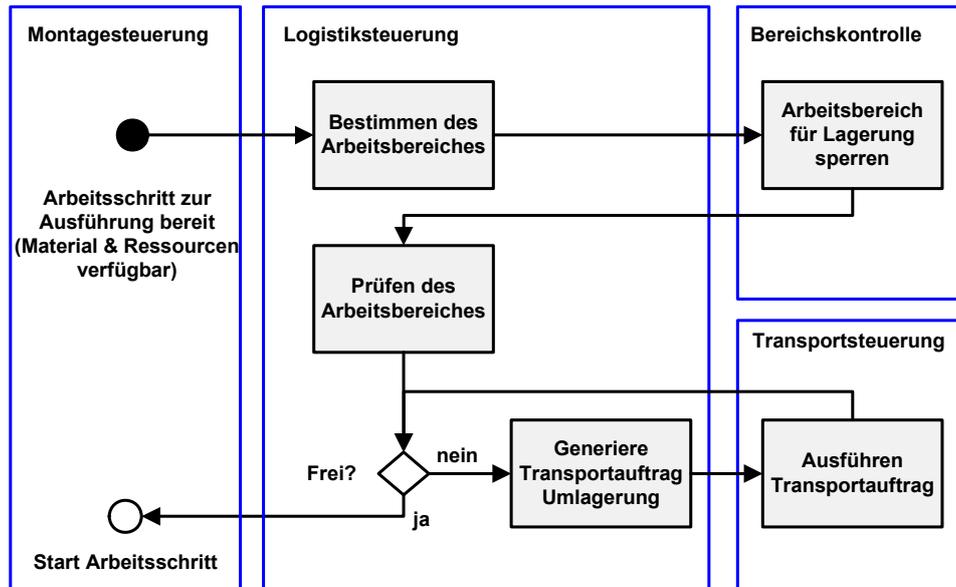


Bild 1 Schematische Darstellung der Interaktion des Baulogistik-Bausteins mit weiteren STS-Bausteinen zur Erzeugung von Umlageraufträgen

Ist ein Arbeitsschritt zur Ausführung bereit, wird unmittelbar vor Ausführungsbeginn der notwendige Arbeitsbereich ermittelt und für weitere Lagervorgänge gesperrt. Befinden sich innerhalb des Bereichs gelagerten Materialien anderer Arbeitsschritte, wird durch die Logistiksteuerung in Abhängigkeit der gewählten Strategie ein neuer Lagerplatz gesucht und ein entsprechender Transportauftrag an die Transportsteuerung übergeben. Erst wenn alle im Arbeitsbereich befindlichen Materialien umgelagert sind, wird der Arbeitsschritt gestartet, d. h. das Personal wird angefordert. Bei Überlappung eines Sperrbereichs und des aktuell betrachteten Arbeitsbereichs wird der Arbeitsschritt bis zur Aufhebung des Sperrbereichs verzögert. Die Überlappung zweier Arbeitsbereiche hat hingegen keine Auswirkungen auf den Start eines Arbeitsschrittes, da beide Arbeitsbereiche komplett zugänglich sind. Zulässige und unzulässige Flächenüberschneidungen sind in Bild 2 zusammengefasst.

Die Größe der Überlappungsbereiche hat dabei keinen Einfluss auf die Zulässigkeit. Eine weitere Modellkonvention besagt, dass die Produktivität des Arbeitsschrittes bei vorhandener zulässiger Bereichsüberlappung nicht beeinflusst wird. Die Größe der Arbeitsbereiche wirkt sich im Ergebnis nur auf die Anzahl der gegebenenfalls notwendigen Umlagerungen aus.

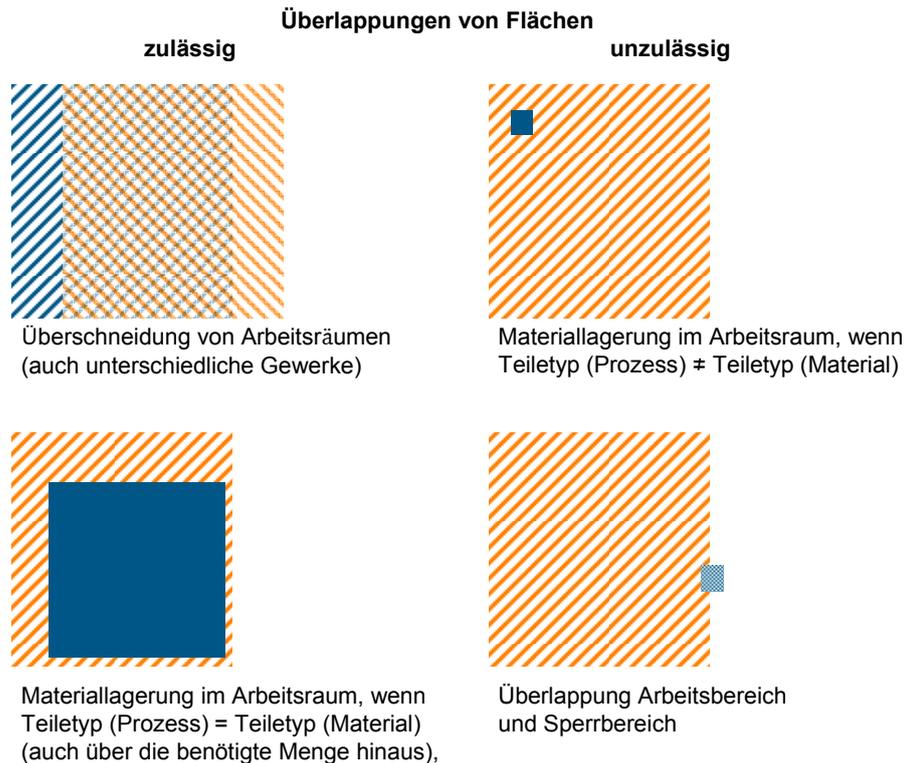
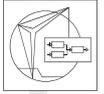


Bild 2 Darstellung zulässiger und unzulässiger Flächenüberlappungen

Experimente und Auswertung

Zur Untersuchung des Einflusses der Arbeitsbereiche werden Ausbauprozesse in einem achtstöckigen Bürogebäude simuliert und die verschiedenen Zeitanteile sowie die Gesamtbauzeit protokolliert. Die simulierte Bauaufgabe umfasst zwei fiktive Tätigkeiten A und B, die in beliebiger Reihenfolge erbracht werden können. Beide Tätigkeiten werden an einem Arbeitsgegenstand unter Verwendung jeweils notwendiger Materialien ausgeführt. Insgesamt sind in 16 aufeinander folgenden Bauabschnitten über 10.000 einzelne Arbeitsschritte zu erbringen. Die Ausführungsreihenfolge innerhalb der Bauabschnitte ist dabei nicht festgeschrieben. Folgende Logistikstrategien wurden miteinander kombiniert:

- Lieferstrategie: komplette Anlieferung zu Beginn des Bauvorhabens; Material für Arbeitsschritt A wird vor Material für Arbeitsschritt B angeliefert
- Lagerstrategie: arbeitsplatznahe Lagerung; falls belegt, dann weitere Einlagerung in einem Zentrallager
- Umlagerstrategie: innerhalb der Etage in verschiedene Lager
- Entsorgungsstrategie: Entsorgung nur bei Bedarf
- Erbringung logistischer Prozesse: ausschließlich durch eigenes Personal
- Bündelung von Transporten: keine

Zur Beurteilung des Einflusses der Größe von Arbeitsbereichen auf die Bauzeit werden drei Simulationsexperimente mit jeweils unterschiedlich großen Arbeitsbereichen durchgeführt. Die Größe der Arbeitsbereiche und Zuordnung zu den Prozessen ist Tabelle 2 zu entnehmen.



Tabelle 2: Gewählte Arbeitsbereichsgrößen in den Experimenten

	Tätigkeit A	Tätigkeit B
Experiment 1	2 x 2 m	1 x 1 m
Experiment 2	1 x 1 m	1 x 1 m
Experiment 3	0,5 x 0,5 m	1 x 1 m

Bei der gewählten Lagerstrategie wird der Materiallagerplatz danach bestimmt, welche Materialien für den jeweiligen Arbeitsgegenstand in dem auszuführenden Arbeitsschritt benötigt werden. Der für Materiallagerungen zulässige Bereich schließt sich an den jeweiligen Arbeitsbereich an, d. h. es wird nicht direkt im eigentlichen Arbeitsbereich gelagert. Möglich ist jedoch, dass der Materiallagerbereich in den Arbeitsbereich eines anderen, zum Zeitpunkt der Materiallagerung noch nicht begonnenen Arbeitsschritts fällt. Da der detaillierte Bauablauf und die Reihenfolge der zwei auszuführenden Arbeitsschritte nicht festgeschrieben sind, ist das Einlagern von Material in den Arbeitsbereich des jeweils anderen Arbeitsschritts möglich. Werden die Materialien des Prozesses mit dem kleineren Arbeitsbereich zuerst geliefert, der Prozess mit dem höheren Platzbedarf jedoch zuerst aufgeführt, werden Umlagerprozesse notwendig. Bei der Lagerplatzbestimmung wird immer nur der am Material auszuführende Prozess und dessen Platzbedarf berücksichtigt, nicht aber der Platzbedarf anderer Prozesse.

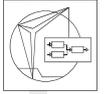
Bestehen hinsichtlich der Abfolge von Arbeitsschritten keine Restriktionen, ist die Ausführungsreihenfolge frei. De facto sucht sich ein Programm dann eine eigene Abfolge. Häufig ist das z. B. ganz einfach die Reihenfolge der Eintragungen in den verschiedenen Eingangstabellen. Für das simulierte Bauvorhaben erfolgt die Materiallieferung für Tätigkeit A vor der Lieferung des Materials B. Gleichzeitig wird Arbeitsschritt B vor Schritt A ausgeführt. Ist nun der Arbeitsbereich A kleiner als der für Tätigkeit B notwendige Platzbedarf (hier im Experiment 3), werden zusätzliche Umlagerungen erforderlich. Dieser Umstand ist in den erfassten Zeitanteilen aller drei Experimente ersichtlich (Tabelle 3).

Tabelle 3: Stundenaufwand für verschiedene Zeitanteile

	Experiment 1	Experiment 2	Experiment 3
Gesamtbauzeit	478,8	479,4	493,4
Montieren	395,2	395,2	395,2
Wege	24,9	24,3	25,2
Materialtransport	25,5	27,5	36,6
Entladen	6,9	7,2	6,6
Einlagern	11,5	11,1	11,0
Umräumen	5,5	5,8	9,5
Aufräumen	6,7	6,1	6,9
Warten	2,6	2,1	2,3

Deutlich erkennbar ist der gestiegene Zeitaufwand für Umräumprozesse im Experiment 3. Gegenüber Experiment 1 ist ein Anstieg um 70 Prozent bzw. um 4 Stunden zu verzeichnen. Mit Blick auf die Gesamtbauzeit beträgt der absolute Stundenmehraufwand sogar über 14 Stunden. Ursache ist der ebenfalls gestiegene Stundenaufwand für Materialtransporte, welcher durch die gewählte Umlagerstrategie verursacht wird. In allen drei Experimenten werden umzulagernde Teile in ein Etagenlager verbracht, d. h. im Vergleich zur Lagerung nahe dem Einbauort verlängern sich die Transportwege, um Material zu holen bzw. zu bringen.

Zusammenfassung und Ausblick

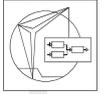


Die Frage nach dem Einfluss der Arbeitsbereiche auf den Gesamtbauablauf kann nur im Zusammenhang mit anderen Parametern des Bauablaufs beantwortet werden. Ein wahrnehmbarer Einfluss ist grundsätzlich nur dann zu beobachten, wenn die Materiallagerung in den Arbeitsbereichen erfolgt. In Verbindung mit der gewählten Umlagerstrategie können sich die beobachteten Auswirkungen noch verstärken. Empfehlenswert ist prinzipiell eine Lagerstrategie bzw. Ausführungsreihenfolge, die Materiallagerungen im Arbeitsbereich anderer Prozesse ausschließt.

Unabhängig hiervon ist baubetrieblich zu untersuchen, inwiefern die Lagerung von Fremdmaterial im Arbeitsbereich eines Prozesses tatsächlich eine Behinderung darstellt und damit eine Umlagerung überhaupt erforderlich macht (vgl. auch [7]). Dazu sind die durch einen Prozess erforderlichen Flächen für Ausführung, Materiallagerung oder Sicherheitsabstände ebenso wie die Auswirkungen vom notwendigen Bedarf abweichender Flächen detailliert zu untersuchen.

Literatur und Quellenangaben

- [1] VOIGTMANN, J. K.; BARGSTÄDT, H.-J.: Simulation of Construction Logistics in Outfitting Processes. In: ALAIN ZARLI und RAIMAR SCHERER (Hrsg.): EWork and EBusiness in Architecture, Engineering and Construction: ECPPM 2008. London: Taylor & Francis Group, 2008. S. 195–203.
- [2] KÖNIG, M.; BEIBERT, U.; BARGSTÄDT, H.-J.: Ereignis-diskrete Simulation von Trockenbauarbeiten – Konzept, Implementierung und Anwendung. In: Volkhard Franz (Hrsg.): 1. IBW-Workshop Simulation in der Bauwirtschaft. Kassel: kassel university press, 2007. S. 15–28.
- [3] KÖNIG, M.; BEIBERT, U.; BARGSTÄDT, H.-J.: Constraint-Based Simulation of Outfitting Processes in Ship Building and Civil Engineering. In: BORUT ZUPANČIČ, RIHARD KARBA und SAŠO BLAŽIČ (Hrsg.): Proceedings of the 6th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation – Vol. 2: Full papers (CD). Ljubljana, Slovenia: SLOSIM – Slovene Society for Simulation and Modelling, 2007. S. 11.
- [4] STEINHAEUER, D.: Simulation im Schiffbau und Kooperation mit der Bauhaus-Universität Weimar. In: VOLKHARD FRANZ (Hrsg.): 1. IBW Workshop Simulation in der Bauwirtschaft. Kassel: kassel university press, 2007. S. 1–14.
- [5] SIEMENS UGS: <http://www.emplant.de/>. 27.03.2010.
- [6] VOIGTMANN, J. K.; BARGSTÄDT, H.-J.: Simulation von Baulogistikprozessen im Ausbau. In: M. RABE (Hrsg.): Advances in Simulation for Production and Logistics Applications. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verlag, 2008. S. 131–140.
- [7] ELMAHDI, AMIR: Simulation baulogistischer Prozesse – Berücksichtigung räumlicher Aspekte, Teil 2. – In: „Modellierung von Prozessen zur Fertigung von Unikaten“ – Forschungsworkshop zur Simulation von Bauprozessen (Schriften der Professur Baubetrieb und Bauverfahren, Nr. 19/2010), Weimar: Bauhaus-Universität



Simulation bauleistungsprozesse – Berücksichtigung räumlicher Aspekte, Teil 2

Abstract

Mit den Werkzeugen der Simulation werden viele Prozesse in der stationären Industrie vorbereitet, optimiert und kontrolliert. Bauprozesse scheinen sich aufgrund ihrer Komplexität und dem hohen Anteil an unikatartigen Prozessen bisher noch einer Abbildung in einem Simulationsmodell zu entziehen. Umso vielversprechender sind die Ansätze von Forschern weltweit, die darauf hindeuten, dass sich die Simulation auch für die Arbeitsvorbereitung und Fertigungsgestaltung von Bauprozessen zu einem wertvollen Hilfsmittel entwickeln wird.

Zweidimensionale Planungswerkzeuge, wie Balkendiagramme und Netzplan-Techniken, zur Beschreibung der Ablaufplanung eines Projekts sind in ihrem Einsatz noch zu statisch. Erst die Verknüpfung mit den 2D- und 3D-CAD-Plänen zu 4D und 5D eröffnet neue Dimensionen der integrierten Darstellung von Zeit- und Ressourcenverbrauch in Abhängigkeit von Bauteilgeometrie und Arbeitsfortschritt.

Hier wird ein Ansatz vorgestellt, der insbesondere bei komplexen Bauwerken und in einer Umgebung mit hohem Anteil flexibler Abhängigkeiten die logischen Verknüpfungen erfasst und in einem Simulationsmodell verarbeitet.

Der Fokus liegt dabei zunächst auf der Modellierung von räumlichen Beziehungen und Abhängigkeiten, um so die Effizienz von Arbeiten in verdichteter Umgebung und bei paralleler Tätigkeit unterschiedlicher Gewerke zutreffend abbilden und analysieren zu können. Dies dient dem Ziel, die in zu enger Umgebung unvermeidbaren Einbußen von Produktivität, Sicherheit und Produktqualität zu quantifizieren.

Das Konzept wird für den Einsatz in einem Simulationsmodell entwickelt, das einen Constraint-basierten Ansatz verwendet. Hierbei wird die Möglichkeit vorbereitet, die Zuordnung der Arbeitsräume unter Einsatz entsprechender Bewertungsansätze flexibel zu steuern.

1 Ausgangslage

In der Baubranche zählen gegenwärtig noch überwiegend 2D-Planungswerkzeuge zum Stand der Technik. Dieser Technik mangelt es an der Darstellung der Eigenschaften der Komponenten, die installiert bzw. gebaut werden sollen, und der dazu erforderlichen Arbeitsräume. Infolgedessen werden Unvollständigkeiten und Inkonsistenzen in den Planungsdaten zu spät erkannt und führen zu einem erheblichen Mehraufwand und zu erhöhten Kosten. Die gesamte Raumplanung unter den baubetrieblichen Anforderungen ist jedoch sehr komplex und wurde bisher in keinem entsprechenden Planungswerkzeug verfügbar gemacht.

Bisher entwickelte Modelle formalisieren nicht die Beziehungen zwischen typischen unterschiedlichen Arbeitsbereichen auf der Baustelle. Außerdem werden die Raumplanung und die Erfassung von Raum-Zeit-Konflikten nur aus Sicht der Ressourcen betrachtet. Jedoch werden mittlerweile Werkzeuge zum Erkennen von topologischen Überschneidungen eingesetzt. Zu beantworten ist daher die Frage, wie Zeit-Raum-Konflikte in den topologischen Beziehungen zwischen den verschiedenen Arbeitsbereichen entstehen und gelöst werden können. Dieses ist das grundlegende Ziel der Formalisierung der topolo-



gischen Beziehungen, um mehr typisierte Parameter erfassen zu können, die außer der bekannten geometrischen Überschneidung die Bauabläufe zwischen den Arbeitsbereichen zutreffend charakterisieren (vgl. z. B. VOIGTMANN 2010).

Verschiedene Konzepte wurden entwickelt, um die Belegung von Arbeitsbereichen auf der Baustelle darzustellen. THABET und BELIEAU stellen die Arbeitsbereiche als kritische Ressource im Bau dar, die sie daher in die Bauplanung integrieren (THABET und BELIEAU 1994). RILEY und SANVIDO haben durch Beobachtung auf der Baustelle unterschiedliche Arbeitsbereiche identifiziert (RILEY und SANVIDO 1995). Sie erstellen daraus Arbeitsmuster für Raumnutzungen, um Störungen zu erkennen und zu vermeiden (RILEY und SANVIDO 1997). Guo stellt ein Konzept vor, in dem der Nutzer manuell räumliche Layouts der Baustelle durch die Verknüpfung von Microsoft Project und AutoCAD erstellen kann. Die Ressourcen (einschließlich des Platzbedarfs) für die einzelnen Aufgaben werden in digitalen 2D-Zeichnungen integriert, wobei diese die verfügbaren Räume auf der Baustelle beschreiben. Wenn die Informationen zusammengefasst werden, dann versucht das System, den Schweregrad räumlicher Konflikte zu bestimmen. Sobald ein Raumkonflikt identifiziert wird, antwortet das System nach einer vorbestimmten Strategie. Entweder wird der Platzbedarf der Aufgabe geändert oder der Ablaufplan wird angepasst (Guo 2002).

Demgegenüber werden in dem hier vorgestellten Konzept die wesentlichen räumlichen Parameter unterschiedlicher Gewerke auch zueinander erfasst. Hierzu werden diese Parameter als Vorbedingungen protokolliert, deren Erfüllung abgefragt wird, bevor eine Aufgabe ausgeführt werden kann. So werden die möglichen Konflikte sofort mit einer automatisch generierten Lösung beantwortet.

2 Klassifizierung von Arbeitsräumen

Eine wichtige Basis von Raumplanungskonzepten ist die Identifizierung und Klassifizierung der einzelnen Arbeitsbereiche auf der Baustelle, die für verschiedene Aufgaben erforderlich sind. Die Identifikation der vorhandenen Räume auf einer Baustelle wird innerhalb dieser Betrachtung an den unterschiedlichen Tätigkeiten festgemacht (Bild 1). Dabei ist es zunächst notwendig, diese Tätigkeiten grob zu kategorisieren. Die Vorgänge, die im Zusammenhang mit dieser Betrachtung berücksichtigt werden, sind Bewegen, Lagern bzw. Zwischenlagern und die Durchführung der eigentlichen Arbeiten inklusive der Herstellung von Zwischenzuständen.

Die Aufgaben können in die folgenden drei Gruppen eingeteilt werden: Process Area, Supply Area und Transport Path. Basierend auf RILEY und SANVIDO (1995) und auf eigenen Praxiserfahrungen wurden die Gruppen nochmals in 13 Typen unterteilt, die die am häufigsten benötigten Arbeitsbereiche charakterisieren.

Die Process Area unterteilt sich in

- den Arbeitsraum für die Arbeiter,
- ein arbeitsplatznahes Lager für das Material,
- einen Ablageplatz für die Maschinen und Geräte,
- einen Sicherheitsabstand und
- eine Einsatzfläche. Unter der Einsatzfläche wird der hinreichende Abstand zu einem konkurrierenden anderen Gewerke verstanden. Gerade die ausreichende Größe der Einsatzfläche ist ein entscheidender Faktor für die Produktivität.

Allerdings haben die Gewerke und durch sie zu verrichtende Arbeiten sehr unterschiedliche Anforderung an die einzelnen Komponenten der Process Area. Die Größe des benötigten Raums muss also in Abhängigkeit der verschiedenen Gewerke definiert werden.

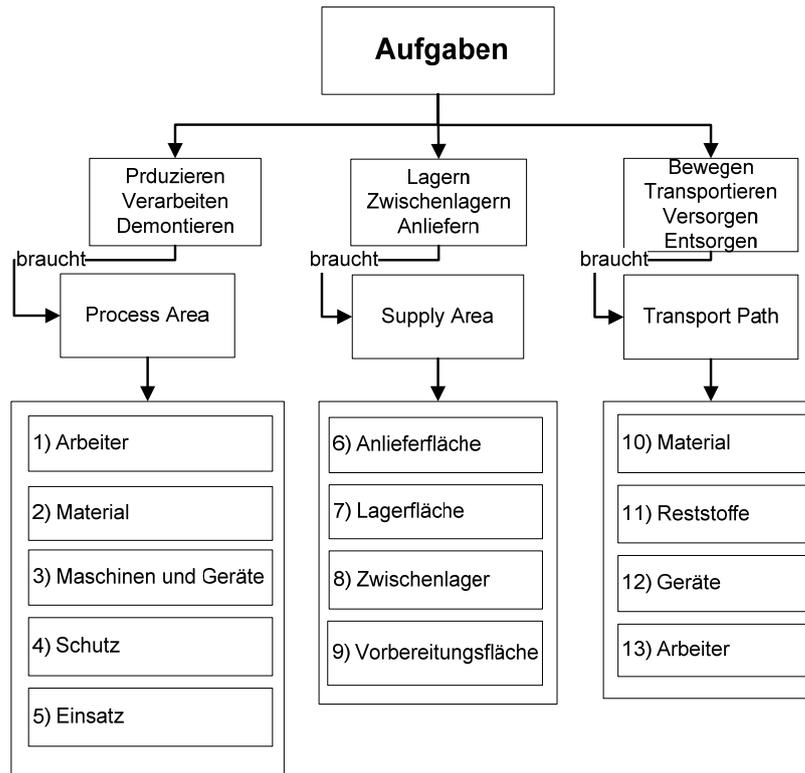
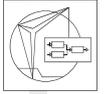


Bild 1 Klassifizierung der benötigten Arbeitsbereiche

Die Supply Area besteht aus

- einer Anlieferfläche, auf der Materialien zunächst abgeliefert werden, um im Weiteren entweder auf
- die zentrale Lagerfläche für Material oder
- die Zwischenlager auf verschiedenen Etagen verbracht zu werden, von wo aus sie weiter zur
- Vorbereitungsfläche geliefert werden könnten.

Die dritte Gruppe beschreibt mit Transport Path die verschiedenen Verkehrstrassen im Gebäude für

- den Materialtransport in das Gebäude,
- das Verbringen von Reststoffen aus dem Gebäude heraus,
- den Transport von Baumaschinen und -geräten und
- die Verkehrswege der Arbeiter zum und vom Arbeitsplatz.

Der gravierende Unterschied der Flächenkonzeptionen auf Baustellen im Vergleich zu äquivalenten Flächen in der industriellen Produktion besteht in der zeitlich sehr begrenzten Nutzungszeit dieser räumlichen Zuordnungen im Laufe des Bauprozesses. Durch den Baufortschritt ändern sich permanent sowohl die Anforderungen an die Flächen als auch der Charakter der zur Verfügung stehenden Flächen. Somit ändern sich auch die Funktionen, die die Flächen erfüllen müssen, und schließlich wechseln die darauf stattfindenden Vorgänge ständig. So ist es nicht überraschend, dass die am Bau Beteiligten immer wieder von neuem um den zur Verfügung stehenden Raum konkurrieren. Hieraus leitet sich eine der Hauptaufgaben zur Disposition der auf der Baustelle vorhandenen Flächen ab. Die Abstimmung der Flächenbelegung ist in Abhängigkeit vom Bauablauf und seiner jeweiligen Teilprozesse zu gestalten. Doch auch wenn sich Bauprozesse und Dispositionsflächen wechselseitig bedingen, so sind z. B. in der Ausbauphase auf einer üblichen Hochbaustelle die Freiheitsgrade in Hinsicht sowohl der Arbeitsreihenfolge als auch bezüglich der nutzbaren Räume nicht gerade klein.



3 Klassifizierung der räumlichen Beziehungen

Räumliche Beziehungen definieren die relative Lage von Objekten. Diese Beziehungen können sowohl qualitative als auch quantitative beschrieben werden. Ziel der Festlegung der allgemeinen räumlichen Beziehungen für die Anwendung im Bau ist die Darstellung der signifikanten Merkmale von Konfigurationen, wie z. B. der Größe und der Form eines Raums für bestimmte Gewerke, die bei der Festlegung der Process Area erforderlich sind.

Ein hilfreicher Ansatz ist die Kategorisierung der Beziehungen nach den unterschiedlichen räumlichen Konzepten, auf denen sie basieren. Es gibt drei grundlegende Arten von Relationen, mit denen räumliche Beziehungen kategorisiert werden. Diese sind die Ordnungsrelation, die metrische Relation und die topologische Relation (EGENHOFER 1990). Ordnungsrelationen stützen sich auf die Definition der Ordnung von zwei Objekten zueinander, wie z. B. „A hinter B“ oder „A neben B“. Die metrische Relation definiert dagegen die Relation zwischen zwei Objekten durch Messwerte, wie Entfernung und Orientierung.

Nachfolgend soll die topologische Relation näher beschrieben werden.

Unter der topologischen Relation versteht man Daten in Bezug auf festgesetzte räumliche Beziehungen zwischen mehreren Objekten, unabhängig von den jeweiligen Abmessungen, wie z. B. Überlappung und Ausdehnung. Die topologische Relation kennt acht grundlegende Beziehungen zueinander, Bild 2 (EGENHOFER 1990).

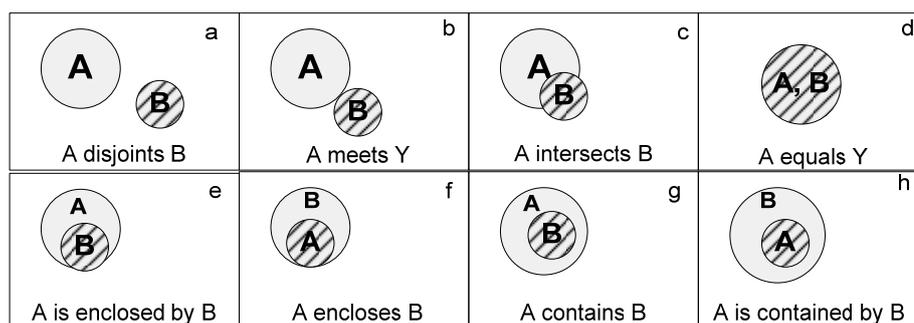


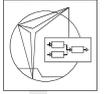
Bild 2 Darstellung topologischer Relationen (EGENHOFER 1990)

Räumliche Beziehungen am Bau

Für die Darstellung von Räumen auf der Baustelle werden nicht alle der acht aufgeführten topologischen Relationen benötigt. Es ist ausreichend, mit den drei Relationen zu arbeiten: überlappend, nebeneinander und mit Abstand zueinander. Diese ermöglichen die ausreichende Abbildung aller möglichen typischen Raumbeziehungen auf Baustellen.

Eine Überlappung wird definiert als Beziehung, bei der sich der Arbeitsraum A komplett innerhalb des Arbeitsraums B befindet (in Bild 2 die Varianten d, f und h; Varianten e und g sind dazu spiegelbildlich). Der kleinere Arbeitsraum (z. B. in Variante f die Fläche A) wird später vernachlässigt, und es wird nur noch der größere Arbeitsraum betrachtet.

Arbeitsraum A und B liegen nebeneinander, wenn der Abstand zwischen den beiden Zentren genau die Hälfte der Summe der jeweiligen Durchmesser beträgt (In Bild 2 die Variante b). Eine Teilüberlappung (Variante c) soll an dieser Stelle zunächst vereinfachend mit der Variante b modifiziert erfasst werden, da hier nicht genau der Umfang der Überlappung bestimmt werden soll. Im Fall der Variante a wird der Abstand definiert, in dem der Arbeitsraum A zum Arbeitsraum B steht.



In Bild 3 ist ein Beispiel für die verschiedenen Bereiche während einer Türmontage dargestellt. Der Arbeitsbereich (gelber Rahmen) überlappt den Gerätebereich (roter Rahmen). Der Materialbereich (schwarzer Rahmen) liegt dagegen außerhalb des Arbeitsbereichs.



Bild 3 Einbau einer Tür

4 Constraint-basierte Simulation

Die hier vorgestellten Beziehungen und Relationen werden im Rahmen eines ereignisdiskreten Simulationsansatzes verwendet. Der Simulationsverlauf wird von Ereignis zu Ereignis in Zeitsprüngen abgearbeitet. Jeder Arbeitsschritt besitzt zum Zeitpunkt eines bestimmten Ereignisses einen der drei Zustandswerte: nicht begonnen, in Arbeit oder beendet. Dieser Zustandswert gibt Aufschluss über die Bearbeitung des entsprechenden Vorgangs. Die benötigten Ressourcen (Material, Personal und bestimmte Arbeitsmittel) müssen ausreichend verfügbar sein, bevor ein Arbeitsschritt begonnen werden kann. Dann werden diese während der Ausführung des Arbeitsschritts für alle anderen Arbeitsschritte gesperrt. Ist die geplante Ausführungszeit eines Arbeitsschritts beendet und das entsprechende Ereignis eingetreten, werden alle gesperrten Ressourcen bzw. Arbeitsplätze wieder freigegeben. Diese Sequenz wird so lange wiederholt, bis alle Arbeitsschritte beendet sind oder im Fehlerfall keine Arbeitsschritte mehr gestartet werden können. Der Simulationslauf mit allen Zustandsänderungen bzw. Ressourcensperrungen wird protokolliert. Daraus kann dann ein Terminplan erstellt und z. B. in Bezug auf die Auslastung der Ressourcen analysiert werden (KÖNIG et al. 2007, KÖNIG et al. 2007a).

4.1 Methodologie der Prozessschritte

Das hier dargestellte Simulationskonzept zur Erfassung räumlicher Abhängigkeiten identifiziert die Anforderungen an die verschiedenen Arbeitsbereiche und ihre räumlichen Relationen für jeden Arbeitsschritt und integriert die Anforderungen im Simulationsablauf in Form von zusätzlichen Bedingungen (Constraints).

Anschließend kann die Erfüllung dieser räumlichen Constraints auf die Baustelle übertragen, implementiert und kontinuierlich überprüft werden. Zur Berechnung der Räume wird zuerst eine genaue Analyse erstellt. In Bild 4 werden am Beispiel des Trockenbaus die zu tätigen Schritte beschrieben. Das Schema ermöglicht auf einfache Weise, den Platz- bzw. Raumbedarf zunächst ggf. auch erst einmal grob abzuschätzen. Jede Ausbaufolge muss dabei in ihre Arbeitsschritte zerlegt werden. Diese Aufgabe wird derzeit mit dem Ziel erarbeitet, sie so allgemein gültig zu formulieren, dass die Übertragung auf verschiedene Gewerke mit einer einfachen Anpassung der flexibel gehaltenen Parameter möglich wird.

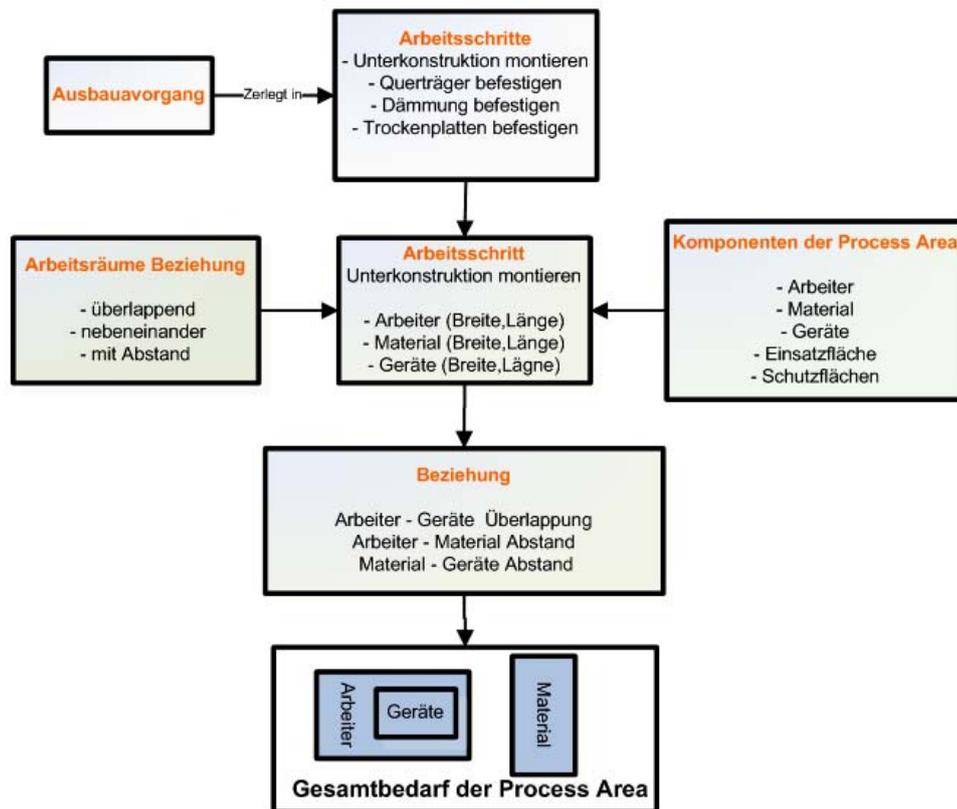


Bild 4 Darstellung des raumorientierten Simulationskonzepts

4.2 Abbildung der Belegung von Arbeitsbereichen

In der Versuchsanordnung wird die Baustelle durch eine endliche Menge von geometrisch definierten Zellen dargestellt. Jeder Zelle wird nun ein eindeutiger Zustand zugeordnet, mit dem nach den vorgegebenen Regeln dann die weiteren Arbeiten ablaufen können, Bild 5.

Hierbei können die Zellen nur zwei charakteristische Grundzustände annehmen: „verfügbar“ (0) und „gesperrt“ (1). Je nach Art der Arbeitsräume und der zu kombinierenden Vorgänge und Arbeitsschritte können weitere Attribute wie „gesperrt für die Lagerung von ...“ oder „für den Transport von ... gesperrt“ zugewiesen werden. Die zellenbasierte Beschreibung ist eine geeignete Technik, um die erforderlichen und die verfügbare Räume zu beschreiben.

Wenn nach Abschluss eines Arbeitsschritts (ein Endereignis tritt ein) ein neuer Arbeitsschritt begonnen werden kann, werden alle noch nicht begonnenen Arbeitsschritte auf die Möglichkeit ihrer Ausführung hin überprüft. Ein Arbeitsschritt kann begonnen werden, wenn die damit verbundenen Arbeitsbereiche zur Verfügung stehen. Die benötigten Arbeitsbereiche werden in die zellenbasierte Darstellung des Grundrisses übertragen (Bild 5). Damit werden diese Zellen für andere Arbeitsschritte gesperrt. Das bedeutet, dass diese Arbeitsräume nicht durch andere Arbeitsschritte genutzt werden können. Nach dem Sperren des erforderlichen Arbeitsbereichs für den ausgewählten Arbeitsschritt ändert sich dessen Zustand von „Aufgabe nicht begonnen“ in „Aufgabe in Arbeit“. Ist die geplante Ausführungszeit eines Arbeitsschritts beendet und das entsprechende Ereignis eingetreten, sind alle durch den Arbeitsschritt gesperrten Arbeitsräume wieder frei zu geben. Anschließend wird die Simulationsschleife so lange wiederholt, bis alle Arbeitsschritte abgearbeitet sind und somit die gesamte Aufgabe erfüllt ist.

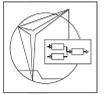
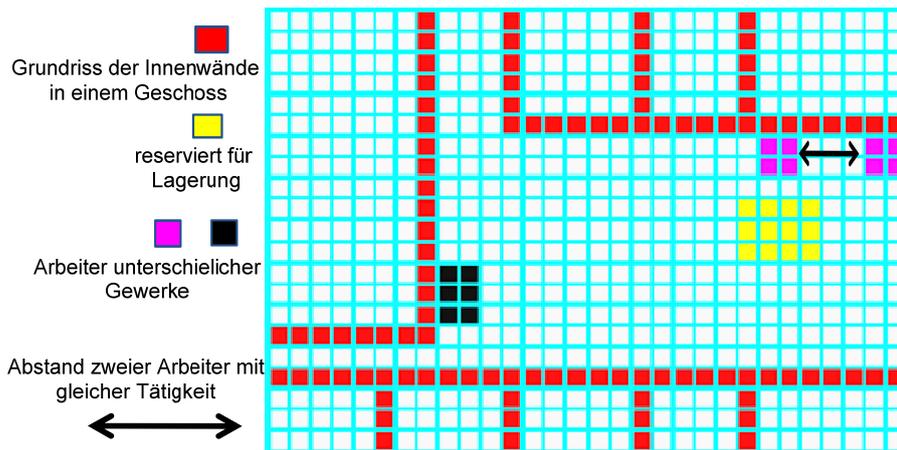


Bild 5 Zellen-basierte Darstellung der Arbeitsbereiche

Dieser systematische Ansatz wird derzeit in ein Simulationsmodell mit verifizierten Daten implementiert. Ein Simulationslauf berechnet dabei genau einen praktikablen Ausführungsplan. Als Ergebnis wird eine Liste der auszuführenden Aufgaben generiert.

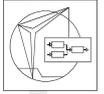
Übergeordnetes Ziel ist die Simulation verschiedener praktikabler Lösungen, also unterschiedlicher Kombinationen von Gewerken mit unterschiedlichen Anforderungen an ihre Arbeitsräume, die hinsichtlich der übergeordneten Prämissen des Projekts wie Zeit, Kosten und Qualität dann visualisiert, analysiert und gegeneinander abgewogen werden sollen. Dieser systematische Ansatz wird derzeit in einem Simulationsmodell mit verifizierten Daten implementiert.

5 Literaturverzeichnis

- [1] AKINCI, B.; FISCHER, M.; KUNZ, J.: Automated Generation of Work Spaces Required by Construction Activities, *Journal of Construction Engineering and Management*, 2002.
- [2] ASHLEY, D.: Simulation of Repetitive-Unit Construction, *Journal of Construction Division, ASCE*, Vol. 106, No. C02, 185–194, 1980.
- [3] EGENHOFER, M.; HERRING, J.: A Mathematical Framework for the Definition of Topological Relationships. The 4th International Symposium on Spatial Data handling, Zurich, Switzerland, 1990.
- [4] FISCHER, M.: 4D Production models research and application, <http://www.stanford.edu/group/4D/index.shtml>.
- [5] GUO, S.: Identification and resolution of work space conflicts in building construction, *Journal of Construction Engineering and Management*, 2002.
- [6] HALPIN, D. W.: Cyclone-Method for Modeling Job Site Processes. *ASCE Journal of Construction Division*, 1977.
- [7] KÖNIG, M.; BEIBERT, U.; BARGSTÄDT, H.-J.: Ereignis-diskrete Simulation von Trockenbauarbeiten – Konzept, Implementierung und Anwendung; 1. IBW-Workshop Simulation in der Bauwirtschaft, Kassel University Press, Kassel, 2007.
- [8] KÖNIG, M.; BEIBERT, U.; STEINHÄUER, D.; BARGSTÄDT, H.-J.: Constraint-Based Simulation of Outfitting Processes in Shipbuilding and Civil Engineering. 6th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, Slovenia, 2007a.
- [9] LAW, A.; KELTON, W.: *Simulation Modeling and Analysis*, 2nd Edition, McGraw-Hill, Inc. 1991.
- [10] MARTINEZ, J.; IOANNOU, P.: General-purpose systems for effective construction simulation, *Journal of Construction Engineering and Management*, 1999.
- [11] PAULSON, B.: Interactive Graphics for Simulating Construction Operations, *Journal of the Construction Division, ASCE*, 1978.



- [12] PRITSKER, A.: Introduction to simulation and SLAM, 2nd. Edition, 1986.
- [13] SHI, J.; ABOURIZK, S.: A resource-based simulation approach with application in earthmoving/strip mining, Winter Simulation Conference, 1994.
- [14] RILEY, D.; SANVIDO, V.: Space planning method for multistory building construction, Journal of Construction Engineering and Management, 1997.
- [15] RILEY, D.; SANVIDO, V.: Patterns of construction-space in multistory buildings, Journal of Construction Engineering and Management, 1995.
- [16] RILEY, D.; SANVIDO, V.: Space planning method for multistory building construction Journal of Construction Engineering and Management, 1997.
- [17] SIEMENS 2009; <http://www.emplant.de/>
- [18] THABET, W., BELIVEAU Y.: Modelling work space to schedule repetitive floors in multistory buildings, Journal of Construction Engineering and Management, 1994.
- [19] THABET, W., BELIVEAU, Y.: HVLS: horizontal and vertical logic scheduler for multistory projects,
- [20] VOIGTMANN, JULIA K.: Simulation bauprozessischer Prozesse – Berücksichtigung räumlicher Aspekte, Teil 1. – In: „Modellierung von Prozessen zur Fertigung von Unikaten“ – Forschungsworkshop zur Simulation von Bauprozessen (Schriften der Professur Baubetrieb und Bauverfahren, Nr. 19/2010), Weimar: Bauhaus-Universität



Constraint-basierte Simulation von Bauprozessen – Studie zur Verwendung von Variablenordnungsstrategien

1 Einleitung

Das Problem der Ablaufplanung von Bauprojekten zählt in die Klasse der NP-schweren Probleme (SAUER 2004), bestehend aus einem Reihenfolge-, Zuordnungs- und Optimierungsproblem. Die Projekte sind geprägt durch vielfältige Fertigungsvarianten, eine Vielzahl an technologischen sowie projektspezifischen Randbedingungen und zumeist konfliktären Zielstellungen. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist eine intensive Untersuchung des vorhandenen Lösungsraums sinnvoll, um einen geeigneten Ablaufplan für ein Projekt zu erstellen. Im Gegensatz dazu erfolgt in der Praxis die Planung der Ausführung eines Projektes meist aufgrund des Erfahrungswissens des Planers, welcher erfolgreich angewandte Ausführungsstrategien auf nachfolgende Projekte überträgt.

Im Rahmen der Forschungskoooperation SIMoFIT (Simulation of Outfitting Processes in Shipbuilding and Civil Engineering) zwischen der Bauhaus-Universität Weimar und der Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG ist ein Constraint-basierter Simulationsansatz entwickelt worden, um die Planung von Bauprozessen zu verbessern (BEIßERT et al. 2007, KÖNIG et al. 2007). Der Constraint-basierte Ansatz zur Modellierung von Bauprozessen soll zunächst kurz präsentiert werden. Im Rahmen der Lösungssuche mittels Simulation sollen verschiedene Variablenordnungsstrategien genutzt werden, um den Lösungsraum sinnvoll einzuschränken und ggf. auf einen erfolgversprechenden Teil des Lösungsraumes zu beschränken. Die Integration der Variablenordnungsstrategien in das bestehende Simulationskonzept wird präsentiert und im Anschluss anhand eines Fallbeispiels die Eignung der verschiedenen Strategien zur Planung von Bauprozessen untersucht.

2 Constraint-basierte Simulation

In der stationären Industrie werden Simulationsanwendungen bereits seit den 90er Jahren intensiv und erfolgreich zur Verbesserung von Produktionsabläufen genutzt. In der Regel sind die Modelle der stationären Industrie durch ein statisches Produktionslayout und eine limitierte Anzahl an Reihenfolgekombinationen der Bearbeitungsplätze gekennzeichnet. Im Gegensatz dazu sind insbesondere die Ausbauprozesse im Bauwesen durch ortsveränderliche Arbeitsplätze geprägt, an welche die Arbeitsmittel herangeführt werden müssen, sowie im Weiteren durch eine Vielzahl von unterschiedlichen Bedingungen bzgl. der Bearbeitungsreihenfolge. Im Vergleich zur stationären Industrie kann zur Beschreibung von Bauprozessen kein statisches Produktionslayout festgelegt werden, so dass andere Möglichkeiten zur Modellierung gewählt werden müssen.

Im Rahmen der Kooperation SIMoFIT ist ein Constraint-basierter Simulationsansatz entwickelt worden, um Bauprozesse mittels Partial Constraint Satisfaction zu beschreiben und unter Verwendung der Simulation gültige Ablaufpläne unter Berücksichtigung der verfügbaren Ressourcen berechnen zu können.



2.1 Partial Constraint Satisfaction

Das Problem der Planung von Ausbauprozessen wird als ein Partial Constraint Satisfaction Problem (PCSP) beschrieben, bestehend aus einer Menge an Variablen, Domänen und Constraints (FREUDER und WALLACE, 1992). Die Mengen der Variablen und die ihnen zugewiesenen Wertedomänen beschreiben die Objekte des Problems. Die Menge der Constraints beschreibt die Randbedingungen zwischen den Variablen. Zur realistischen Beschreibung von Ausbauprozessen werden die Constraints in Hard- und Soft Constraints unterteilt (Sauer, 2004). Hard Constraints beschreiben zwingend einzuhaltende Bedingungen der Bauprozesse. Soft Constraints definieren zweckmäßige Bedingungen, die nicht vollständig erfüllt sein müssen und somit in einem definierten Umfang verletzt werden können. Innerhalb der Lösungssuche des PCSP sollen diejenigen Lösungen ermittelt werden, die alle Hard Constraints vollständig und Soft Constraints zu einem möglichst hohen Grad erfüllen.

Variablen und Domänen der Bauprozesse

Die Spezifikation der Variablen und Domänen erfolgt in Anlehnung an die Ontologie von SMITH und BECKER (1997) zur Modellierung von Produktionsprozessen im Rahmen von Constraint-basierten Scheduling-Systemen. Gemäß dieser Ontologie wird das zu planende System mittels der fünf Basiskomponenten Bedarf, Produkt, Vorgänge, Ressourcen und Randbedingungen beschrieben. Die Vorgänge stehen im Fokus der Betrachtung. Sie beschreiben die notwendigen Prozessschritte zur Erstellung der Produkte. Den Prozessschritten werden die benötigten Ressourcen und Bedingungen zu ihrer Ausführung zugewiesen. Sind alle definierten Prozesse an den Produkten ausgeführt, so gilt auch der Bedarf als erfüllt. Basierend auf dieser Ontologie soll auch in vorliegender Arbeit die Beschreibung der Bauprojekte vorgenommen werden.

Als Variablen des PCSP werden die auszuführenden Prozessschritte und die zur Verfügung stehenden Ressourcen, wie Personal, Geräte und Material, beschrieben. Die Spezifikation der Prozessschritte basiert auf der Zerlegung des Bauprojektes in seine Einzelbauwerke und dessen Bauteile, sowie der Konstruktionsmethode zur Erstellung des Bauwerkes. Jeder Variablen wird zur Spezifikation ein Status zugewiesen, welcher im Falle der Prozessschritte Aussagen bezüglich des aktuellen Bearbeitungsstatus ermöglicht und im Falle der Ressourcen bezüglich ihrer Verfügbarkeit.

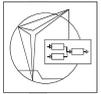
Constraints für Bauprozesse

Die Constraints für die Beschreibung von Ausbauprozessen werden auf Basis der definierten Simulationsobjekte Prozessschritte und Ressourcen spezifiziert und zwischen diesen Objekten definiert. Tabelle 1 zeigt die verschiedenen definierten Constraints für Bauprozesse.

Tabelle 1: Zwingende und zweckmäßige Bedingungen für Bauprozesse

Hard Constraints für Bauprozesse	
Technologische Abhängigkeiten	Zwingend erforderliche Reihenfolge zwischen zwei Bauprozessen
Kapazität	Anzahl und Qualifikation der notwendigen Arbeiter und Arbeitsmittel
Verfügbarkeit	Notwendiges Material unter Berücksichtigung von vorhandenen Lagerflächen
Sicherheitskriterien	Sicherheit von Arbeitern und Arbeitsmitteln auf Basis der allgemeinen Sicherheitsvorschriften
Soft Constraints für Bauprozesse	
Strategien	In der Praxis etablierte und bewährte Ausführungsreihenfolgen von Bauprozessen

Als Hard Constraints werden die technologischen Abhängigkeiten zwischen Prozessschritten, die notwendige Verfügbarkeit von Material sowie Personal und Sicherheitsaspekte definiert. In der Praxis bewährte Ausführungsstrategien werden als Soft Constraints spezifiziert. Einen Überblick über Strategien der Ausführung von Bauprozessen liefert BEIBERT et al. 2008.



2.2 Soft Constraints der Ausbaustrategien

Die Soft Constraints beschreiben zweckmäßige Bedingungen der Bauprozesse. Diese können verletzt werden, sollten aber soweit wie möglich eingehalten werden. Der Grad der Soft Constraint-Verletzung einer Planungsalternative kann als zusätzlicher Indikator zur Bewertung der Güte der Pläne herangezogen werden. Verschiedene Soft Constraint-Ansätze wie Weighted, k-Weighted und Fuzzy Constraints können zur Beschreibung von Ausbaustrategien verwendet werden (Rossi et al. 2006). Im Rahmen des vorliegenden Beitrags soll exemplarisch die Strategie *Verschmutzung vermeiden* vorgestellt werden.

Verschmutzung vermeiden

Die Strategie *Verschmutzung vermeiden* legt fest, dass „schmutzige“ Arbeiten möglichst vor „sauberen“ Arbeiten ausgeführt werden sollen, um so zusätzliche Arbeiten z. B. Aufräumprozesse zu vermeiden, die in zusätzlichen Bearbeitungszeiten und Kosten resultieren. Eine Änderung der Verschmutzungsgrade aufeinanderfolgender Prozesse sollte immer zum nächst geringeren Verschmutzungsgrad erfolgen. Im Sinne der Strategie sind jedoch Rücksprünge auf höhere Grade zulässig.

Die Strategie wird mit Hilfe der Weighted Constraints formalisiert, in der Regel wird hierbei jedes Constraint um ein spezifisches Gewicht w ergänzt. Bei Verletzung des Constraints geht dieses Gewicht als Kostenfaktor in die Gesamtbewertung der Alternative ein. BELDICEANU und PETIT (2004) stellen jedoch heraus, dass sich insbesondere für die Betrachtung von Scheduling Problemen eine objektbasierte Gewichtung eignet. Diese Form der Repräsentation soll auch hier angewendet werden. So ist zunächst jedem Prozessschritt ps ein Grad der Verschmutzung (Degree of Soiling – DoS) zu zuweisen, welcher anschließend mit Hilfe eines Gewichtes w repräsentiert wird. Die Tabelle 2 zeigt eine Möglichkeit der Zuordnung von Verschmutzungsgraden zu Gewichten.

Tabelle 2: Verschmutzungsgrade und ihre Gewichte

<i>DoS</i>	schmutzig	weniger schmutzig	weniger sauber	sauber
<i>Gewicht</i>	4	3	2	1

Das Constraint der Strategie *Verschmutzung vermeiden* wird durch $ps_i.w \leq ps_j.w$ definiert. D. h. der Grad der Verschmutzung eines Vorgängerschnittes ps_i soll kleiner oder gleich der Verschmutzung seines Nachfolgerschnittes ps_j sein. Der Grad der Verletzung des Soft Constraints wird mit Hilfe eines Bewertungs- bzw. Kostenfaktors kf repräsentiert. Die Berechnung des Kostenfaktors erfolgt unter Nutzung der Gewichte der Schritte.

$$C_W(ps_j): \{ps_j.kf \mid ps_i.w \leq ps_j.w\}$$

$$\text{mit } ps_j.kf = \begin{cases} (\Delta w)^2 & \text{wenn } \Delta w \geq 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{mit } \Delta w = ps_i.w - ps_j.w$$

- ps_j – nächster ausführbarer Prozessschritt (Nachfolger)
- ps_i – Vorgänger
- $ps_j.w$ – Verschmutzungsgrad (Gewicht) des Nachfolgers ps_j
- $ps_i.w$ – Verschmutzungsgrad (Gewicht) des Vorgängers ps_i
- $ps_j.kf$ – Kosten der Constraint Verletzung des Prozesses ps_j



Die einzelnen Kostenfaktoren der Prozessschritte $ps.kf$ einer Planungsalternative werden zu Gesamtkosten KF summiert. Die optimale Ablauffolge gemäß der Strategie ist diejenige Abfolge der Prozessschritte, die minimale Gesamtkosten verursacht.

$$KF := \sum_{i=1}^n ps_i.kf$$

2.3 Simulationskonzept

Innerhalb der Kooperation SIMoFIT (Simulation of Outfitting Processes in Shipbuilding and Civil Engineering) ist das vorgestellte Constraint-basierte Simulationskonzept mit Hilfe von Plant Simulation – einer ereignisdiskreten Simulationssoftware – der Firma Siemens PLM Software II GmbH unter Verwendung des Simulationsbausteinkastens für den Schiffbau (STS) umgesetzt worden (STEINHÄUER 2006). Bereits bestehende sowie neu entwickelte Simulationsbausteine wurden zu einem Constraint-basierten Framework zusammengesetzt. Die einzelnen Komponenten werden in KÖNIG et al. (2007) im Detail erläutert.

Der hier vorgestellte diskrete Simulationsansatz basiert auf der Simulation einzelner Prozessschritte. Jedem Prozessschritt ist ein eindeutiger Bearbeitungszustand *nicht gestartet*, *gestartet* oder *beendet* zugewiesen und jeder Prozessschritt wird ohne Unterbrechung und ohne Änderung der ihm zugewiesenen Ressourcen und Arbeitsplätze ausgeführt. Zur Ausführung wird eine bestimmte Ausführungszeit benötigt. Die Prüfung von Constraints erfolgt im Rahmen der Simulation bei dem Eintreten bestimmter Ereignisse. Typische Ereignisse sind Änderungen des Bearbeitungszustandes von Prozessschritten, die Freigabe von Ressourcen oder die Beendigung von Materialtransporten. Sobald ein neues Ereignis eintritt, werden die Prozessschritte nach folgendem Schema zum Starten der Prozessschritte verarbeitet (siehe Bild 1).

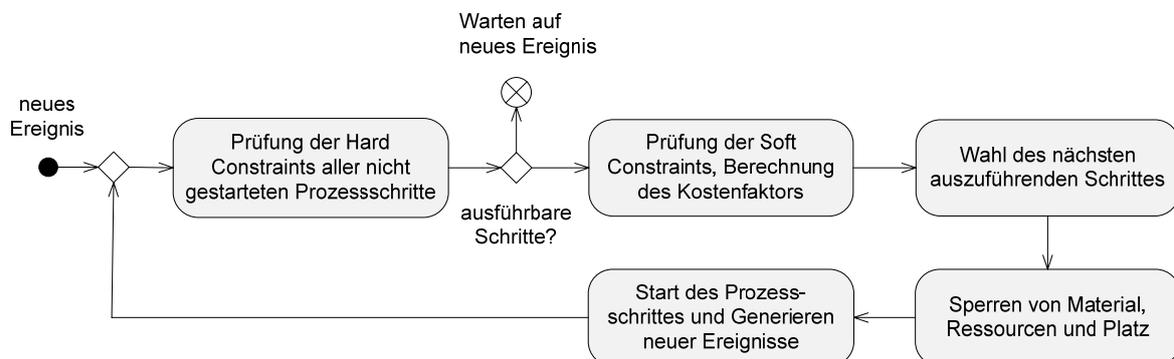
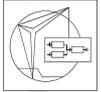


Bild 1 Starten von Prozessschritten

Ist die Ausführungsdauer eines Prozessschrittes erreicht, sind alle durch ihn gesperrten Ressourcen bzw. Arbeitsplätze wieder frei zu geben. Die Simulation wird beendet, wenn alle Prozessschritte beendet sind und keine Ereignisse mehr erzeugt werden. Jeder Simulationslauf wird mit allen Zustandsänderungen bzw. Sperrungen protokolliert. Auf Basis dieser Protokolle kann genau ein Terminplan erstellt werden und im Anschluss die Auslastung der Ressourcen analysiert werden.

3 Lösungssuche mit Hilfe von Variablenordnungsstrategien

Das Problem der Ablaufplanung zählt in die Klasse der NP-schweren Probleme (NP-hard) (SAUER 2004). Ein systematisches vollständiges Durchsuchen des gesamten Lösungsraumes ist nicht effizient möglich. Eine Möglichkeit der Verbesserung der Lösungssuche, liegt in dem Einsatz sinnvoller Heuristiken zur Auswahl der nächsten zu belegenden Variablen und zur Auswahl einer sinnvollen Wertebelegung der Variablen, sogenannten Variablen- und Werteordnungsstrategien (SMITH et al. 2000, TSANG



1993, HOFSTEDT et.al. 2007). Der Vorteil des Einsatzes von Strategien liegt in der Einschränkung des Suchbaumes über alle möglichen Ablaufalternativen durch die zusätzlichen Restriktionen und die Beschränkung der Suche auf einen spezifischen, erfolversprechenden Teil des Suchbaumes.

Zu den bekanntesten Strategien zur Variablenordnung zählen die first-fail Strategie, auch Minimum Remaining Values (MRV) Heuristik genannt, und das most-constrained Prinzip (SMITH et al. 2000). Im Vergleich zu den metaheuristischen Ansätzen der Lösungssuche z. B. lokale oder populationsbasierte Suchverfahren, liefern prioritätsregelbasierte Lösungsverfahren zwar schlechtere Ergebnisse, haben jedoch den Vorteil, dass der zur Erzeugung zulässiger Pläne notwendige Rechenaufwand relativ gering ist (GEIGER 2005). Im Rahmen der Ablaufplanung existiert eine Vielzahl an Prioritätsregeln, nach denen konkurrierende Arbeitsgänge priorisiert und somit in eine Bearbeitungsreihenfolge gebracht werden, z. B. FIFO, viele Nachfolger, kurze Prozessdauern, etc. (GEIGER 2005). Diese Prioritätsregeln können ebenso wie die verschiedenen Zielkriterien zur Planung von Produktionsprozessen (siehe Tabelle 3) als Grundlage zur Entwicklung weiterer sinnvoller Variablenordnungsstrategien genutzt werden.

Tabelle 3: Mögliche Zielkriterien der Bauprozessplanung (Märki et al. 2007)

Ressourcenausgleich	Sicherheit	Sonstige Ziele
Ressourceneinsatz	Arbeitsflächennutzung	Aktivitätenwechsel
Ressourcenwechsel		Arbeitsortwechsel
Ressourcenunterbrechung		Ressourcenabstand
Ressourcenüberschuss		Zeit-Raum Konflikte

Das Simulationskonzept unter Berücksichtigung von Variablenordnungsstrategien zeigt Bild 2. Alle nicht begonnenen Prozessschritte werden zunächst auf die Erfüllung ihrer Hard Constraints überprüft. Die ausführbaren Schritte werden auf die Erfüllung ihrer Soft Constraints untersucht und ein Soft Constraint Erfüllungsgrad bzw. die Kosten der Constraint Verletzung berechnet (vergleiche Kapitel 2.2).

Anschließend erfolgt die Sortierung der nächsten ausführbaren Schritte nach der Variablenordnungsstrategie, z. B. bei Verwendung der Strategie *Viele Nachfolger* unter Beachtung der Anzahl der direkten Nachfolger des Schrittes. Derjenige Schritt, welcher die Strategie am Besten erfüllt, wird als nächstes zum Start ausgewählt. Bei mehreren gleichwertigen Schritten wird einer von ihnen zufällig gewählt. Seine benötigten Ressourcen und Arbeitsplätze werden gesperrt sowie das notwendige Material zum Verbrauch gekennzeichnet.

Die Prüfung der Prozessschritte wird solange durchlaufen, bis kein weiterer startbarer Schritt zum aktuellen Simulationszeitpunkt ermittelt werden kann und die Simulation wechselt zum nächsten eingetragenen Ereigniszeitpunkt.

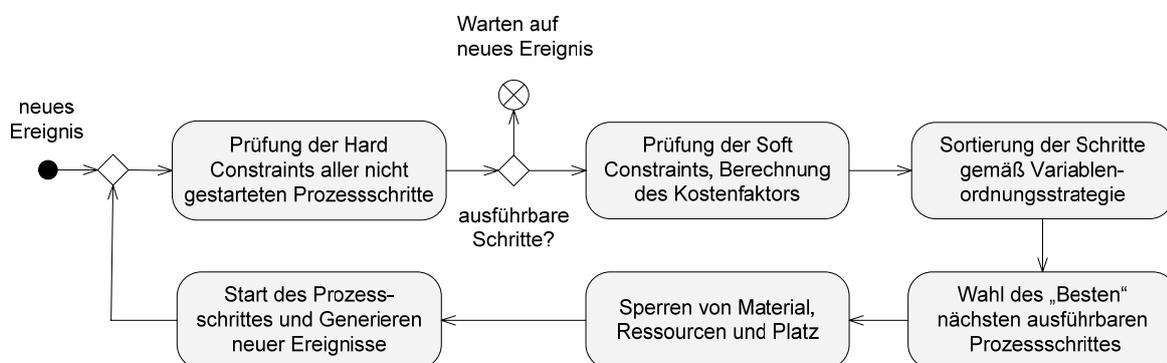
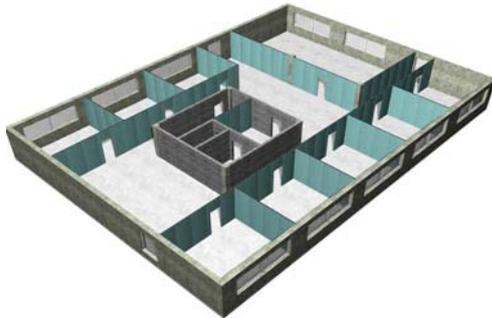


Bild 2 Starten von Prozessschritten mit Berücksichtigung von Variablenordnungsstrategien

4 Fallbeispiel Innenausbau



Im Rahmen der Forschungsaktivitäten der Bauhaus-Universität Weimar wurden die Ausbaurbeiten an einem 4-geschossigen Hochhaus untersucht. Die Grundrisse der 4 Geschosse sind gleich aufgebaut, siehe Bild 3.



Beispielgeschoss (30,52m x 20,93m)

- 13 Trockenbauwände
- 9 Räume
- 13 Fensterbänke
- 9 Innentüren

Bild 3 Grundriss einer Etage des 4-stöckigen Hochhauses

Die Gewerke Boden, Trockenbau, Tischlerarbeiten und Anstrich wurden mit den in Tabelle 4 aufgeführten Ausbaurbeiten simuliert. Auf die Spezifikation der einzelnen Hard Constraints, Simulationseingangsdaten dieser betrachteten Innenbauarbeiten soll hier nicht im Detail eingegangen werden. Für die Herstellung der verschiedenen Ausbauelemente wurden 760 Prozessschritte mit ihren entsprechenden Ausführungszeiten und 4196 technologische Abhängigkeiten zwischen den Prozessschritten generiert. Als Arbeitskräfte wurden acht Trockenbauer, sechs Maler, vier Bodenleger sowie drei Tischler definiert.

Tabelle 4: Gewerke und Arbeiten des vorgestellten Beispiels

Gewerke	Ausbauarbeiten	Verschmutzungsgrad	Gewicht
Boden	schwimmenden Estrich herstellen	schmutzig	4
	Bodenfliesen verlegen	weniger schmutzig	3
	Teppich verlegen	sauber	1
Trockenbau	Installationswände montieren	weniger sauber	2
	abgehängte Decken herstellen	weniger sauber	2
Tischlerarbeiten	Innenfensterbänke einbauen	weniger schmutzig	3
	Innentüren einbauen	sauber	1
Anstrich	Decke anstreichen	weniger sauber	2
	Wände anstreichen	weniger sauber	2

Im Rahmen der Simulationsstudie werden fünf verschiedene Experimente durchgeführt. Zunächst eine Monte Carlo Simulation mit 2000 Simulationsläufen. In weiteren Experimenten sollen die folgenden Variablenordnungsstrategien untersucht werden:

- *Längste Schritte zuerst*,
derjenige Schritt mit der längsten Ausführungsdauer wird als nächstes zum Start gewählt
- *Kürzeste Schritte zuerst*,
derjenige Schritt mit der kürzesten Ausführungsdauer wird als nächstes zum Start gewählt
- *Viele Nachfolger zuerst*,
derjenige Schritt mit vielen direkten Nachfolgern wird als nächstes zum Start gewählt
- *Wenige Nachfolger zuerst*,
derjenige Schritt mit den wenigsten direkten Nachfolgern wird als nächstes zum Start gewählt

Die Experimente unter Berücksichtigung der Ordnungsstrategien können mit einer verringerten Anzahl an Simulationsläufen durchgeführt werden, da der Lösungsraum bereits gezielt durchsucht bzw. eingeschränkt wird. Tabelle 5 zeigt die unterschiedlichen Experimente und die Anzahl ihrer Simulationsläufe.

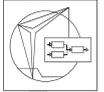


Tabelle 5: Simulationsexperimente

Exp. Nummer	Auswahlstrategie	Anzahl der Simulationsläufe
Exp01	Monte Carlo Simulation	2000
Exp02	<i>Längste Schritte zuerst</i>	200
Exp03	<i>Kürzeste Schritte zuerst</i>	200
Exp04	<i>Viele Nachfolger zuerst</i>	200
Exp05	<i>Wenige Nachfolger zuerst</i>	200

Im Rahmen aller Experimente wird der Gesamtkostenfaktor infolge Verletzung der Strategie *Verschmutzung vermeiden* ermittelt und dient zur Bewertung der Planungsalternativen. Innerhalb der Auswahl der nächsten auszuführenden Prozessschritte werden die Kostenfaktoren nicht berücksichtigt. Zu jedem Simulationslauf wird die Nettogesamtausführungszeit (makespan, in Tagen) sowie der Gesamtkostenfaktor (strategy costs, –) protokolliert. Die Ergebnisse der Läufe sind in den Bildern 4 bis 8 dargestellt, sowie in Tabelle 6 aufgeführt.

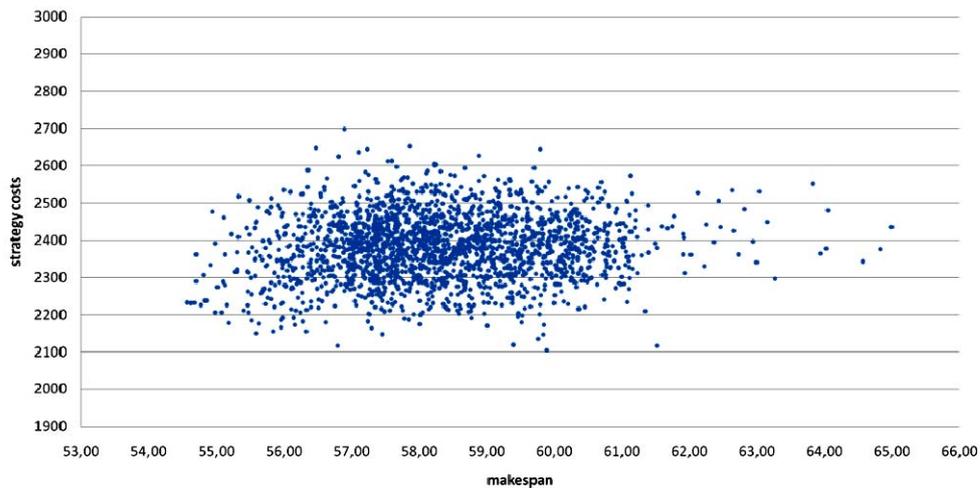


Bild 4 Exp01 – Monte Carlo Simulation

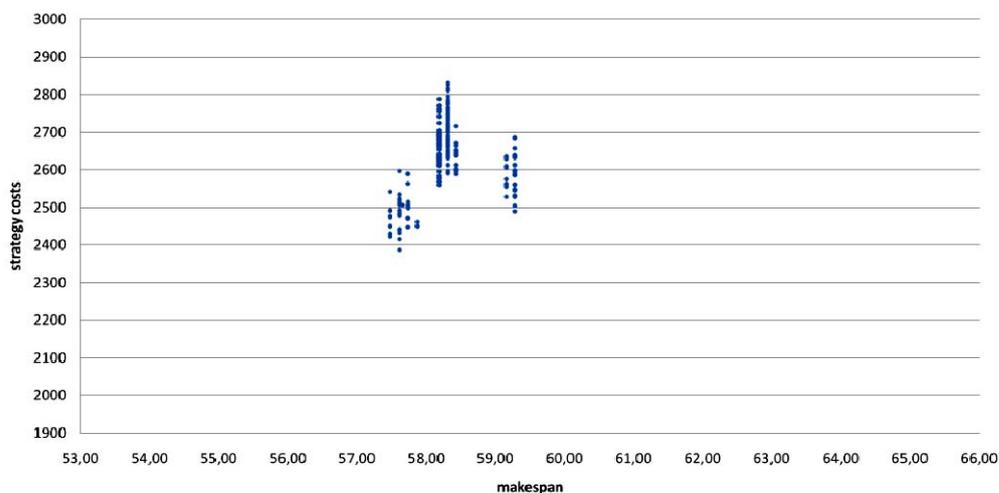


Bild 5 Exp02 – *Längste Schritte zuerst*

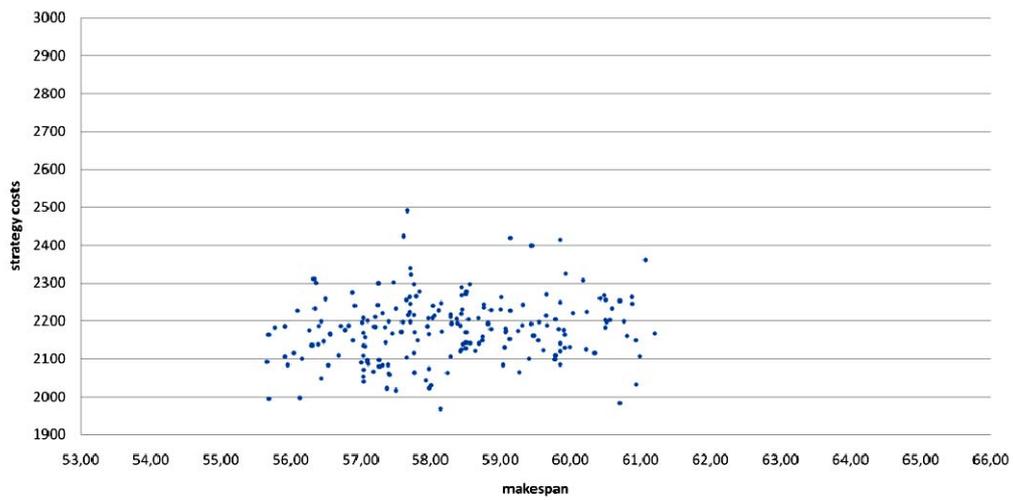


Bild 6 Exp03 – *Kürzeste Schritte zuerst*

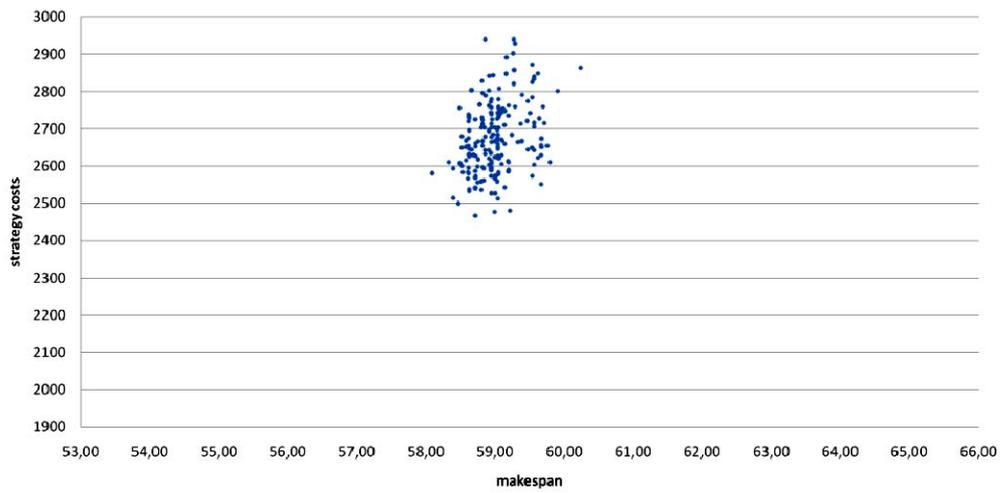


Bild 7 Exp04 – *Viele Nachfolger zuerst*

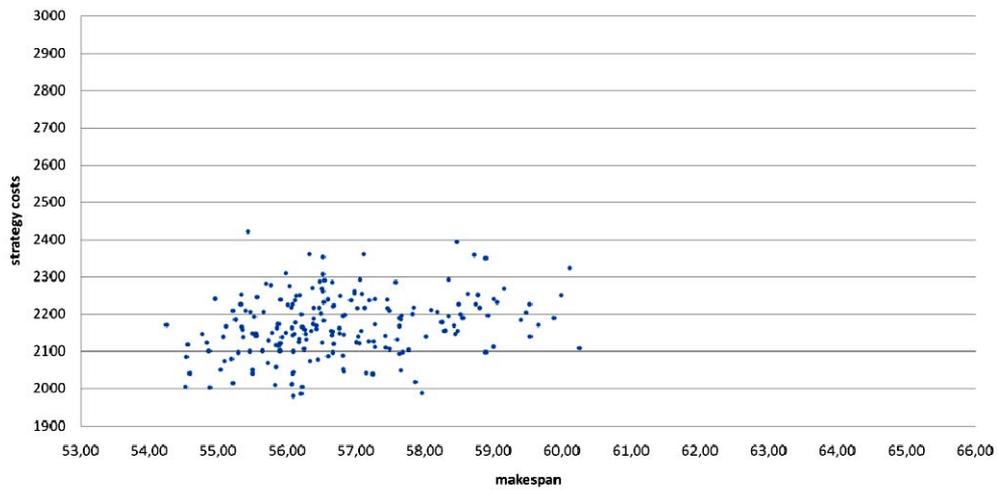


Bild 8 Exp05 – *Wenige Nachfolger zuerst*

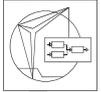
Tabelle 6: Ergebnisse der Simulationsexperimente

Ergebnisse ↓	Exp.Nr. →	Exp01	Exp02	Exp03	Exp04	Exp05
min. Ausführungsdauer [dd:hh:min]		54:13:31	57:11:31	55:15:51	58:02:01	54:05:51
max. Ausführungsdauer [dd:hh:min]		64:23:51	59:06:41	61:04:51	60:05:41	60:05:51
mittlere Ausführungsdauer [dd:hh:min]		58:07:59	58:06:50	58:06:10	59:00:03	56:18:11
Standardabweichung Dauern		36,01 h	11,19 h	33,08 h	8,22 h	30,44 h
min. Kosten [-]		2105,0	2387,75	1968,31	2467,64	1980,68
max. Kosten [-]		2699,0	2823,63	2491,01	2940,37	2421,92
mittlere Kosten [-]		2382,0	2633,00	2178,00	2676,30	2169,00
Standardabweichung Kosten		86,9	96,30	84,80	94,50	83,50

Die Monte Carlo Simulation liefert eine Vielzahl unterschiedlicher Lösungen. Die minimale Nettogesamtausführungszeit beträgt ca. 54 d 13 h, die Maximale annähernd 65 d. Die Durchführung einer Monte Carlo Simulation ist sehr zeitaufwendig, so dass im Rahmen des vorliegenden Beitrags verschiedene Variablenordnungsstrategien untersucht wurden, um die Effizienz der Suche zu erhöhen. Die Variablenordnungsstrategien *Kürzeste Schritte zuerst* und *Wenige Nachfolger zuerst* liefern im vorliegenden Fall schnell gute Lösungen mit Hinblick auf die Ausführungsdauern der ermittelten Alternativen. Die Standardabweichung der Ausführungsdauer innerhalb eines Experimentes ist jedoch sehr hoch. Im Gegensatz dazu liefern die Ordnungsstrategien *Längste Schritte zuerst* und *Viele Nachfolger zuerst* Ablaufalternativen mit erhöhten Resultaten für die Ausführungsdauern, die Standardabweichungen der Experimente fallen jedoch deutlich geringer aus. Für das vorliegende Beispiel liefern die Ordnungsstrategien *Längste Schritte zuerst* und *Viele Nachfolger zuerst* gute Ergebnisse zur ersten Abschätzung der Größe der Lösungen. Die Ordnungsstrategien *Kürzeste Schritte zuerst* und *Wenige Nachfolgern zuerst* zur anschließenden Ermittlung geeigneter Lösungen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

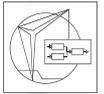
Eine Vielzahl an Prioritätsregeln der Ablaufplanung sowie Zielkriterien der Bauprozessplanung können als Variablenordnungsstrategien definiert werden. Im Rahmen des Constraint-basierten Simulationsansatzes können die Ordnungsstrategien genutzt werden, um die Suche auf einen spezifischen, erfolgversprechenden Teil des Suchbaumes zu beschränken. An einem Beispiel wurde gezeigt, dass die Lösungssuche mit Hilfe von Variablenordnungsstrategien effizient durchgeführt werden kann. Um jedoch Aussagen bzgl. der Anwendungstauglichkeit spezifischer Strategien im Bauwesen treffen zu können, sind diese Strategien an weiteren Beispielen zu prüfen. Für die zukünftige Arbeit scheint insbesondere die weitere Verbesserung der Lösungssuche interessant. Hier sollten neben weiteren sinnvollen Variablenordnungsstrategien ebenso metaheuristische Verfahren untersucht werden.





6 Literatur

- BELDICEANU, N.; PETIT, T. (2004): Cost Evaluation of Soft Global Constraints. In: RÉGIN, J.-C.; RUEHER, M. Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimization Problems, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
- BEIßERT, U.; KÖNIG, M.; BARGSTÄDT, H.-J. (2007): Constraint-Based Simulation of Outfitting Processes in Building Engineering. Proceedings of the CIB 24th W78 Conference, Maribor, Slovenia, pp. 491–497
- BEIßERT U.; KÖNIG M.; BARGSTÄDT H.-J. (2008): Execution strategy investigation using soft constraint-based simulation. IABSE Conference, Information and Communication Technology (ICT) for Bridges, Buildings and Construction Practice, Helsinki, Finland
- FREUDER E. C.; WALLACE R. (1992): Partial constraint satisfaction. Artificial Intelligence 58, pp. 21–70
- KÖNIG, M.; BEIßERT, U.; STEINHAEUER, D.; BARGSTÄDT, H.-J. (2007): Constraint-Based Simulation of Outfitting Processes in Shipbuilding and Civil Engineering. Proceedings of the 6th EUROSIM Congress on Modeling and Simulation, Ljubljana, Slovenia
- ROSSI, F.; VAN BEEK, P.; WALSH, T. (2006): Handbook of Constraint Programming. 1st ed., Elsevier, Amsterdam
- STEINHAEUER, D. (2006): Simulation in Shipbuilding – Supporting Shipyard Planning, Production Planning and Product Development. 12. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik – SIGRID WENZEL (Hrsg.), Society for Modeling and Simulation International and SCS Publishing House e.V., San Diego/Erlangen, pp. 1–14
- SAUER, J. (2004): Intelligente Ablaufplanung in lokalen und verteilten Anwendungsszenarien. B.G. Teubner Verlag, Wiesbaden
- MÄRKI, F.; FISCHER, M.; KUNZ, J.; HAYMAKER, J. (2007): Decision Making for Schedule Optimization. CIFE Technical Report #169
- GEIGER, M.J. (2005): Multikriterielle Ablaufplanung. DUV Gabler Edition Wissenschaft, Wiesbaden
- SMITH, D.E.; FRANK, J.; JÓNSSON, A.K. (2000): Bridging the Gap between Planning and Scheduling. In Knowledge Engineering Review, 15(1), pp. 61–94
- TSANG, E. (1993): Foundations of Constraint Satisfaction. Academic Press, London
- HOFSTEDT, P.; WOLF, A. (2007): Einführung in die Constraint-Programmierung – Grundlagen, Methoden, Sprachen, Anwendungen. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
- SMITH, S.F.; BECKER, M.A. (1997): An Ontology for Constructing Scheduling Systems. AAAI Technical Report, pp.120–129



Simulation – von der prozeduralen zur objektorientierten Modellierung

Nachdem heutzutage die Verfügbarkeit von Rechnerleistung in der Regel kein einschränkendes Kriterium darstellt, gewinnen Methoden der Simulation in der Abwicklung von Bauprojekten immer mehr an Bedeutung. Nachdem der Einsatz von solchen Verfahren von reiner Visualisierung bis hin zu komplexen mathematischen Methoden reicht, soll in diesem Artikel der Versuch unternommen werden, die Grundlagen und Abgrenzungen zu beschreiben.

Ganz allgemein gilt Simulation als ein Verfahren, hochkomplexe Situationen, die sich einer analytischen Formulierung entziehen, adäquat zu beschreiben und zu untersuchen. Dieser Gedanke setzt bereits die Begrifflichkeit „komplexer“ Situationen voraus, die noch nicht quantitativ vorliegt, jedoch sich umgekehrt gerade aus der Notwendigkeit oder Praktikabilität des Einsatzes von Simulationsverfahren ergeben kann. Entsprechend ist diese Frage zunächst zurückzustellen und es sind stattdessen zunächst die Grundlagen von Beschreibungen und Formulierungen von Problemstellungen, wie sie in der Abwicklung von Bauprojekten vorliegen, zu erörtern.

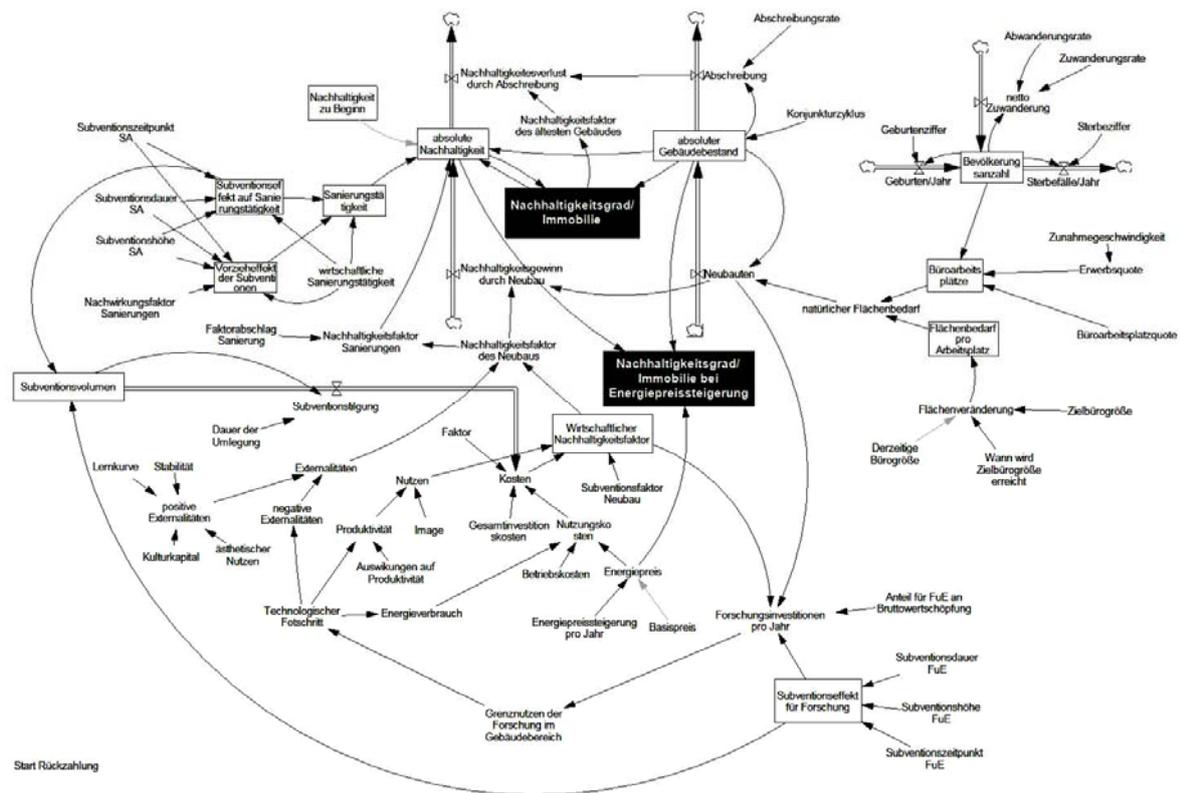


Bild 1 Simulation eines Ausschnittes des Immobilienmarktes [1]

Zunächst ist dabei festzustellen, dass der Begriff Simulation außerordentlich weit gefasst werden kann: Im Wortsinne ist Simulieren jede Methode, die erlaubt, an einem Modell das Verhalten einer Wirklichkeit zu studieren und damit eine künftige Entwicklung zu prognostizieren. Die Wirklichkeit könnte dabei z. B. die Abwicklung eines Bauprojektes, die Stabilität einer Brücke oder die Rentabilität einer Immobili-



lie sein. Entsprechend ist ein Ablaufplan, realisiert als Karton-Rechtecke, die auf einem Maßband als Zeitachse verschoben werden im gleichen Sinne eine Simulation, wie eine Berechnungsformel aus dem Bereich des Massiv- oder Stahlbaus oder auch eine Abzinsungsrechnung aus der Betriebswirtschaft. In diesem Zusammenhang ist auch eine reine Visualisierung eine Simulation, in dem sie eine künftige Wirklichkeit, nämlich das visuelle Aussehen eines Prozesses sichtbar macht, ohne dass der Prozess in der Realität schon ablaufen müsste. Dies vorweg genannt stellt sich allerdings schon die Notwendigkeit, den Begriff der Simulation enger zu fassen um die zugehörigen Methoden konkret werden zu lassen. Das soll auf der Basis von grundlegenden Formulierungen von Aufgaben geschehen. Im Übrigen sind erkennbare Parallelen zu Computersprachen durchaus beabsichtigt und richtig. Das liegt daran, dass insbesondere für Aufgaben, die ein Rechner ausführen soll, eine vollständige und eindeutige – oft daher auch stark formalisierte – Beschreibung der Aufgabe notwendig ist, eine adäquat vorauszusetzenden Bedingung für die Beschreibung von Aufgaben der Organisation, etwa eines Bauprojektes.

Imperative Formulierungen

Eine sehr grundsätzliche Methode der Beschreibung ist die imperative oder prozedurale Darstellung. Sie setzt voraus, dass aus einem gegebenen Zustand durch eine feste Abfolge von Aktionen sicher ein erwünschter neuer Zustand erreicht werden kann. Um diesen zu erhalten ist es nicht notwendig, die Historie der Methode und die Gründe für deren Entwicklung zu verstehen oder überhaupt zu betrachten. Es genügt völlig, die Anweisungen präzise zu befolgen. Dabei können Parameter der aktuellen Situation durchaus in die Folge von Anweisungen eingehen und in Form von Abfragen deren Lauf beeinflussen, um den lokalen Gegebenheiten Rechnung zu tragen.

Typische Beispiele aus dem Bauwesen sind etwa die Herstellung von Beton vor Ort. Dabei ist der Rezeptur bezüglich der Mischungsverhältnisse zu folgen und die Randbedingungen, z. B. der Umgebungstemperatur sind einzuhalten. Damit kann sichergestellt werden, dass der hergestellte Beton den Vorgaben entspricht. Die chemischen Zusammenhänge, die zur Entwicklung der Rezeptur geführt haben sind dabei für den Anwender ohne Belang.



Bild 2 Schalungseinsatzplan als imperative Formulierung

dann in Abhängigkeit davon die Transportbetriebe, also die Folgebetriebe ausgelegt. Auch dieses Vorgehen folgt einer klaren sequentiellen Abhängigkeit: Es wird davon ausgegangen, dass es richtig ist, den Ladebetrieb ohne Rücksicht auf umgebende Betriebe festzulegen.

In gleicher Weise hat der Schalungsbetrieb z. B. beim Umsetzen einer Deckenschalung von einem Stockwerk zum nächsten nur exakt den Vorgaben des Schalungsplanes zu folgen, um sich einer optimalen Auslegung hinsichtlich Zeit und Kosten sicher zu sein. Insbesondere ist das Improvisieren unbedingt zu vermeiden, da ja eine Optimierung bereits vorgenommen wurde und im Schalungsplan niedergelegt ist.

Schließlich sei noch die Leistungsberechnung eines Erdbaubetriebes als Beispiel angeführt. Im Sinne einer Prozedur wird dabei zunächst der Leitbetrieb, etwa der Lader, dimensioniert und

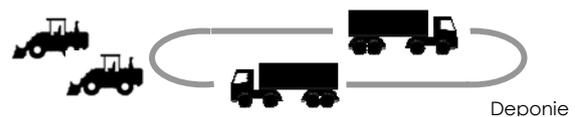
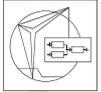


Bild 3 Prozedurale Leistungsermittlung mit Leitbetrieben

All diesen Vorgehensweisen ist gemeinsam, dass sich jemand mit der Situation im Allgemeinen befasst hat und daraus die allgemeingültige Prozedur, vergleichbar einem Rezept, mit ihren Randbedingungen

entwickelt hat. Damit wird den Ausführenden der Prozedur die Notwendigkeit erspart, sich mit den Hintergründen des Verfahrens jedes Mal erneut zu beschäftigen.



Simulationen auf dieser Ebene sind alle Rechenverfahren, alle Normen, aber auch alle standardisierten Planungsprozeduren. Möglicherweise ist der interessanteste Aspekt daran, dass solche Prozeduren sich überhaupt in Methoden der Simulation einordnen lassen, sie bieten aber keinen wesentlichen Neuwert und sollen daher im Folgenden nicht näher betrachtet werden.

Deklarative Formulierungen

Wesentlich interessanter sind Formulierungen, die gerade „noch nicht gedachte“ Zusammenhänge greifbar machen. Der Mensch hat sich ja zwar, wo notwendig, auf vorgefertigte Prozeduren zurückgezogen, im Bereich des kreativen Denkens wirken jedoch völlig andere Mechanismen. Insbesondere ist es dem menschlichen Geist möglich, auf der Basis einer Vielzahl von bekannten Tatsachen und deren durch Lernen erfahrenen möglichen Verknüpfungen zu neuen Kombinationen zu kommen, die bisher noch nicht „gedacht“ wurden. Ein Ansatz dieser Art ist als deklarative oder deskriptive Darstellung bekannt: Hierbei wird lediglich eine Situation durch eine Anzahl Fakten und deren Zusammenhänge beschrieben, normalerweise durch weitere Fakten aus einem Allgemeinwissen ergänzt und dann die Frage nach neuen Kombinationen gestellt, die mit der Situation verträglich sind. Die Methode, all diese neuen Kombinationen zu finden, ist etwas aufwendig und unter der Bezeichnung „Backtracking“ bekannt. Sie besteht im Wesentlichen aus einer vollständigen Suche aller kombinatorisch möglichen Situationen auf Kompatibilität mit allen Fakten und Zusammenhängen und Verwerfen der unzulässigen Lösungen, vergleichbar dem Sieb des ERATOSTHENES.

Dieses etwas „akademisch“ anmutende Verfahren hat im Bauwesen durchaus seine Entsprechungen: Jeder Plan oder jede funktionale Ausschreibung ist in diesem Sinne nicht prozedural, sondern deklarativ zu verstehen: Das erwartete Ergebnis wird in Auszügen dargestellt; die Prozeduren, die die Ausführung möglich machen sind in keiner Weise enthalten sondern Gegenstand der kreativen Aufgabe. Darüber hinaus enthält der Plan auch keine vollständigen Angaben, etwa Informationen über einzuhaltende Normen, Stand der Technik, technische Daten von Geräten, Leistungsansätze von Betrieben etc. liegen nicht vor und müssen aus dem „Allgemeinwissen“ beigesteuert werden.

Die Entwicklung eines konkreten Ablaufes, d. h. die Definition der Folge verschiedener Vorgänge, die lediglich über gemeinsame Ressourcen gekoppelt sind, dient als weiteres Beispiel. Die Beschreibung enthält lediglich die Situation, Entscheidungen über Reihenfolgen und Ressourcen aus Gründen der Optimierung von Kosten oder Projektdauer können aus einer Vielzahl von Möglichkeiten ohne strukturelle Hinweise vorab gefunden, entwickelt und optimiert werden. Als Beispiel wäre etwa die Reihenfolge der Montage der Überbauelemente einer Mehrfeldbrücke mit einem nur zeitweise verfügbaren Mobilkran zu betrachten.

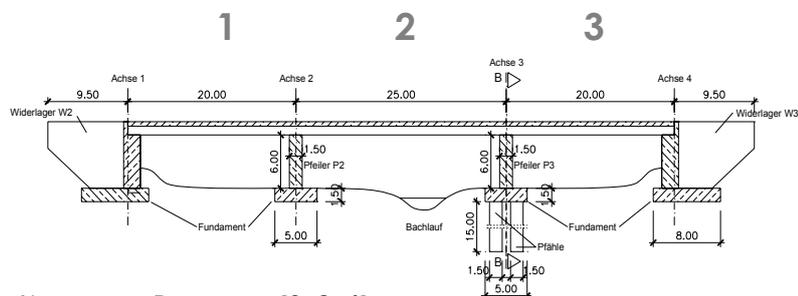
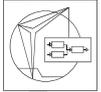


Bild 4 Reihenfolge bei gemeinsamer Nutzung von Ressourcen [2, 3, 4]

In gleicher Weise ist bei der Ermittlung von Risiken im Zuge des Risikomanagements vor dem Hintergrund einer Situation aus einer unendlich großen Vielfalt möglicher denkbarer oder undenkbarer Risiken, die insbesondere „noch nicht gedacht“ sind, zu ermitteln. Dasselbe Prinzip gilt im Übrigen auch bei der Abnahme einer Bauleistung, bei der auf Basis der mängelfreien Bauleistung eine vollständige Überprüfung auf alle „potentiellen“ Mängel vorzunehmen ist.



Konkret findet sich diese Modellierung zum Beispiel im Produktmodell einer Immobilie. Für jedes Bauelement, z. B. des Rohbaus, also Decken, Aussteifungswände und Stützen sind beim Element, dem Objekt selbst, die jeweiligen Eigenschaften, wie relative Position, Material, Tragfähigkeit, Eigengewicht etc. festgehalten. Darüber hinaus sind alle Objekte, die mit dem betrachteten Objekt in einem Zusammenhang stehen, als Referenzen notiert – und darüber hinaus als Methoden, die Informationen über diese Nachbarobjekte abrufen und verarbeiten können. Eine Abfrage an ein Element, z. B. bezüglich der Tragfähigkeit bezieht sich dann sowohl auf eigene Informationen, als auch auf Informationen der darunter liegenden Elemente, die als Methoden verfügbar sind. Auf diese Weise kann eine lokale Abfrage an ein Element durchaus Informationen über den Gesamtzusammenhang liefern, obwohl nur unmittelbare Next-Neighbour-Beziehungen formuliert sind.

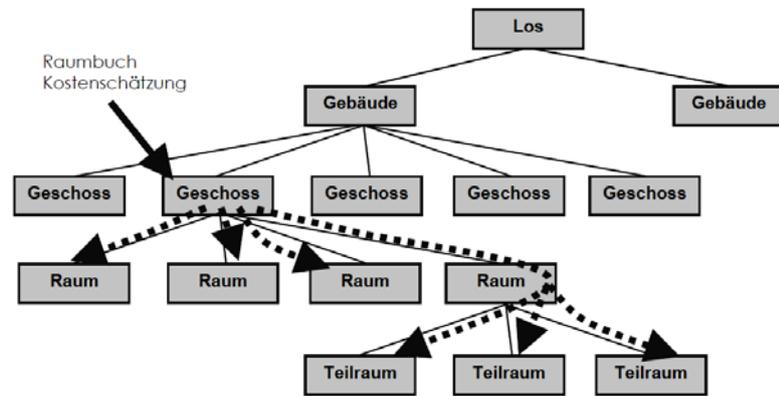


Bild 6 Raumbuch in objektorientierter Formulierung [3]

In gleicher Weise ist die Definition einer Kostenstruktur in Baumform zu verstehen. Jeder Knoten als Objekt ist lediglich mit den direkt übergeordneten Konten und einer Anzahl untergeordneter Konten verbunden. An jedem Knoten stehen nun eigene Kosten als Informationen zur Verfügung, sowie die Methode, dass alle Kosten untergeordneter Knoten ebenfalls zu kumulieren sind. Dann liefert eine Anfrage nach kumulierten Kosten eines Knotens auf einer bestimmten Ebene von selbst die korrekte Sammlung aller in der Struktur tiefer liegenden Knoten.

Die selbe Struktur liegt weiter etwa einem Raumbuch zugrunde: Eine baumförmige Gliederung von Gebäuden in Geschosse, in Räume und in untergeordnete Teilräume erlaubt die Abfrage kumulierter Informationen an jeder Stelle des Baumes unter Berücksichtigung aller relevanter Elemente, obwohl auch hier lediglich lokale Beziehungen und Methoden modelliert sind.

Schließlich bietet sich die klassische Ablaufplanung als Beispiel an. Eine Vielzahl von Vorgängen wird lediglich mit den jeweils nächsten Nachbarn durch Anordnungsbeziehungen verknüpft. Eine Information über eine konkrete Terminierung eines Vorganges kann nicht über die Informationen des jeweiligen Vorganges allein, d. h. seine Dauer, erhalten werden. Allerdings sind über die Beziehungen zu den nächsten Nachbarn, also die Anordnungsbeziehungen, die Termine der Vorgänger ermittelbar, woraus sich lokal die Terminierung in frühester Lage berechnen lässt. Allerdings müssen auch die Vorgänger dazu ihre eigene Terminierung ermitteln, was über die gleichen Methoden, mithin also rekursiv bis zum Projektbeginn erfolgt.

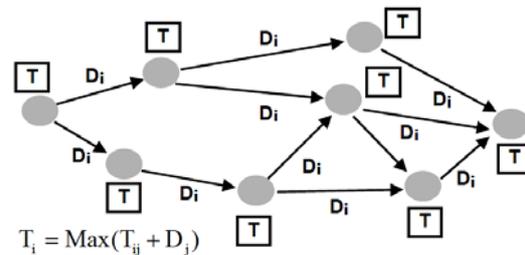


Bild 7 Objektorientierte Terminierung von Ablaufplänen [4]

Im Übrigen bezeichnet man, aufbauend auf der „Objektorientierten Formulierung“, als eine „Prozessorientierte Formulierung“ gerade eine objektorientierte Beschreibung, bei der als Objekte ausschließlich Prozesse zugelassen sind.

Offensichtlich ist diese objektorientierte Formulierung für die Simulation im engeren Sinn am besten geeignet. Für viele Situationen ist es nicht möglich, **a priori** übergreifende Prozeduren festzuschreiben, die unter allen Umständen optimale Resultate liefern. Darüber hinaus kann durch eine Modellierung der Situation im Sinne einer deklarativen Formulierung keine eindeutige Weiterentwicklung der Situation als Prognose ermittelt werden. Es ist jedoch in vielen Fällen möglich, die Situation als eine Menge



von Objekten zu beschreiben und dabei festzulegen, mit welchen anderen Objekten diese interagieren und auf welche Weise. Insbesondere, nachdem diese Interaktionen jeweils auf den nächsten Nachbarn beschränkt sind, ist anzunehmen, dass genau diese Beziehungen wohl verstanden und gut und eindeutig formulierbar sind. Die Modellierung findet also auf einer rein lokalen Ebene statt. Das emergente Verhalten des Gesamtsystems, sowohl hinsichtlich einer zeitlichen wie auch einer kausalen Entwicklung, folgt dann aus der Rekursion der lokalen Methoden.

Strukturbindung, Rekursion und Iteration

Allerdings stellt sich bei einer Modellierung eines emergenten Verhaltens durch rein lokale Methoden ein wesentliches Problem heraus: Jede Rekursion erfordert eine wohl definierte Struktur der Objekte, um sicherzustellen, dass Ergebnisse zu erhalten sind und nicht Endlosschleifen die Entwicklung des Systems blockieren. Insofern ist die vorteilhafte Seite der rein lokalen Modellierung wieder hinfällig, wenn dennoch übergreifend feste Strukturen einzuhalten sind. Rekursion als Kumulation in einer Baumstruktur, wie oben beschrieben, setzt die Definition des Baumes voraus, nämlich dass von jedem Knoten exakt ein Pfad zum Quellknoten führt. Andernfalls ist mit Mehrfachkumulationen zu rechnen, also das Gesamtergebnis nicht mehr nachvollziehbar korrekt. Genauso muss für einen Ablaufplan eine korrekte Netzplanstruktur, also insbesondere die Kreisfreiheit gefordert werden, um Zirkelschlüsse bei der Terminierung zu vermeiden.

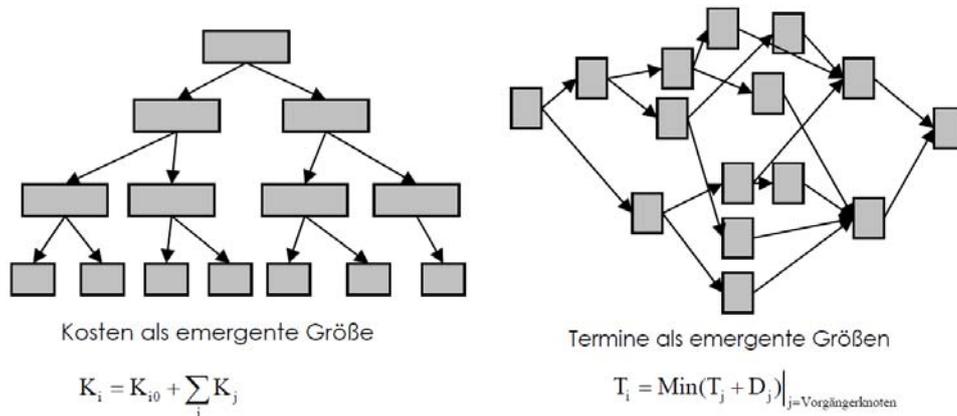


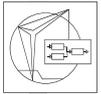
Bild 8 Strikte Strukturvorgaben als Voraussetzung für objektorientierte Formulierungen [2, 3]

Die Lösung dieses Dilemmas bietet nun gerade ein bekanntes Grundprinzip der Simulation, das damit allerdings zur Forderung erhoben wird: Die Rekursion wird durch Iteration ersetzt. Dann ruft nicht eine Methode eines Objektes die implizit vorausgesetzte Methode des Nachbarobjektes auf. Stattdessen wird in zufälliger Reihenfolge jede Methode nur auf den betroffenen nächsten Nachbarn angewandt, ohne Rücksicht darauf, was diese Aktion im Gesamtzusammenhang bewirkt. Dann wird erwartet, dass sich das Gesamtsystem im Laufe der Zeit so einstellt, dass alle Methoden keine Veränderungen hervorrufen und damit das System stabil bleibt.

Diese Vorgehensweise ist in der Planung von Bauvorhaben durchaus üblich, wenn auch nicht immer offensichtlich. Als Beispiel dient der Algorithmus von FORD zur Terminierung von Vorgängen, wie er wohl in den meisten Terminierungsprogrammen implementiert ist:

Zur Vereinfachung wird zunächst vorausgesetzt, dass die Vorgänge durch Anordnungsbeziehungen verbunden tatsächlich einen Netzplan bilden, also definitionsgemäß eine kreisfreie Struktur bilden. Später soll dann die Befreiung von dieser Randbedingung diskutiert werden.

Dann wird zunächst jedem Vorgang ein – nicht korrekter – Starttermin, etwa 0 zugewiesen. Mangels bekannter Struktur wird nun in einer zufälligen Reihenfolge für alle Vorgänge ein „verbesserter“ Termin berechnet, der sich aus rein lokal vorhandenen Informationen und denen der nächsten Nachbarn zusammensetzt. Er wird gebildet als das Maximum der Endtermine aller Vorgänger. Bei dieser Festle-



gung wird keine Rücksicht darauf genommen, ob damit dann etwa zuvor berechnete Abhängigkeiten von der vorigen, veralteten Terminierung damit ungültig werden. In jedem Fall wird durch eine solche vollständige Berechnung die Terminierung aller Vorgänge verbessert. Entsprechend wird die Berechnung iterativ wiederholt, wobei zu erwarten ist, dass nach einer endlichen Anzahl von Wiederholungen keine Änderungen mehr ergeben. Damit werden auch keine gültigen Beziehungen mehr zerstört und das System, hat sich stabilisiert.

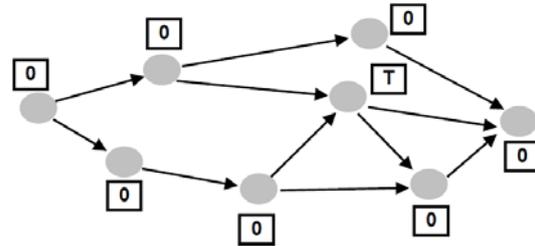


Bild 9 Iterative Rangerechnung nach FORD als Simulation [4]

Liegt nun für einen solchen Netzplan keine kreisfreie Struktur vor, so bilden sich naturgemäß Endlosschleifen und das System entwickelt sich nicht in einen stabilen Grenzzustand. Diese kritische Einschränkung stellt sich jedoch näher analysiert nicht als Einschränkung, sondern als wesentliche Erweiterung dar. Korrekterweise wird eine Rangberechnung nach dem Algorithmus von FORD, in der lediglich die kausale Reihenfolge anstelle der Termine berechnet wird, zu unendlichen Rängen führen, weil sich ein Vorgänger einer Aktivität zugleich über Umwege auch als deren Nachfolger herausstellt. In diesem Fall liegen aber über die fehlende Kreisfreiheit bezüglich der kausalen Reihenfolge tatsächlich widersprüchliche Angaben vor, die die Simulation richtigerweise mit einem unendlichen Ergebnis für einen Rang wiedergibt. Genau genommen liefert die Simulation also richtige Resultate, auch unter sich ganz oder teilweise widersprechenden Abhängigkeiten. Ein einfaches Beispiel soll diesen Sachverhalt weiter verdeutlichen:



Bild 10 Auswirkungen von widersprüchlichen Interaktionen, Simulationsunschärfen

Angenommen, in einem Ablaufplan wird eine normale Abhängigkeit eines Vorgangs „Schalung schließen“ zu einem Nachfolger „Betonieren“ formuliert. Dann wird eine Simulation sich bei Terminen stabilisieren, bei denen der Nachfolger zum Ende des Vorgängers startet. Eine zweite Anordnungsbeziehung gleichen Inhaltes, aber vom Nachfolger aus als Beziehung zum Vorgänger formuliert, führt schon bei der Rangberechnung aufgrund des Zirkelschlusses zu nicht berechenbaren Rängen. Eine Terminbestimmung jedoch liefert ein unverändert korrektes Ergebnis, weil sich die beiden Anordnungsbeziehungen nicht widersprechen, also stets zu dem Zeitpunkt an welchen sie durch die Simulation berechnet werden, die gleiche Wirkung haben. Werden die beiden Anordnungsbeziehungen jedoch mit einem gewissen Widerspruch definiert, etwa die erste mit einem absoluten (nicht minimalen) Zeitabstand von 30 min, die zweite mit einem absoluten Zeitabstand von 60 min, so bleibt die Simulation funktionsfähig. Allerdings wird der Abstand der beiden Aktivitäten bei jeder Berechnung der entsprechenden Beziehung von seiner zeitlichen Position aus um die Differenz verschoben. Das Resultat ist also eine Terminierung mit einer gemittelten Unschärfe, die genau der in den widersprüchlichen Beziehungen formulierten Differenz entspricht. Darüber hinaus werden ebenfalls alle anderen Vorgänge, die ihrerseits an die unscharfen Aktivitäten gebunden sind, als Konsequenz ebenfalls entsprechende Unschärfen aufweisen. Es kann also festgehalten werden, dass auch hier die Simulation mit einer Frequenz, die dem inhärenten Iterationszyklus der Simulation entspricht, Ergebnisse liefert, die exakt den Vorgaben folgen, mithin richtig sind, soweit das zugrunde liegende Modell richtig ist. Ein massiver Widerspruch, der das Gesamtsystem scheitern lässt, wird demzufolge auch durch ein völlig instabiles Simulationsmodell wiedergegeben, ein minimaler Widerspruch, der in der Wirklichkeit kaum Konsequenzen hat, wird im Simulationsmodell ebenfalls durch eine Unschärfe der gleichen Größenordnung abgebildet.



Demzufolge ist es tatsächlich möglich, Systeme, deren emergente Zusammenhänge nicht erkennbar sind, durch rein lokale Modellierung darzustellen und das emergente Verhalten durch Messungen am System zu analysieren. Allerdings zeigen die obigen Ausführungen, dass dabei stets eine detaillierte Untersuchung von simulationsimmanenten (nicht systemimmanenten) Charakteristika kontinuierlich notwendig ist, weil eine Beobachtung des Stabilisierungsverhaltens erst eine Qualifikation der Ergebnisse möglich macht. Das betrifft einerseits die Untersuchung der zeitlichen Stabilitätsentwicklung, die aus den angesprochenen Ungereimtheiten folgen und die auf ein vorgegebenes Maß begrenzt werden müssen. Auf der anderen Seite sind die zeitlichen Reaktionen der Simulation auf Veränderungen ein Maß für die Aussagekraft der Ergebnisse, die durch den Iterationszyklus und den Abstand von einem stabilen Zustand, also einer Lösung, wesentlich beeinflusst wird. An dieser Stelle ist also ein Maß für die notwendige oder erwartete Stabilität des Systems im „eingeschwungenen“ Zustand zu definieren und zu überwachen.

Zur Illustration sei ein kleiner Ausschnitt aus der Simulation eines homogenen Dienstleistungsmarktes im Baugewerbe angeführt. Bekanntlich müssen sich Angebot und Nachfrage, jeweils modelliert durch im Allgemeinen nichtlineare Funktionen, im Gleichgewicht befinden. Entsprechend ist der Fixpunkt zu suchen, ein oft aufgrund der nichtlinearen Funktionen nicht analytisch lösbares Problem.

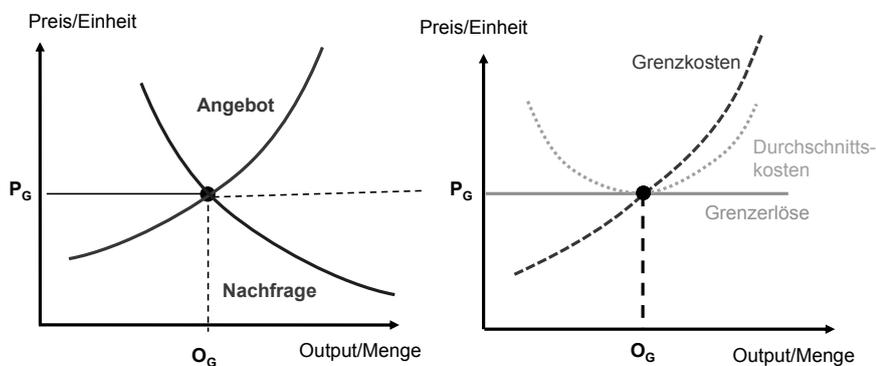


Bild 11 Gleichgewichtszustand zwischen Angebot und Nachfrage in einem homogenen Markt [5]

An diesem Beispiel können sehr anschaulich die Konsequenzen einer iterativen Betrachtung verdeutlicht werden, wenn zunächst vorausgesetzt wird, dass der Markt selbst beliebig schnell reagiert. Hier sollen die beiden Verläufe durch die Funktionen Tangens und Kosinus repräsentiert werden, was unmittelbar zur einer nicht analytisch auflösbaren Gleichung $\tan \Phi = \cos \Phi$ führt. Ein graphischer Ansatz fördert schnell die Lösungen zutage, eine Simulation modelliert wie oben gezeigt einige Objekte zusammen mit deren unmittelbaren Beziehungen: Ein Objekt Φ steht für den gesuchten Winkel, die Objekte $\cos \Phi$ und $\tan \Phi$ unterhalten eine einfache Beziehung zum Objekt Φ , welche aus der jeweiligen Rechenvorschrift folgt. Ein weiteres Objekt δ bildet sich aus der Differenz der beiden Funktionen und schließlich wird das Objekt Φ durch diese Differenz moduliert.

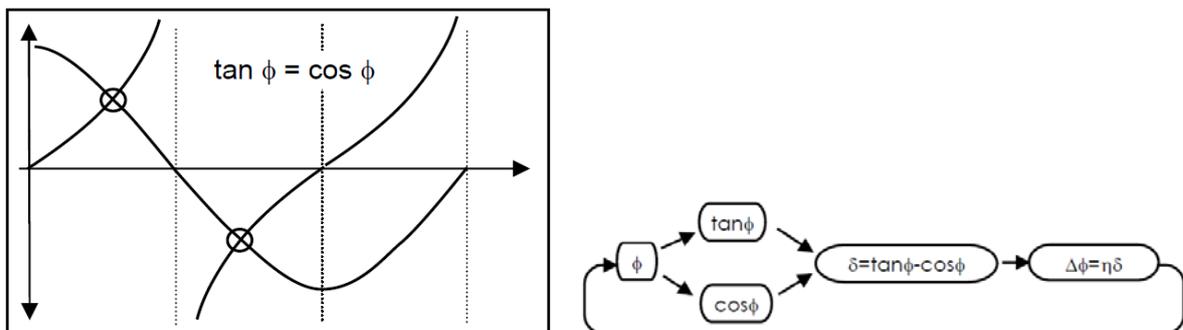


Bild 12 Fixpunkt einer analytisch nicht auflösbaren Funktion

Dieses Modell ist ein Zirkelschluss und wird mit einem zunächst beliebigen Anfangswert für alle Objekte gestartet. Eine zufällige Berechnung aller Beziehungen – die dem Zirkel folgen könnte, aber nicht muss – stabilisiert sich bei einer korrekten Lösung, falls das System in der Lage ist, eine stabile Lösung darzustellen, im Wesentlichen gegeben durch Startwert, Vorzeichen und Skalierung η der Rückkopplung δ . Beispielhaft sind im Folgenden einige Versionen auf der Zeitachse angegeben:

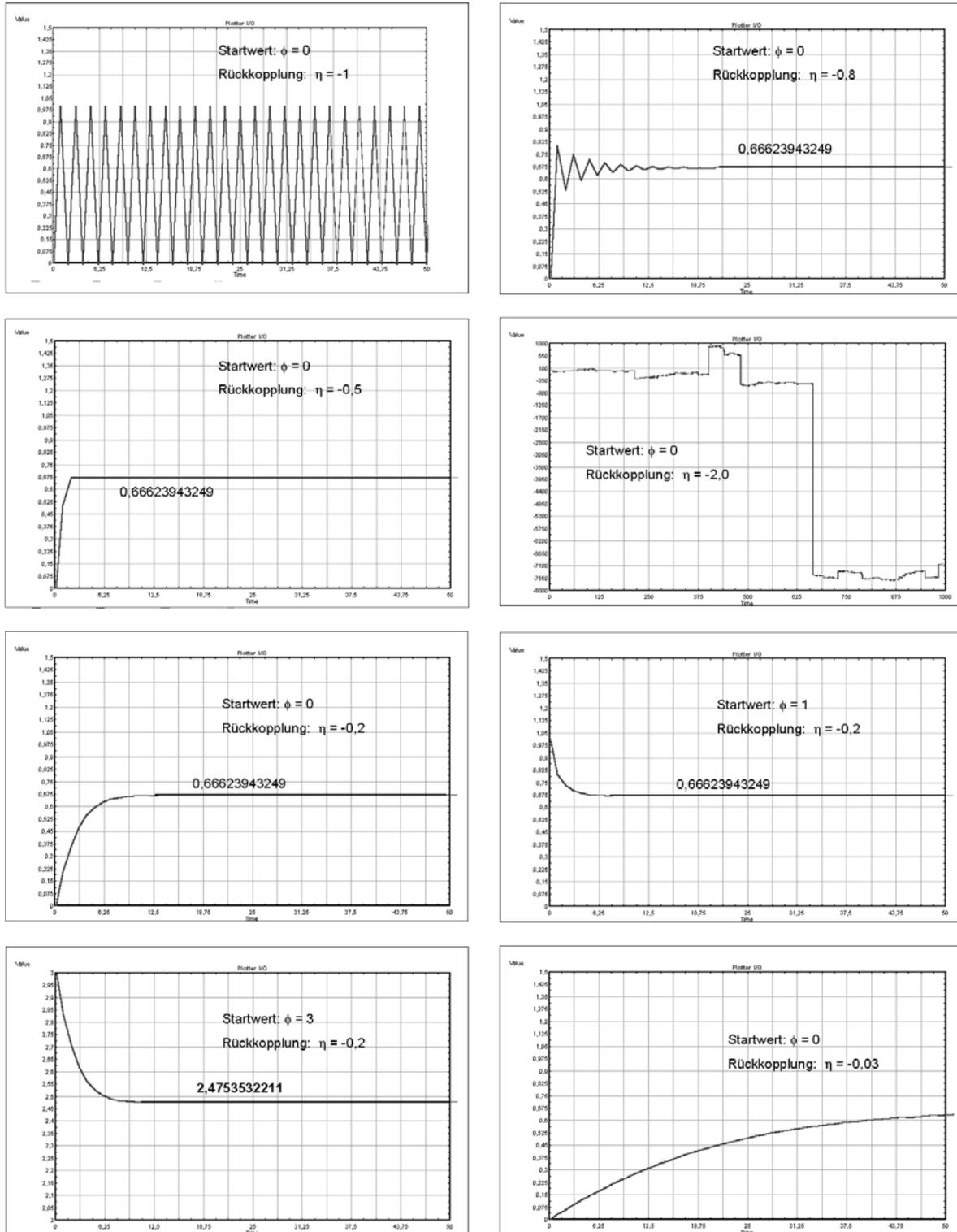
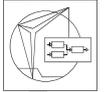


Bild 13 Artefakte aufgrund iterativer Simulation mit endlichen Zyklengeschwindigkeit (Fortsetzung auf der nächsten Seite)

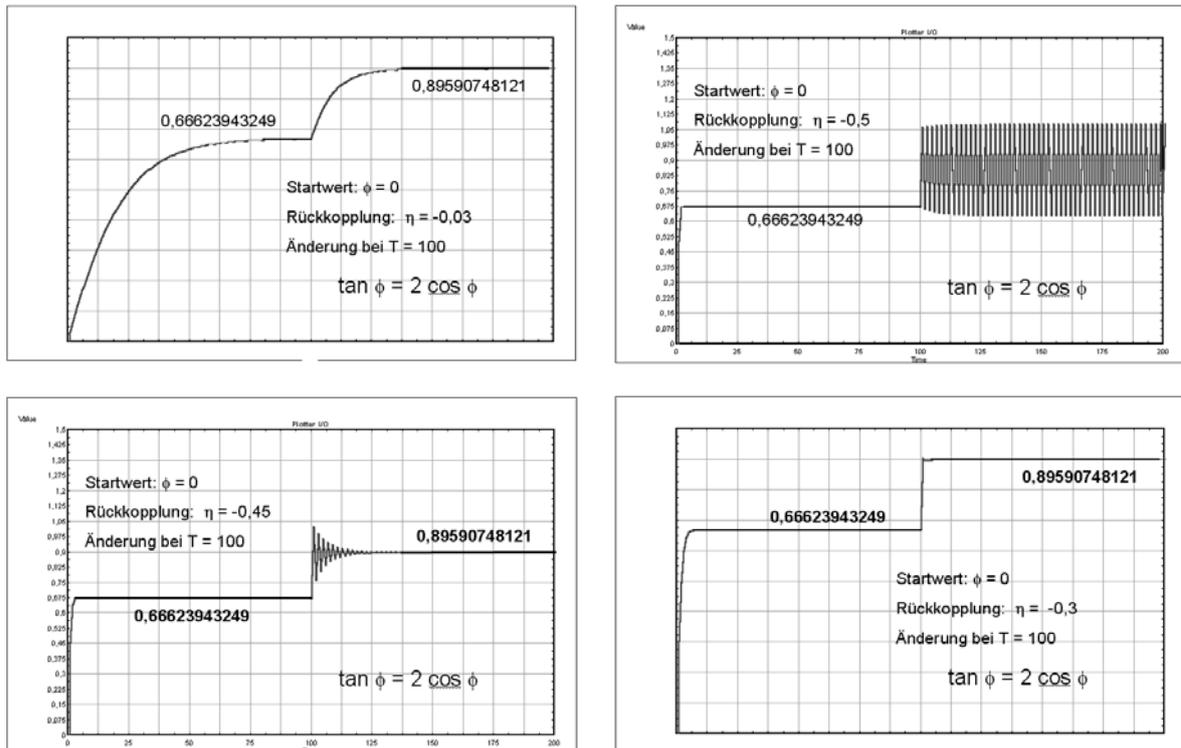
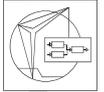


Bild 13 Artefakte aufgrund iterativer Simulation mit endlichen Zyklengeschwindigkeit (Fortsetzung von der vorhergehenden Seite)

Analog zu Artefakten aus der Simulationsmethodik kann das System allerdings auch auf tatsächliche modellierte Zusammenhänge reagieren. Wird etwa die Antwort des Angebotsmarktes auf eine veränderte Nachfrage oder umgekehrt mit einer realistischen Verzögerung aufgrund von Entscheidungswegen, Nachproduktionszeiten, Kapazitätserweiterungen etc. implementiert, so werden vergleichbare Effekte in den Graphen und Darstellungen auftreten, aber nicht mehr Artefakte sein. Damit folgt der zentrale Anspruch der Simulation an den Analysten, nicht nur die korrekten und vollständigen Modelle zu generieren, sondern darüber hinaus die Simulationsantworten aufs Genaueste hinsichtlich ihrer Herkunft als Effekt oder Artefakt zu beurteilen.

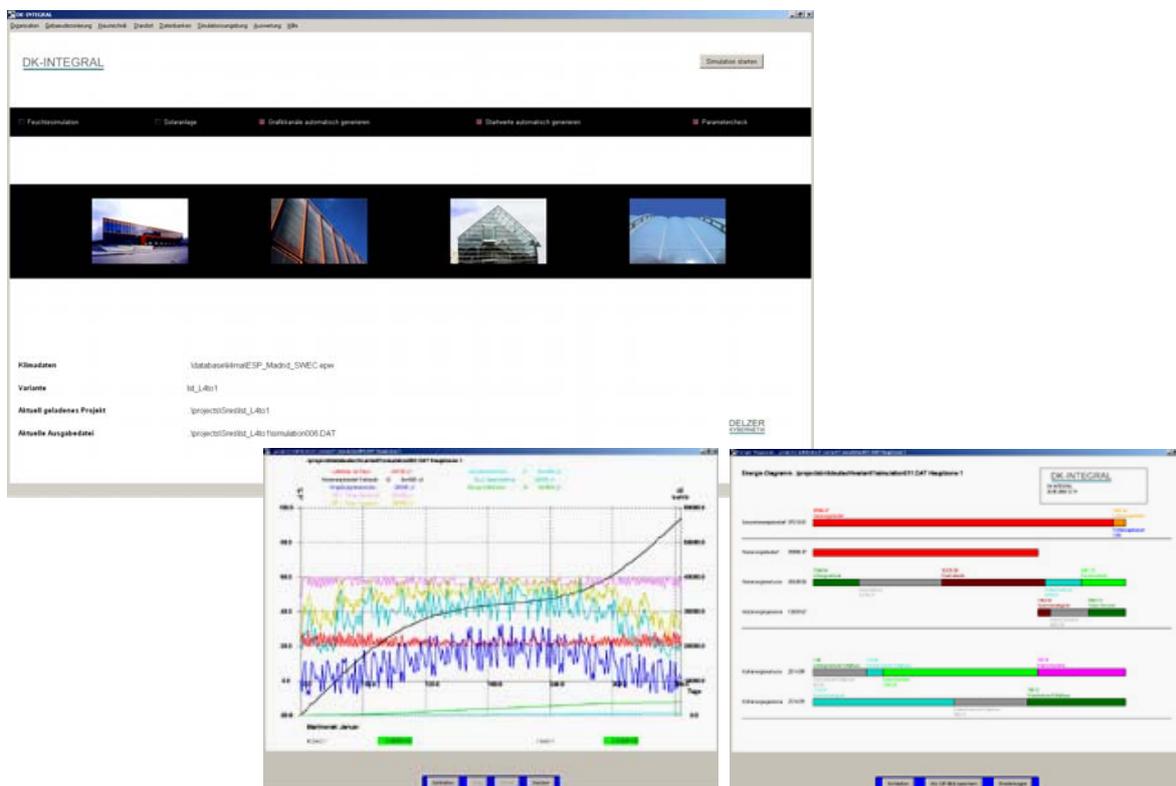
Zurückkehrend zur eingangs gestellten Frage nach der Komplexität von Systemen könnte man nun abschließend folgendes feststellen. Nachdem bis auf weiteres keine **a priori** Definition von Komplexität vorliegt, ist jedenfalls **a posteriori** eine Zunahme dieser Systemeigenschaft von prozeduralen Modellierungen über deklarative Ansätze zur Objektorientierten Beschreibung zu erkennen. Damit ist Komplexität im Organisationswesen – wie auch in der Theorie nichtlinearer Systeme – dadurch geprägt, dass sich das emergente Verhalten des Systems nicht funktional aus einzelnen lokalen charakteristischen Eigenschaften herleiten lässt, sondern tatsächlich nur in der Betrachtung sämtlicher Wechselwirkungen. Entsprechend scheint die objektorientierte Betrachtung für maximal komplexe Systeme geeignet zu sein, wobei die Last der Modellierung dabei zunehmend auf den Schwierigkeitsgrad der Analyse der Ergebnisse verlegt wird.

- [1] „Erklärungsbeitrag für Nachhaltige Immobilienentwicklung Systemtheorie“, Masterarbeit K. WALTZ
- [2] Skript „Kybernetik der Planungsprozesse“, J. ZIMMERMANN
- [3] Skript „Prozessorientierung und Vernetzte Strukturen“, J. ZIMMERMANN
- [4] Skript „Projektentwicklungsformen, Produktions- und Kostenplanung“, J. ZIMMERMANN



DK-INTEGRAL – Simulationssoftware für energieeffiziente Unikate

DK-INTEGRAL ist ein dynamisches Simulationswerkzeug zur Entwicklung energieeffizienter Unikate in den Bereichen Architektur, Materialien und Prozesse. Bereits vor und während dem Modellbau/Prototypenbau können noch nie da gewesene Konzepte und zukunftsweisende Ideen im Simulationsmodell validiert werden. Die Simulationsergebnisse bieten dann eine wichtige Entscheidungsgrundlage für die Umsetzung der besten Variante in die Realität.



Über DK-INTEGRAL

Hinter DK-INTEGRAL steckt die Weiterentwicklung der dynamischen Simulationssoftware DK-Solar, von einem spezifischeren Softwaretool mit Schwerpunkt Solarenergie hin zu einem integralen Simulationswerkzeug für energieeffizientes Bauen.

Überblick über die wichtigsten Features von DK-INTEGRAL

- gekoppelter Wärme- und Feuchtetransport in Bauteilen
- latente Energiespeicherung/PCM Phase Change Material
- Tageslicht und Kunstlicht
- Heizung/ Kühlung/ Lüftung (Hüllflächen/ Hypokausten)
- Solarenergie/ Geothermie/ BHKW/ KWK
- optimierte Regelungstechnik direkt auf Microcontroller umsetzbar



Die Antwort auf anspruchsvolle planerische Anforderungen

Der verantwortungsvolle Umgang mit Ressourcen und die Verminderung der Schadstoffbelastung sind Bereiche, die in Zukunft ständig an Bedeutung gewinnen werden. Architekten und Ingenieure werden in ihrer planerischen Tätigkeit schon heute durch energietechnische und ökologische Aspekte herausgefordert, die in ihren Arbeiten und Entwürfen eine wesentliche Rolle spielen.

DELZER Kybernetik bietet mit DK-INTEGRAL ein Programm an, mit dem sich Auswahl und Dimensionierung aller energietechnisch relevanten Parameter schon im frühen Entwurfsstadium simulieren lassen. Auf diese Weise kann bereits im Entwurf, aber auch im Rahmen einer Modernisierung oder Erweiterung von Bestandsprojekten, das optimale Zusammenspiel eines Gebäudes simuliert und umgesetzt werden. Mittels Simulationsläufen können Parameter für Energieeinsparung und Kostenoptimierung wirklichkeitsnah dargestellt werden. Dabei wird besonders auf die Faktoren Gebäude, Standort, Materialien, technische Anlagen, Energiefassaden, Solarsysteme, Geothermie und Feuchte/Austrocknung eingegangen. Das größte Einsparpotenzial bei den Investitions- und Betriebskosten liegt im optimalen Zusammenspiel dieser Parameter. Dies bildet die Basis für eine erfolgreiche ganzheitliche/integrale Planung.

DELZER Kybernetik verfügt auf dem Gebiet der Energie- und Solartechnik über jahrelange theoretische und praktische Erfahrung. Schon heute wird DK-INTEGRAL von F&E-Firmen zur Produktentwicklung, von Fachleuten, Architekten sowie an vielen führenden Universitäten und Hochschulen erfolgreich eingesetzt. Dank der sicheren Vorhersage energierelevanter Ergebnisse lassen sich Gewerke und technische Anlagen praxisgerecht auslegen und optimal aufeinander abstimmen. Eine Überdimensionierung kann nahezu ausgeschlossen werden.

Validierung

DK-INTEGRAL wird an wissenschaftlichen Instituten und Hochschulen für die Lehre und für Forschungsprojekte eingesetzt. Detaillierte Vergleiche zwischen Bestandsgebäuden und Simulationsergebnissen wurden seit 25 Jahren kontinuierlich durchgeführt und zeigten jeweils sehr gute Übereinstimmung mit der Realität. Auch für gewagte innovative Projekte konnte nach Inbetriebnahme die hohe Übereinstimmung bei Energiebedarf, Gebäudedynamik und Behaglichkeit festgestellt werden (siehe auch folgendes Beispiel des Instituts für Umweltmedizin Freiburg). Zur weiteren Absicherung wurden Tests nach VDI-Richtlinien zur Simulation der Kühlung von Bürogebäuden durchgeführt und zeigten klare Übereinstimmung.

Praxisorientiert und universell einsetzbar

DK-INTEGRAL lässt sich sowohl in den energietechnisch anspruchsvollen Bereichen Denkmalschutz, Altbausanierung und Bauen im Bestand einsetzen, als auch zur Planung zukunftsweisender neuer Gebäudekomplexe. Die Einsatzbereiche erstrecken sich von Privathäusern über Bürogebäude bis hin zu öffentlichen Gebäuden und Sonderbauten mit komplexen Anforderungen an Gebäudeklimatik und Energiemanagement.

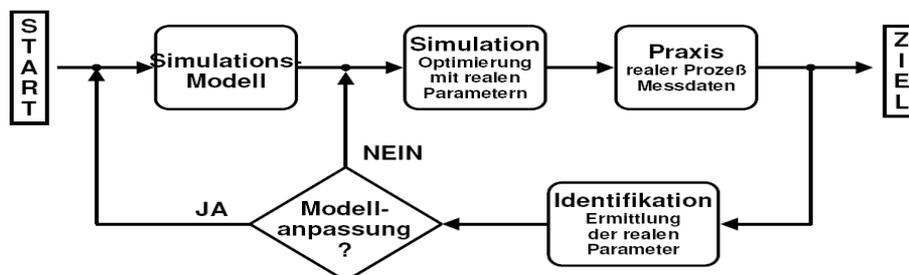
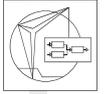


Bild 1 Systematischer Entwicklungsregelkreis für Unikateprozesse mit DK-INTEGRAL



Mögliche Simulationsszenarien mit DK-INTEGRAL:

- Simulation, Auslegung und grafische Dokumentation von Energieversorgung, Anlagen zur Nutzung der Sonnenenergie sowie von Dämm- und Lüftungsmaßnahmen
 - Simulation und vergleichende Darstellung von Gebäudekomplexen mit unterschiedlichen Nutzungszonen
 - Simulation und vergleichende Darstellung von Gebäudeensembles oder von miteinander gekoppelten Gebäuden
- Dadurch können gebäudeklimatisch komplexe Situationen erfasst und effiziente Energiekonzepte entwickelt werden.
- Besondere gebäudeklimatische und bauphysikalische Einflüsse in Sonderbauten können simuliert, gewichtet und im Sinne einer integralen Planung in das energetische Gesamtkonzept integriert werden.

Welche Anforderungen aber auch Möglichkeiten stehen beispielsweise hinter den hohen Innenraumtemperaturen und Luftfeuchtigkeit in Thermal- und Meerwasserbädern oder Tropenhallen?

Wie reagiert das Gesamtenergiekonzept auf großflächige Speicher, wie zum Beispiel die Eislaufflächen (Phase Changing Material) in Eishallen oder Bauteile/Wandschichte mit PCM?

- freie Wahl des Gebäudestandortes (weltweit) und der Gebäudeausrichtung
- freie Anordnung der Bauteile in Winkel und Neigung
- Eine breite Palette von Wärmetransfer-Situationen ist im Detail darstellbar: innere und äußere Flächentemperaturen, Transferschichten.
- flexible Eingabemöglichkeit sehr effektiver Regelungsstrategien für verschiedene Mehrspeichersysteme
- gekoppelte Simulation von Anlagentechnik und Gebäude zur Berücksichtigung der solaren Gewinne und der Wechselwirkungen von Kollektoranlage/Geothermie und Gebäudeverhalten
- Einbeziehen von Topographie und Beschattung
- Berücksichtigung interner Wärme- und Kältequellen
- Berücksichtigung des Nutzerverhaltens
- benutzerdefinierte Simulationszeiträume
- gebäudeunabhängig: reine Untersuchung von Materialverhalten unter bestimmten Randbedingungen:

Wie reagiert beispielsweise eine Natureisfläche (Material mit unterschiedlichen physikalischen Zuständen, in der Simulation eingegeben als PCM) auf wechselnde Umweltbedingungen?

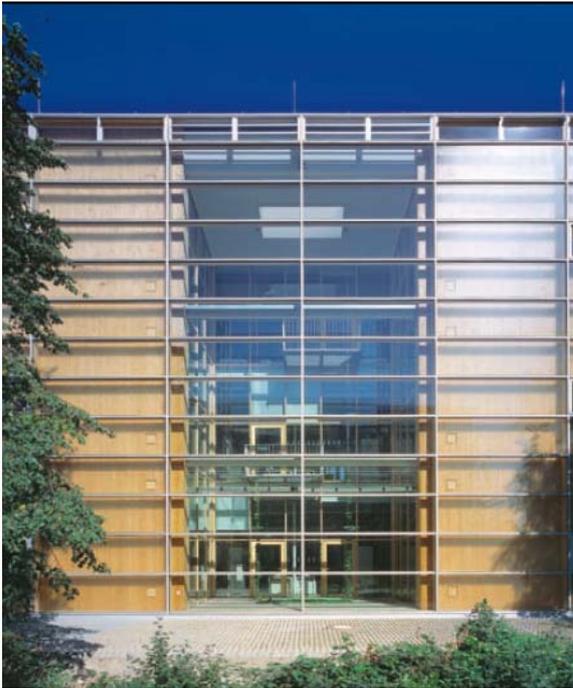
Praxisreport

Anhand von zwei unterschiedlichen Anwendungen werden die Einsatzmöglichkeiten von DK-INTEGRAL exemplarisch verdeutlicht.

1. Anwendungsbereich Architektur „Innovativer Neubau“: Umweltmedizin Freiburg

Die Auftragsabwicklung erfolgte in zwei Stufen:

- Konzeptentwicklung in der Planungsphase,
- Erfolgskontrolle durch Langzeitanalyse nach der Realisierung.



Universitätsklinikum Freiburg

Neubau Institut für Umweltmedizin und Krankenhaushygiene



Baden-Württemberg
VERMÖGEN UND BAU BADEN-WÜRTTEMBERG
UNIVERSITÄTSBAUAMT FREIBURG

PROJEKTBETEILIGTE

Bauherr	Land Baden-Württemberg, vertreten durch Vermögen und Bau Baden-Württemberg, Universitätsbauamt Freiburg
Architekt	Pfeifer Kuhn Architekten, Freiburg bis 30.06.2005 Pfeifer Roser Kuhn Architekten
Technische Gebäudeausrüstung	Ingenieurbüro für Versorgungstechnik Kuder, Flein
Kybernetik	Ingenieurbüro Delzer, Lörrach
Tragwerksplanung	Mohnke Bauingenieure, Denzlingen
Prüfstatik	Dipl.- Ing. Müller, Freiburg
Vermessung	Vermessungsamt der Stadt Freiburg
Bodengutachten	Wibel, Leinenkugel + Partner, Ing.- Gesellschaft, Kirchzarten
Tief- u. Wasserbau	Ing.- Büro Zink, Laufen
Brandschutz	Brandschutzconsult Schreiner, Ettenheim
Bauphysik	Ing.- Büro Rink, Reute
Sicherheits- u. Gesundheitskoordinator	Ing.- Büro Peter, Baden-Baden
Labor- u. Einrichtungsplanung	Universitätsklinikum Freiburg, Geschäftsbereich Technik
Freianlagen	Volker Harbauer, Glottental
Kunst am Bau	Wolfgang Winter, Frankfurt Bertold Hörbelt, Havixbeck
Redaktion u. Herausgeber	Universitätsbauamt Freiburg
Fotos	Guido Kirsch, Freiburg
Gestaltung	woschny grafik design, Freiburg

Energetisches Gesamtkonzept

Die „Umweltmedizin Freiburg“ ist ein Gebäude, das aufgrund seines ganzheitlichen Konzeptes für Architektur und Energieeffizienz in vielen Veröffentlichungen als beispielhaft gelobt wurde.

Mit DK-INTEGRAL wurde das Gesamtkonzept für Büro- und Laborbereich und ein neues Lüftungskonzept für die Bürozone mit natürlicher Lüftung entwickelt, in dem das Raumklima über ein Zusammenspiel zwischen Doppelfassade und Erdregister reguliert werden kann.

Das Erdregister dient Jahreszeitenabhängig als Kälte- oder Wärmequelle, während die Doppelfassade als Energiefassade und Luftkollektor für die Regulierung von Kühlung und Heizung über die natürliche Lüftung genutzt wird.

Natürliche Bürolüftung und Temperierung im Winter

Die Luftkollektoren in der Doppelfassade dienen im Winter zur Erwärmung der Zuluft. Die Zuluft wird durch Abluftwärme mittels Kreislauf/Wärmeverbundsystem oder über das Erdregister vorgewärmt und von unten in die Fassade eingeleitet. Dann strömt sie mäanderförmig durch die Energiefassade im Gegenstrom zur Wärmeleitung von außen nach innen in die Büroräume. Dabei wird sie an Sonnentagen zusätzlich durch die solare Strahlung auf die Fassade erwärmt. Durch dieses Prinzip der Luft-

führung werden auch die Transmissionswärmeverluste, die sonst durch die Bauteile verloren gehen, zum Teil zurückgewonnen.

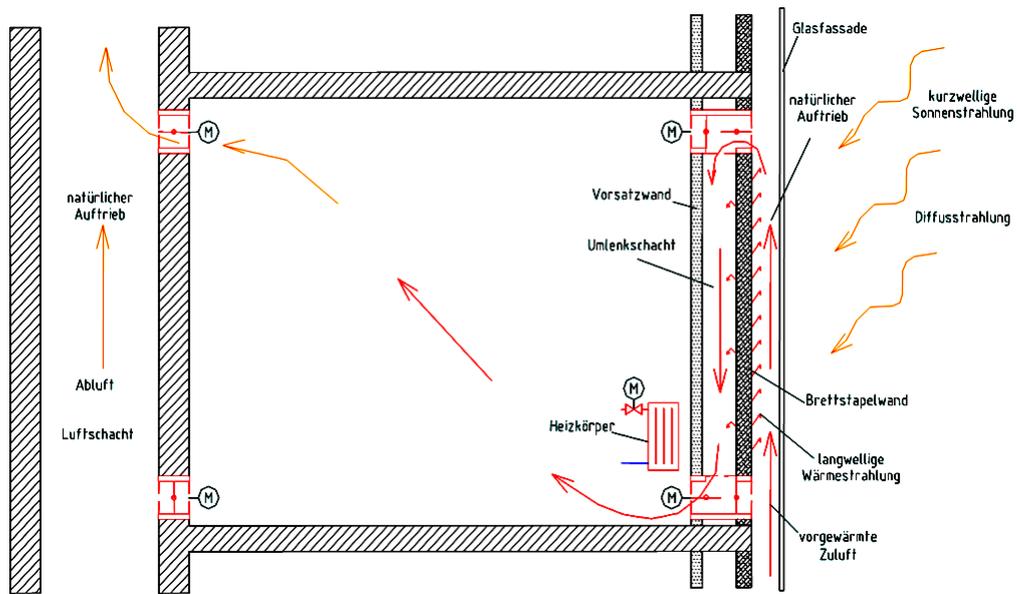


Bild 2 Systematische Darstellung der natürlichen Bürolüftung im Winter im Detail

Natürliche Bürolüftung und Temperierung im Sommer

Im Sommer wird die Zuluft für die Büroräume über das Dach eingeleitet und durch die Erdregisterkälte gekühlt. Dazu fällt kühle Luft, die schwerer ist als warme Luft, durch einen Lufschacht von oben ins Gebäude und verstärkt so die natürliche Lüftung. Wird das Temperaturniveau im Erdregister zu hoch, um die Außenluft auf diese Weise vorzutemperieren, so wird eine Wärmepumpe zugeschaltet.

Der Auftrieb der Luftkollektoren im Sommer verstärkt die Abluft. Die hohen Temperaturen in der Energiefassade würden über die Wärmeleitung der Fassade die Räume zusätzlich erwärmen. Deshalb strömt die Abluft mäanderförmig von Innen nach außen und nimmt so einen Teil des Wärmeeintrages mit und wird dann durch die Luftkollektoren an die Umgebung abgegeben.

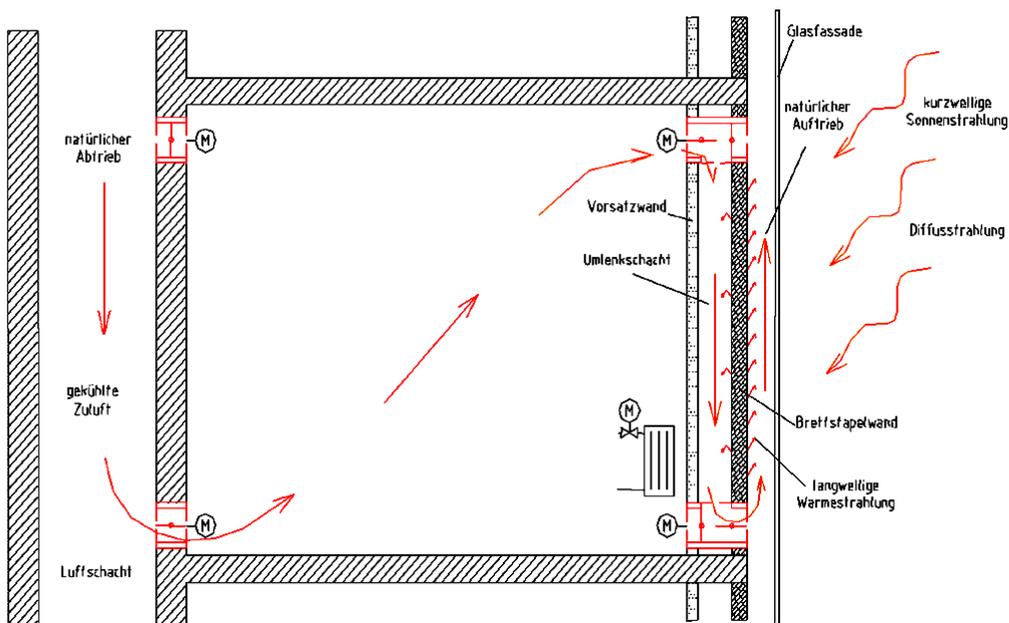


Bild 3 Systematische Darstellung der natürlichen Bürolüftung im Sommer im Detail



Erfolgskontrolle durch Langzeitanalyse nach der Realisierung

Nach der Realisierung des Gebäudes wurde eine Erfolgskontrolle des Konzepts durch Analyse der Gebäudedaten, des Nutzerverhaltens und der Energieverbräuche in den ersten zwei Jahren durchgeführt. Diese Analyse bestätigte die dynamischen Simulationen für das energetische Gesamtkonzept über den Energieverbrauch und die Behaglichkeitsparameter in den Räumen. Vor allem die Genauigkeit der dynamischen Simulationen in Energiebedarf und Temperaturverläufen waren die Basis für eine gute Analyse der Umsetzung und des Nutzerverhaltens.

Die folgende Grafik zeigt für die komplexe Bürozone mit natürlichen Luftströmungen eine sehr genaue Übereinstimmung. Für die Laborzone beträgt die Abweichung ca. 35 % und für den Gesamtenergiebedarf ca. 15 %. Wie aus der Grafik ersichtlich ist, lagen die Simulationsergebnisse aus dem Jahr 2002 insgesamt niedriger als die real erreichten Werte. Diese Abweichungen konnten im Rahmen der Analyse des Nutzerverhaltens durch verstärkte Lüftung in der Laborzone erklärt werden. In der Laborzone wurde der maximale Luftwechsel im Normaltrieb in der Planungsphase von 8 auf 4 halbiert. Mittels rotem Knopf/Turbotaste kann der Luftwechsel im Bedarfsfall von 4 auf 8 angehoben werden. Der rote Knopf wurde häufiger genutzt als angedacht. Hier könnte zum Beispiel eine Luftqualitätsmessung der Schadstoffe das Vertrauen der Nutzer steigern und somit die Turbolüftung weniger häufig aktivieren lassen.

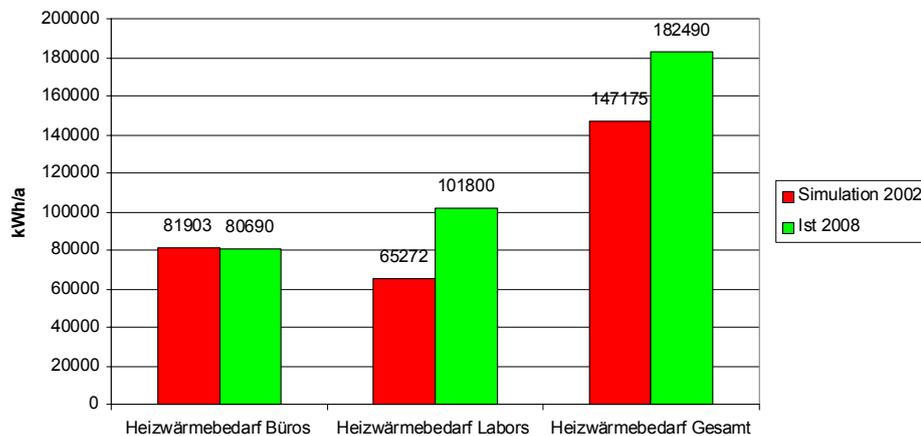


Bild 4 Vergleich Prognose im Jahr 2002 mit Ist-Verbrauch im Jahr 2008

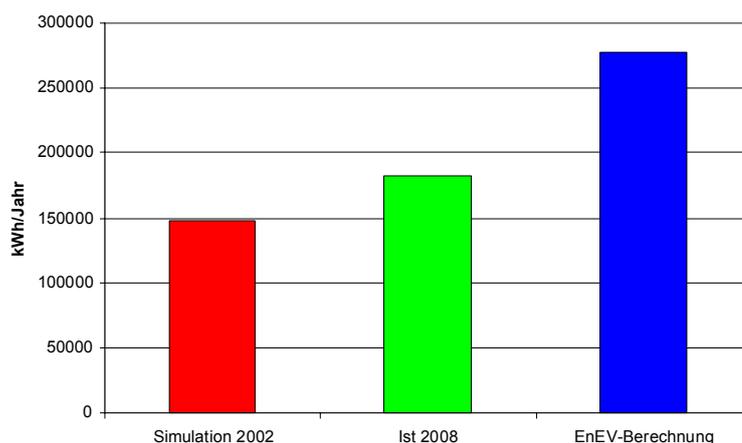
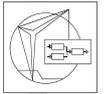


Bild 5 Heizwärmebedarf Gesamt (Vergleich Prognose im Jahr 2002 mit Ist im Jahr 2008)

Während im Vergleich der dynamischen Simulation 2002 zur Realität (Ist 2008) das Optimierungspotenzial im Bereich des Nutzerverhaltens bereits numerisch zu erkennen ist, ist dieses Potenzial im Vergleich hierzu bei der statischen EnEV-Berechnung nicht zu erkennen. Durch die rechnerische Unge-

naugigkeit weichen die errechneten Werte so dramatisch nach oben ab, dass der Nutzer sich sogar trotz der in der Analyse deutlich gewordenen Mängel zu seinen (nach EnEV Berechnung) unerwartet positiven Verbräuchen beglückwünschen könnte. Dabei **bleiben** real vorhandene Potenziale zur Kosten- und Verbrauchsoptimierung ungenutzt.



2. Anwendungsbereich Forschung:

Forschungsprojekt Innerstädtische Systembauweisen der Universität Weimar

Kooperationsprojekt Professuren Stahlbau, Architektur, Bauklimatik, Gebäudetechnik,
Frau Prof. SCHULZ, THOMAS WAHLBUHL, JULIANE ROß

Studie zur effektiven Sanierung von Stadthäusern im Bestand, Altbauten und Gebäuden unter Denkmalschutz der Bauhaus Universität Weimar mit DK-INTEGRAL.

Um die Vergleichbarkeit bei den Simulationsergebnissen zu gewährleisten, sollten alle Untersuchungen mit einem Programm durchgeführt werden, damit Modellierungsunterschiede oder andere Randbedingungen das Ergebnis nicht verfälschen. Mit DK-INTEGRAL steht ein dynamisches Simulationsprogramm zur Verfügung, das diese Vielfalt realitätsnah abbildet.

Untersucht wurde der Einsatz unterschiedlicher Fassadenmaterialien an einem innerstädtischen Gebäude-Prototypen. Alle untersuchten Varianten entsprachen demselben Energiestandard KfW-Effizienzhaus-55 und hatten gleiche U-Werte der Hüllflächen. In der statischen Berechnung sind die Ergebnisse aller Varianten unter diesen Randbedingungen identisch. Die dynamische Simulation mit DK-INTEGRAL zeigte dagegen aufgrund des unterschiedlichen Speicherverhaltens der eingesetzten Materialien deutliche Unterschiede in den Ergebnissen.

Untersuchte Varianten mit massiven Bauteilen:

- Variante 1a: Gipskartonplatte, Kalksandstein Planelement, Mineralwolldämmung
- Variante 1b: Gipskartonplatte, Kalksandstein Planelement, Lehmbauplatte
- Variante 1c: PCM-Gipskartonplatte, Kalksandstein Planelement, Mineralwolldämmung
- Variante 1d: Gipskartonplatte, Kalksandstein Planelement, Holzfaserdämmung
- Variante 2: Kalksandstein, Gipskarton, Lattung

Untersuchte Varianten ohne massive Bauteile:

- Variante 5a: Gipskartonplatte, Mineralwolldämmung, Mineralwolldämmung
- Variante 5b: Gipskartonplatte, Mineralwolldämmung, Mineralwolldämmung, PCM
- Variante 6a: Gipskartonplatte, Mineralwolldämmung, Hoesch-Matrix System

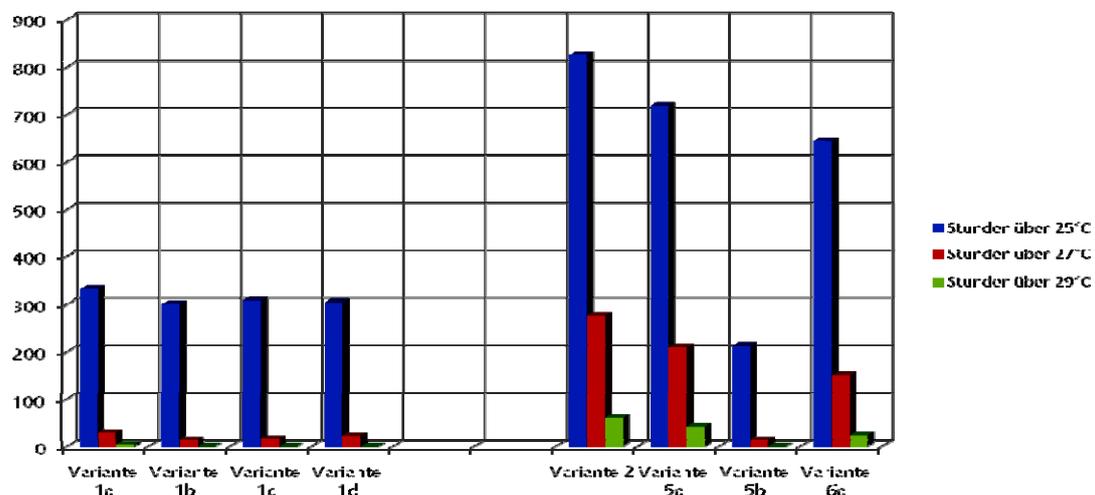


Bild 6 Grafik zur Untersuchung ‚Überheizungsstunden im Sommer‘

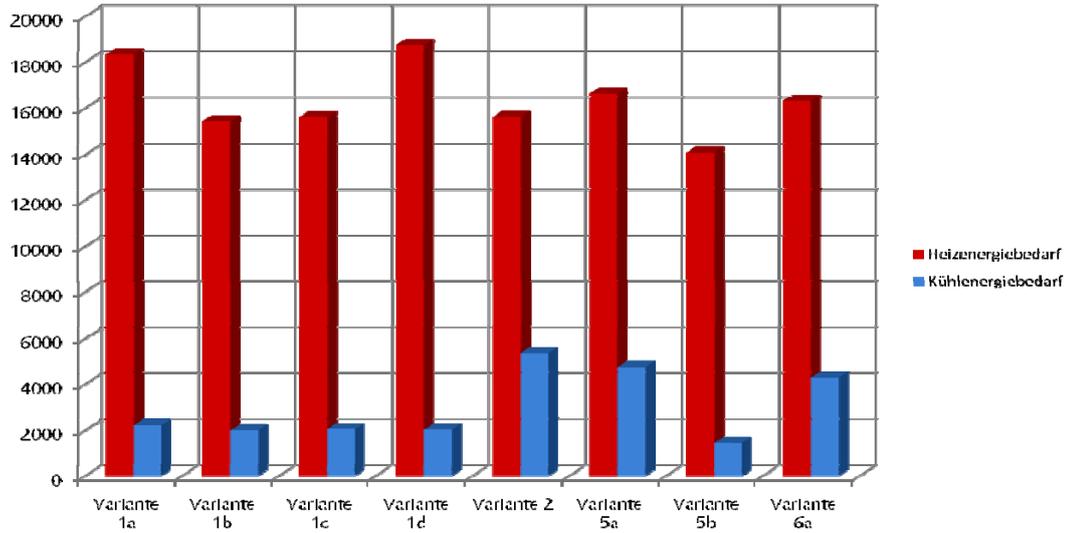


Bild 7 Grafik zur Untersuchung ‚Heiz- und Kühlenergiebedarf‘

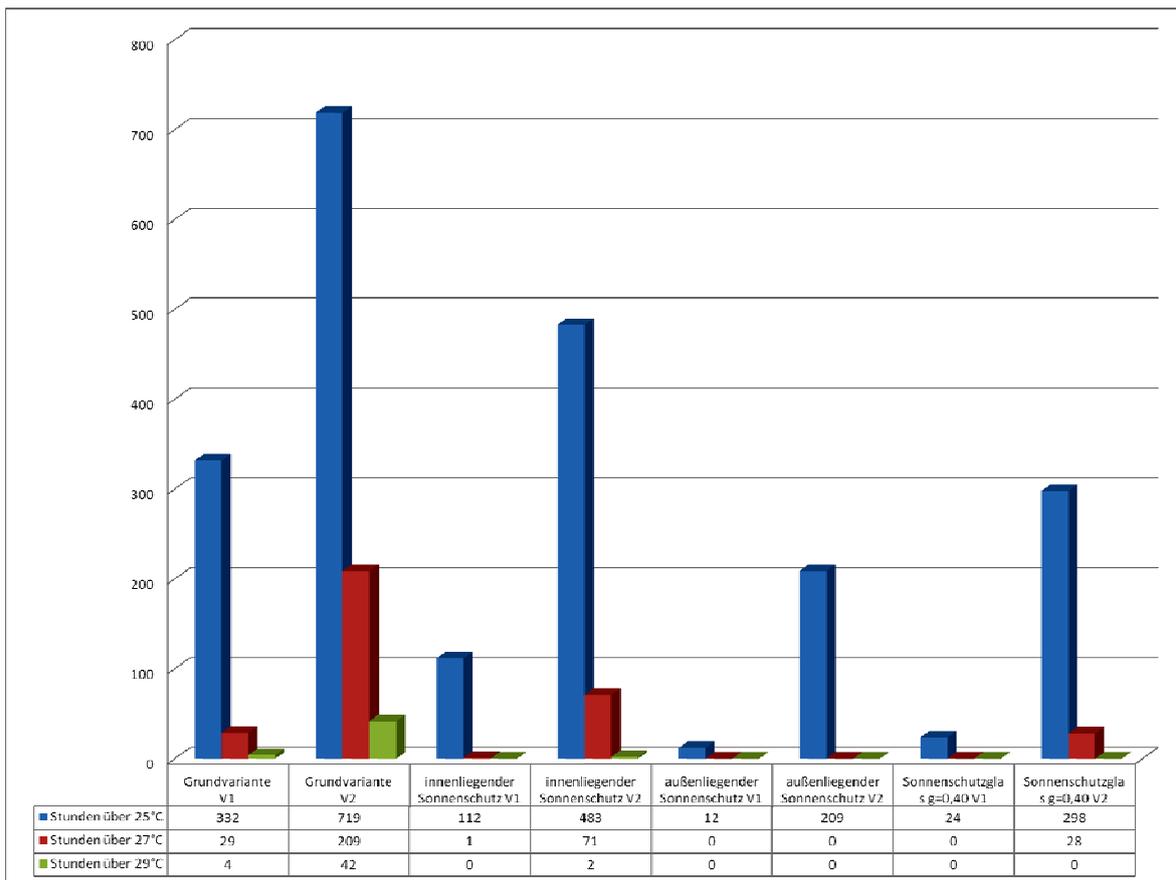
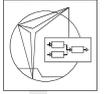


Bild 8 Grafik zur Untersuchung ‚Sonnenschutz‘

Ergebnisse der Studie:



1. Bei gleichem Energiestandard der Varianten kommen unterschiedliche Ergebnisse bezüglich Innentemperaturen im Sommer, Kühl- und Heizenergiebedarf zustande.
2. In Räumen mit Wandaufbauten aus speicherfähigem Material werden im Sommer seltener unangenehm hohe Innenraumtemperaturen erreicht, als in Räumen ohne speicherfähiges Material.
3. Gebäude, welche ohne speicherfähiges Material gebaut werden, brauchen eine zusätzliche Kühlung.
4. In Gebäuden mit speicherfähigem Material lassen sich bei unangenehm hohen Außentemperaturen auch ohne außen liegenden Sonnenschutz akzeptable Innenraumtemperaturen erreichen. Diese Erkenntnis ist besonders für denkmalgeschützte Gebäude oder Gebäude in historischen Innenstädten mit Gestaltungsaufgaben interessant. Hier ist ein außen liegender Sonnenschutz häufig unzulässig.

Autor:

Dipl.-Ing. SIEGFRIED DELZER

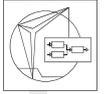
Geschäftsführer

DELZER Kybernetik GmbH

Tuellinger Strasse 90,

D-79539 Loerrach

<http://www.delzer.de/>



Architektur und Bauen 2.0 im Fokus von Simulationsuntersuchungen

Einführung

Heute werden fast alle Bauwerke immer noch mit der 5000 Jahre alten **manuellen** Technik „Stein auf Stein“ oder durch Gießen von Beton in **manuell** gezimmerte oder angeordnete Holzformen erstellt. Die manuelle Fertigung der Schalungen oder des Baukörpers selbst sind

- sehr aufwändig und damit kostenintensiv,
- meist langsam und zeitlich schlecht planbar durch externe Einflüsse wie Witterung, gelieferte Materialien oder plötzlich auftretende Probleme mit angrenzenden Baukörpern,
- in der Qualität durch die manuelle Ausführung nicht immer zufrieden stellend bzgl. Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität,
- in der Wahl der möglichen Formen stark eingeschränkt, Freiformflächen oder abgerundete Kanten sind nur mit massivem Mehraufwand möglich.

Es stellt sich die Frage, ob durch die moderne Automatisierungs- und Computertechnik auch im Baubereich entsprechende Innovationen möglich sind.

Bauen mit dem Prinzip der Stereolithografie

Im Bereich des Musterbaus werden bereits schon seit über 15 Jahren mit dem Verfahren der Stereolithografie¹ beliebig komplexe Prototypen innerhalb von Minuten oder Stunden erzeugt. Dabei werden durch schichtweises Auftragen und Aushärten von plastischen Materialien ebenwise die gewünschten Teile erzeugt (vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Stereolithografie>).

Es ist prinzipiell möglich, die bislang auf etwa 50 x 50 cm große Flächen beschränkte Stereolithografie durch Aufwärtsskalierung auch für Bauten im Maßstab 1:1 anzuwenden. Dabei sind statt der im Musterbau geforderten Genauigkeit von 1/100 mm im Baubereich Genauigkeiten im Millimeterbereich akzeptabel, was die Anforderungen an die Steuerungs- und Regelungstechnik um Größenordnungen senkt.

Der größte Vorteil der Stereolithografie – die Erzeugung beliebig komplexer Geometrien, welche mit normalen spanenden Verfahren nicht produzierbar wären – kann auch im Baubereich komplett umgesetzt werden. Selbst an die Natur angelehnte Architekturen wie die von GAUDI (vgl. http://de.wikipedia.org/wiki/Antoni_Gaud%C3%AD) sind dann ohne Mehraufwand realisierbar (starker Marketingeffekt – stellen Sie sich verschiedene Architekturstile als Haus-Stilangebote vor!).

Analog zur Anwendung im Musterbau können mit einem entsprechenden System im Baubereich ebenfalls vollautomatisch und bis auf einen überwachenden Ingenieur ohne weitere Arbeitskräfte beliebige Formen realisiert werden. Kosteneinsparungen bis 90 % je nach bisheriger Vorgehensweise sollten erreichbar sein.

Die Qualität und Geschwindigkeit des Bauens würden sich zudem dramatisch verbessern, da rund um die Uhr und bei jedem Wetter gebaut werden kann. Die weiteren Auswirkungen volkswirtschaftlicher Art sind gegenwärtig noch vollständig nicht abzuschätzen (vollständige Umorganisation des Bausektors,

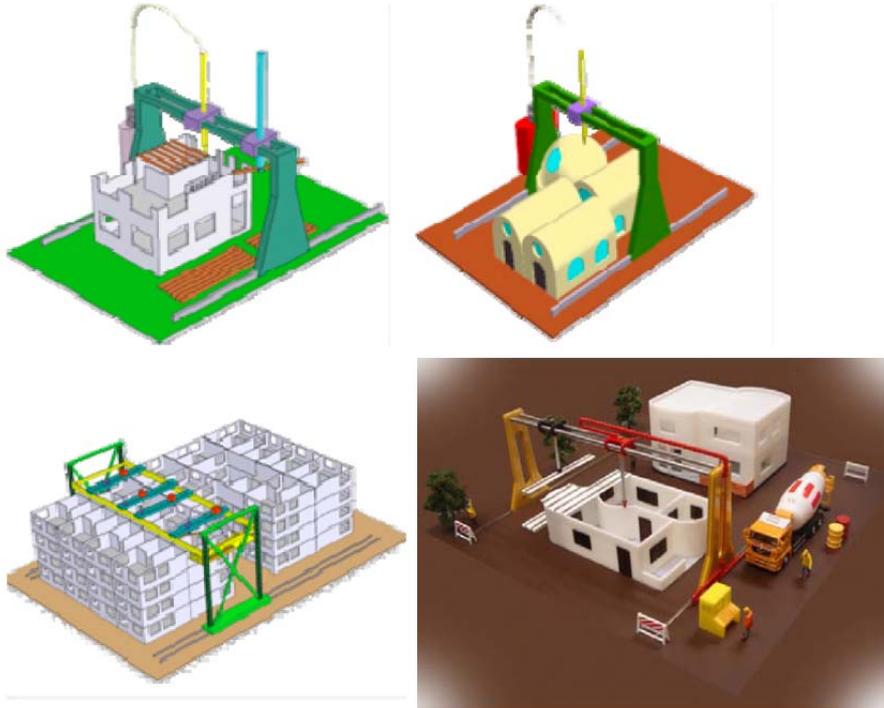
¹ Stereolithografie: griechisch stereos – „hart, fest, körperlich“ und Lithografie – Drucktechnik



neue Architekturoptionen etc.). Der mögliche negative Effekt auf den Arbeitsmarkt im Baubereich könnte durch die deutlich höhere Nachfrage nach Bauleistungen selbst kompensiert werden.

Aktueller Stand der Stereolithografieanwendung im Baubereich

Es gibt (leider bereits) einen relativ ähnlichen Ansatz bei einem amerikanischen Kollegen Prof. BEHROKH KHOSHNEVIS (<http://www-rcf.usc.edu/~khoshnev/>) – Details unter <http://www.contourcrafting.com/> – allerdings seit zehn Jahren nur als Modell.



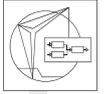
Kritik des CC-Verfahrens

Die neue, eigene Lösung wird von außen betrachtet, den hier gezeigten Skizzen sehr stark ähneln. Darin liegt auch die Gefahr bei der durchgeführten Patentanmeldung, da der Neuigkeitswert der eigenen Erfindung damit etwas eingeschränkt ist. Allerdings ist die erste Patentanmeldung von Kollegen KHOSHNEVIS bereits von 1995 und läuft damit 2015 aus! In Details wird sich aber die eigene Lösung sehr stark in erfolgskritischen Punkten vom Ansatz des US-Kollegen unterscheiden.

Die Nachteile des von Kollegen KHOSHNEVIS als CC – Contour-Crafting – bezeichneten Verfahrens liegen in folgenden Punkten (diese Aufzählung ist gleichzeitig auch für das eigene Patent die Abgrenzung zum bestehenden Patent):

- Beim CC-Verfahren erfolgt ein schichtweise Auftragen von Beton mit einem U-förmigen Rüssel (vgl. US-Patent 5,529,471) mit Schichtdicken von ca. 0,5 bis 2 mm.
- Falls die Zeit zwischen zwei Aufträgen zu kurz ist, kommt es voraussichtlich zu einem Weglaufen oder zur Deformierung der unteren Schichten.
- Ist die Zeit zu lang, so hat die vorletzte Schicht bereits abgebunden und eine sichere Verbindung mit der Folgeschicht ist nicht mehr sicher gewährleistet.

In Analogie zur Diamant-Graphit Struktur ergibt sich durch diese Effekte kein monolithischer Betonblock, sondern eine stark geschichtete Struktur, welche bei seitlichen Belastungen (Windböen, Wohnbelastung) möglicherweise seitlich weg bricht. Eine Abnahme durch den Statiker bzw. TÜV dürfte damit (zumindest in Deutschland) fast ausgeschlossen sein.



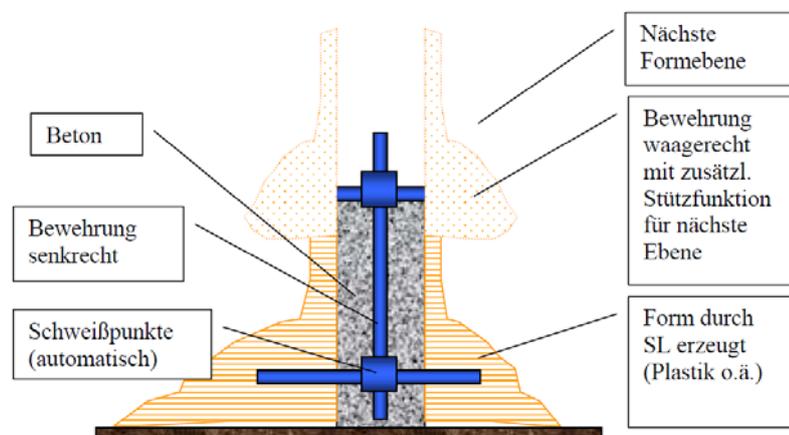
- Durch das periodische Überfahren des späteren Bauwerks mit dem aufragenden Rüssel ist das Einbringen von üblichen Bewehrungen erschwert bis unmöglich, da diese genau im Verfahrweg des Rüssels sind. Da ohne eine Bewehrung Beton keinerlei Festigkeit erreicht wird, dürfte eine Abnahme ebenfalls nicht möglich sein.
- Durch das einfache Aufbringen von Beton ohne Schalungen o. ä. ist das Erzeugen überstehender Strukturen (z. B. eine nach außen gewölbte Wand) oder von Decken ebenfalls kaum realisierbar.

In der Summe der aufgeführten Probleme dürfte die Umsetzung des generell interessanten Ansatzes vor erheblichen Problemen stehen. Dies wird indirekt bestätigt durch eine nur sehr geringe Fortschrittsrate des Projektes – so sind aktuelle Meldungen noch aus den Jahren 2006 oder früher.

Neue Ansätze zur Behebung der aufgeführten Probleme

Im Gegensatz zum CC-System wird bei der eigenen Erfindung:

- **nicht der Beton sondern die Form** (im Bau als Schalung bezeichnet) durch das stereolithografische Verfahren erzeugt.
- Nach dem Aufbau von etwa 20 bis 40 cm Schalung werden dann genau die **20 bis 40 cm Beton auf einmal in die Form** eingebracht.
- Vor dem Einbringen des Betons können ohne Probleme die entsprechenden Bewehrungselemente automatisiert eingebracht werden.
- Optional kann vor dem Erzeugen der Form die gesamte Bewehrung durch den gleichen Portalbau im Sinne eines Schweißroboters erstellt werden. Durch seitliche Ansätze an der Bewehrung kann die Form auch für Höhen von einigen Metern entsprechend stabilisiert werden.
- Ein Verdichten des Beton wird durch (siehe Grafik unten) entsprechende Tools des Portals oder durch speziellen Fließbetons eigenständig erreicht.
- Nach dem Gießen des Betons wird während dessen Abbindezeit von mindestens 3 Stunden die nächste Form generiert. Die zeitliche Abfolge kann durch die stabilisierende Schalung optimal an die chemischen Prozesse im Beton angepasst werden, ohne dass dieser bereits entsprechende Festigkeit erreicht haben muss. Damit sind die beim CC-Verfahren kritisierten Zeitprobleme sehr leicht behebbar.
- Als Material für die Form wird gegenwärtig von einer Verwendung eines Heißkleber-ähnlichen Materials ausgegangen, welche durch Erhitzen flüssig und formbar wird und im kalten Zustand ausreichende Festigkeitswerte gegenüber dem Betondruck erreicht. Entsprechende Stützrippen der Form sind ggf. notwendig. Nach Fertigstellung wird durch Erhitzen die Form abgebaut und kann nach Reinigung erneut verwendet werden.





Außer dem bereits erwähnten Beton kann **jedes pastös oder flüssig** vorliegende Material auch in Mischbauform verwendet werden.

- Durch Sägespäne + Verbinder kann das Fachwerkhaus neu definiert werden.
- Füllungen durch Sägespäne + Gips o. ä.
- Lehmhäuser könnten gebaut und später automatisiert abgetragen oder an anderer Stelle wieder neu aufgebaut werden.

Es erscheint auch sinnvoll, den **Prototyp des Systems mit Lehm** zu testen, da damit eine wiederholte Verwendung **aller** Materialien möglich ist.

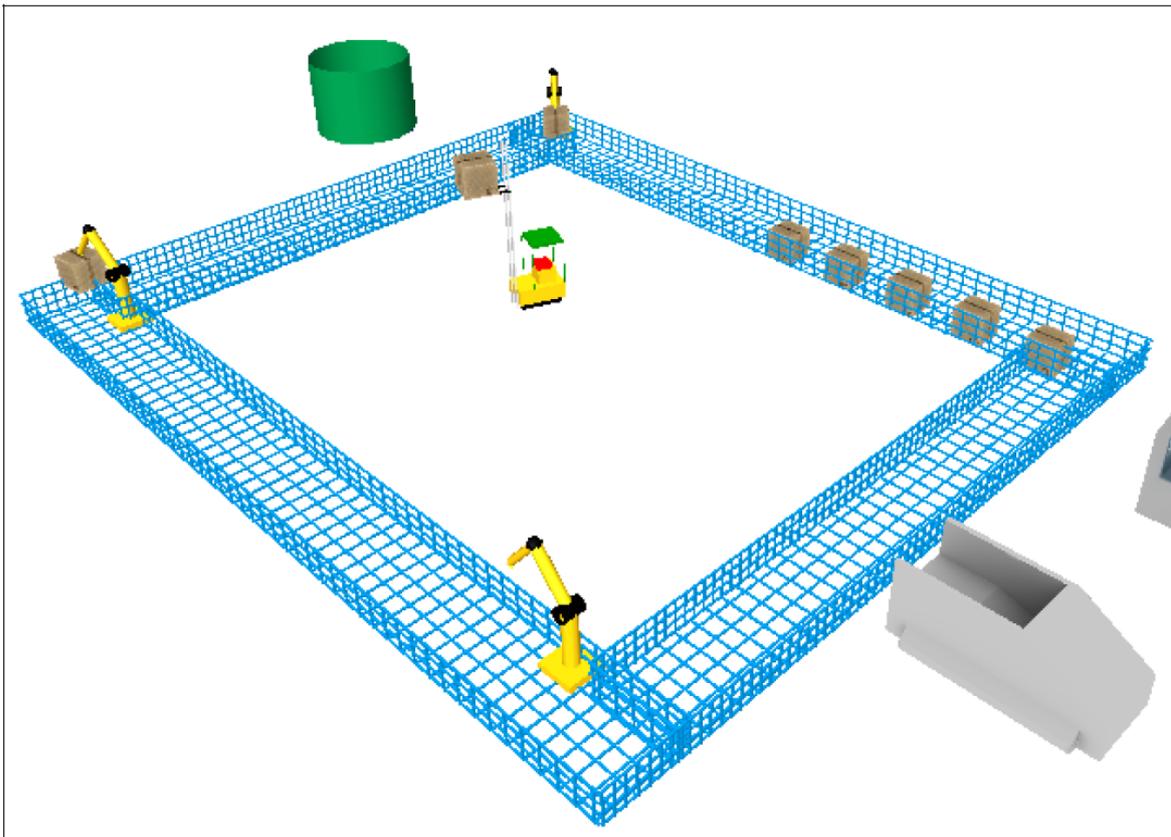
Untersuchungen zu den logistischen Abläufen

Da der Autor dieser Studie vom Schwerpunkt seiner Forschungsthemen im Bereich der Modellierung und Simulation komplexer Systeme beschäftigt ist, liegt eine detaillierte Untersuchung der Abläufe mit verschiedenen Simulationssystemen nahe.

Zuerst werden die zentralen logistischen Abläufe auf der Baustelle mit dem Simulationssystem ENTERPRISE DYNAMICS abgebildet. Die genauen Abläufe bei der eigentlichen Konstruktion sind jedoch mit einem allgemeinen diskreten Simulationssystem nicht erfassbar und müssen mit Systemen aus der Mechanik/ Mechatronik untersucht werden.

Der Autor ist im Rahmen des an der Universität Weimar durchgeführten Workshops sehr interessiert an Empfehlungen zu entsprechenden Systemen.

Ein erstes, noch sehr rudimentäres Simulationssystem zeigt die nachfolgende Abbildung. Im Modell werden die speziellen Bauroboter noch durch Standardroboter aus dem Logistik-Baukasten des ENTERPRISE DYNAMICS-Systems nachgebildet. Die Bereitstellung der Baustoffe erfolgt über hier nicht darstellbare Rohrleitungen aus einem zentralen Behälter (im Modell grün dargestellt). Feste Baustoffe werden noch durch einen Gabelstapler an die Roboterplätze gefahren.



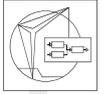
Zusammenfassung

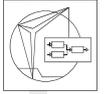
Durch die Erzeugung beliebiger Baustrukturen **ohne** Mehrkosten können völlig neue Architekturkonzepte (z. B. Möbel im Hausbau integriert, Heißluftheizung nach römischem Vorbild bereits im Rohbau fest integriert, Wasser- und sonstige Versorgungsleitungen ebenfalls bereits im Rohbau automatisiert eingebaut, etc.). Auch die Ausstattung des Hauses mit Wand- oder Fußbodenbeschichtungen ist mit den dann bereits vorhandenen Bauwerkzeugen möglich. In einer speziellen Variante wird bei der eigenen Lösung vom relativ teureren Portalsystem abgegangen und mit einer Menge von mobilen Robotern die gleiche Abfolge von Arbeitsschritten durchgeführt.

Summarisch sollte es möglich sein, den Anteil manueller Arbeit beim Hausbau stark zu reduzieren. Da dieser Kostenanteil im Vergleich zu den Materialkosten erheblich ist, können sehr große Kosteneinsparungen erzielt werden.

Quellen und weiter führende Links

- [Kosh02] KHOSHNEVIS (<http://www-rcf.usc.edu/~khoshnev/>)
Details unter <http://www.contourcrafting.com/> – allerdings
- [Wied07] Patent DE102007063561A1 vom 30.12.2007, offengelegt am 09.07.2009
„Verfahren und Anordnung zur Erstellung von Bauwerken“
URL:
http://publikationen.dpma.de/DPMApublikationen/shw_pat_bib.do?pdfAvailable=true&hitlistCurrent=1&docId=DE102007063561A1¤tDocId=DE102007063561A1&docDate=09.07.2009&id=9545651&hitlistAll=14





Eine Ontologie für die Baubetriebswissenschaft

Teil 1: Hintergründe und Ziele

Motivation

Ausgangspunkt der Überlegungen zur Entwicklung einer Ontologie für die Baubetriebswissenschaft ist die Erkenntnis, dass die Kommunikation in Bauprojektorganisationen zu verbessern ist. Hierzu sind die individuellen Sichtweisen der jeweiligen Fraktion der Bauprojektorganisation zu würdigen sowie durch einerseits eine Minimierung der Interpretationsspielräume und andererseits eine Objektivierung der Begriffe ein Konsens in Bezug auf die Semantik herbeizuführen. Weiterhin besteht die Basisanforderung bezüglich eines verlustfreien Informations- und Wissensaustausches zwischen den Softwaresystemen, die in großer Vielfalt im Bauwesen zur Anwendung kommen. Bisher können nur Teilaspekte des komplexen sozio-ökonomisch-technischen Systems Bauen softwaretechnisch abgebildet werden.

Zielsetzung

Für die Ziele der Objektivierung und Integration wird die Formulierung einer allgemein gültigen Ontologie der Baubetriebswissenschaft angestrebt. Die Ontologie wird dabei als Ontologie im Sinne der Informatik verstanden und kann nach GRUBER als explizite Spezifikation einer gemeinsamen Konzeptualisierung definiert werden [1]. In der Baubetriebsontologie erhalten die Konzepte des Baubetriebs eine semantische Bedeutung, die es Nutzern und Software ermöglicht, durch ein gemeinsames Begriffsverständnis die Kommunikation zu optimieren. Sie ist als offenes System zu sehen und kann unter Mitwirkung aller Nutzergruppen interaktiv entwickelt werden.

Ansätze

Die Baubetriebswissenschaft beschäftigt sich unter anderem mit der sektoriellen, weil Bauwesen bezogenen Entwicklung von Theorie, Identifikation des Best Practice und weiterführenden Analysen zur Gestaltung von differenzierten Prozessstrukturen, wie in Bild 1 dargestellt.

Bei Bauunternehmen ist der operative Zielfokus hauptsächlich auf den Erfolg in den Leistungserstellungsprozessen einschließlich der Akquisition und des nachgelagerten Betriebes des Objektes ausgerichtet. Daraus resultiert, dass der Prozess den Nukleus der Abbildung der Baubetriebskonzepte in der Ontologie bildet. Die ganzheitliche Betrachtung des Prozesses als sachlogische und zeitliche Folge von Aktivitäten [2] macht ihn zum Bindeglied zwischen allen Elementen des sozio-ökonomisch-technischen Systems Baubetrieb.

Eine offene Basisdefinition des Prozesses als Umwandlung einer Eingabe in eine Ausgabe erlaubt die oben formulierte Ganzheitlichkeit der Betrachtung. Der Prozess wird in Abhängigkeit der Modellierungsabsicht in unterschiedlicher Granularität beschrieben. Der gewählte Ansatz einer reflexiven Modellierung des Prozesses ermöglicht dessen Betrachtung in beliebiger Granularität.

Die Terminologie der Ontologie soll die subjektive Wahrnehmung der Kommunikationsteilnehmer nivellieren und bildet eine eindeutige Erkenntnisstruktur im Rechner. Die angestrebte Objektivierung wird möglich. Der Prozess wird im Rahmen seiner Konkretisierung durch semantische Verknüpfung mit zusätzlichen respektive ebenfalls konkretisierten Konzepten präzisiert.

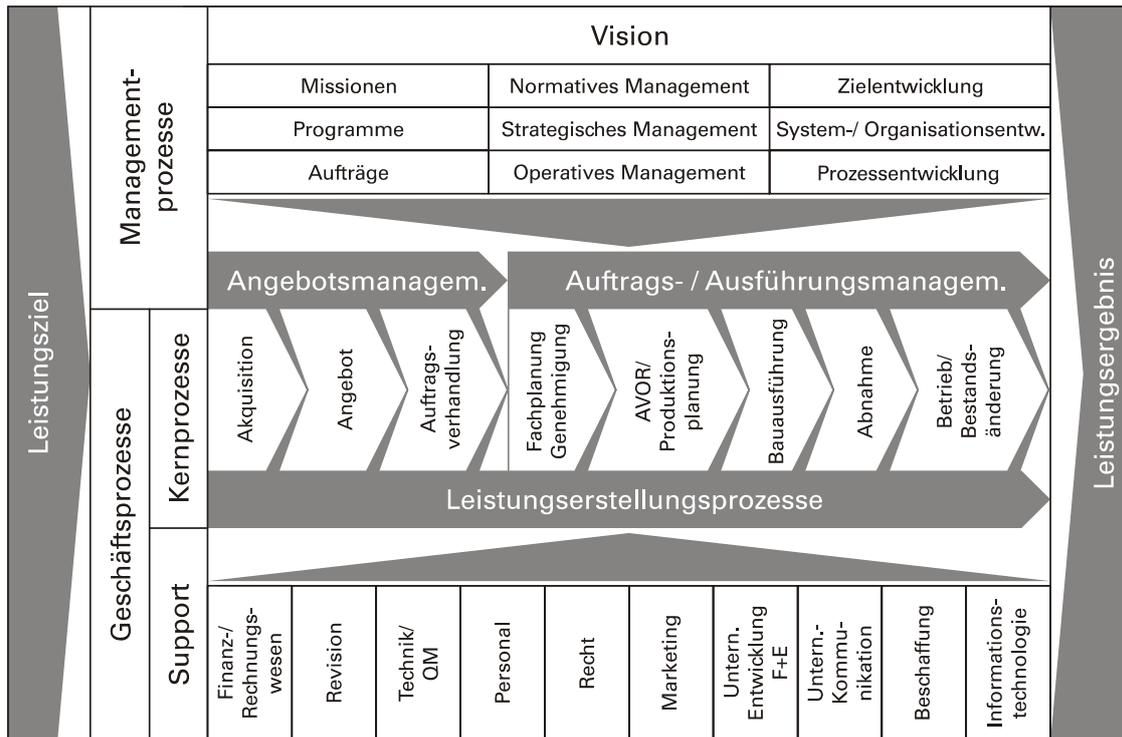


Bild 1 Prozesse in einem Bauunternehmen – Übersicht [4]

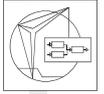
In der nachfolgend statuierten Baubetriebsontologie wird zunächst auf die Leistungserstellungsprozesse abgestellt und diese nach der Skala der REFA-Ablaufabschnitte untergliedert. Die gewählte Prozesshierarchie beschränkt sich durch die reflexive Formulierung jedoch nicht auf den Wertebereich der Skala nach REFA.

Philosophische Betrachtung

Der Begriff „Ontologie“ stammt ursprünglich aus der Philosophie, in welcher er jene Teildisziplin beschreibt, die sich mit den Voraussetzungen des Seins beschäftigt. Die Metaphysik lässt sich als Ursprung der Ontologie bezeichnen. Einer der Hauptvertreter der allgemeinen Metaphysik ist ARISTOTELES. Er versuchte, die Grundstrukturen des Seienden zu ergründen und so jene wissenschaftliche Disziplin zu finden, welche sich mit dem Ersten, das allem Seienden vorausgesetzt ist, beschäftigt. Mit seiner Kategorienlehre fand er Zusammenhänge zwischen sprachlichen Strukturen und Strukturen des Seins. Dasjenige, was ausgesagt wird, entspricht dem, was ist. Sein Ansatz lässt sich als empiristisch bezeichnen – die Wahrnehmung ist dasjenige, was die Wirklichkeit beleuchtet. Aus der Wahrnehmung kann Wissen werden, indem das menschliche Erinnerungsvermögen die Einzelbilder als Erfahrung speichert. Kommt zu der Erfahrung das Begreifen der Ursachen hinzu, so wird aus der Erfahrung Wissen.

Mit dem Zweifel des DESCARTES und schließlich der Philosophie KANTS hält ein Denken Einzug in die Philosophie, welches als konstruktivistisch bezeichnet wird. Die Erkennbarkeit von Außendingen wird angezweifelt – zunächst bloß die von der Sinneswahrnehmung gelieferten Daten und schließlich auch die Daten, die dem menschlichen Verstandesapparat entspringen. Diese sogenannte kopernikanische Wende in der Philosophie bestimmt das philosophische Denken bis heute. So lässt die Theorie KARL POPPERS die Falsifikation als einzige wissenschaftliche Methode zu, da von der Außenwelt die Widerlegung einer Theorie, niemals aber die Bestätigung derselben zu erfahren sei.

An den verschiedenen Ansätzen der philosophischen Theorien lässt sich feststellen: Die Philosophen sind daran interessiert, das Verstehen der Dinge zu verstehen und darüber hinaus ihre Begrifflichkeiten klar zu stellen. Darin enthalten ist immer auch das Interesse, eindeutig über die Dinge kommunizieren zu können. Der für eine eindeutige Kommunikation notwendige Diskurs über die verwendeten Begriffe



ist wesentliches Merkmal von Wissenschaft und bildet auch den Ausgangspunkt des Projektes „Baubetriebsontologie“, dessen Zwischenergebnis im Rahmen der vorliegenden Publikation erläutert wird. In diesem Projekt geht es um das Austauschen von Informationen – um Kommunikation. Dafür bedarf es einer eindeutigen Sprache. Um auszuschließen, dass der Ingenieur über ein unbekanntes X – die Außenwelt im kantischen Sinne – spricht, müssen einige grundlegende Punkte festgehalten werden.

Das Ingenieurshandeln ist zweckgerichtet. Die ingenieurmäßige Forschung ist auf den technologischen Fortschritt angewiesen. In diesem Voranschreiten hat der zielgerichtete Prozess ständige Aktualität und ist auf die Welt bezogen. Der grundsätzliche Zweifel an der Erkennbarkeit der Außenwelt ist mit einem Zweifel an den wissenschaftlichen Ergebnissen gleichzusetzen und wirkt sich somit hemmend auf den Fortschritt aus. Für die Forschung im Baubetrieb ist es daher notwendig, sich auf die Wahrnehmung und die Erkennbarkeit von Außendingen zu verlassen.

Doch ebenso wenig wie ein streng konstruktivistischer Ansatz bietet ein streng realistischer Ansatz das richtige Fundament für das Ingenieur-Denken. Die Wahrheit des Ingenieurs muss keine subjektunabhängige sein. Eine Erkennbarkeit der Dinge-an-Sich wird in einem System, welches sich als sozio-ökonomisch-technisch bezeichnet, nicht verlangt, da das Subjekt in seiner Subjekthaftigkeit unbedingter Bestandteil des Systems ist und sogar die Voraussetzung für das Zustandekommen des Systems bildet.

Teil 2: Erstellung und Anwendung

Ontologien in der Informatik

Ontologien werden in der Informatik meist im Feld der Künstlichen Intelligenz eingesetzt, um Informationen und Wissen auszutauschen und ein gemeinsames Verständnis der Entitäten bezüglich der Begriffe einer Wissens- bzw. Anwendungs-Domäne zu schaffen. Hierzu dient die explizite Spezifikation der Konzepte, bei der ein verbindliches Vokabular eingeführt und die Beziehungen der Konzepte untereinander repräsentiert werden [1].

Die Besonderheit einer Ontologie im Vergleich zu anderen Austauschformaten oder Auszeichnungssprachen wie beispielsweise XML besteht darin, dass nicht nur die syntaktische Struktur der Daten definiert wird, sondern dass auch die Semantik explizit und damit maschinenlesbar formuliert wird. Eine Möglichkeit besteht in der Formulierung von Informations-Tripeln, bei denen ein Konzept über ein Prädikat mit einem anderen Konzept in eine vorher definierte Beziehung gesetzt wird. Hiermit lassen sich sowohl hierarchische Eltern-Kind-Beziehungen als auch Eigenschaftszuordnungen ausdrücken. Darauf aufbauend ist eine automatische Klassifikation und Subsumption von Konzepten anhand der sie beschreibenden Tripel möglich. Die hierzu verwendeten Restriktionen sind notwendige und hinreichende Bedingungen. Werden die Bedingungen für eine Klassenzugehörigkeit erfüllt, so ordnet ein Reasoner die entsprechenden Klassen und Individuen dieser Oberklasse zu.

Die Formulierung von Ontologien mittels Tripeln gibt diesen eine flexible Struktur, die jederzeit um neue Tripel erweitert werden kann. Die Formulierung von Bedingungen setzt dieser Flexibilität bewusst Einschränkungen entgegen, indem widersprüchliche Aussagen zu Inkonsistenz führen, die ein Reasoner aufdecken kann.

Bei der Anwendung einer Ontologie werden meist zwei Komponenten unterschieden. Die erste Komponente wird als TBox bezeichnet und enthält eine allgemeine Terminologie ihrer Domäne, also die für ein Konzept möglichen Eigenschaften und dessen Einordnung in die Hierarchie. Die zweite Komponente wird als ABox bezeichnet und baut auf der TBox auf. Sie enthält Instanzen der Konzepte und damit konkrete Aussagen zu konkreten Ausprägungen des Konzepts und dessen Eigenschaften. Im Rahmen dieser Publikation wird zunächst nur die Aufstellung einer TBox für die Baubetriebsdomäne dargestellt. Mithilfe der maschinenlesbaren Semantik in der TBox werden die in der ABox enthaltenen Daten untereinander und mit übergreifenden Informationen (beispielsweise externen ABoxen) in Beziehung gestellt. Denn nur Daten, die mit einer Bedeutung versehen sind, lassen sich in Informationen umwan-



deln, welche wiederum in einen Kontext gebracht und derart vernetzt werden können, dass Wissen entsteht.

Aus der Möglichkeit, mit einer Ontologie Konzepte bzw. Daten in maschinenlesbarer Form in einen Zusammenhang zu bringen, haben sich folgende Anwendungsfelder für Ontologien in der Informatik etabliert:

- Kommunikation zwischen Software, Menschen und Organisationen,
- maschinelles Schlussfolgern und
- Wiederverwendung des formulierten Wissens [3].

Prozessbeschreibung nach REFA

Die entwickelte Baubetriebsontologie verfolgt einen prozessorientierten Ansatz. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt liegt der Fokus auf den Leistungserstellungsprozessen. Nach GIRMSCHIED/MOTZKO findet die „eigentliche Wertschöpfung des Bauunternehmens in den Leistungserstellungsprozessen statt“ [4]. Produktionsprozesse als Leistungserstellungsprozesse können nach der REFA-Methodenlehre erfasst werden. Die ganzheitliche Erfassung von Produktionsprozessen erfolgt durch die Beschreibung von Arbeitssystemen. Arbeitssysteme werden mit den sieben Systembegriffen Arbeitsaufgabe, Arbeitsablauf, Eingabe, Ausgabe, Mensch, Betriebsmittel und Umwelteinflüsse beschrieben. Der Arbeitsablauf als Bestandteil des Arbeitssystems ist die „räumliche und zeitliche Folge des Zusammenwirkens von Mensch und Betriebsmittel mit der Eingabe, um diese gemäß der Arbeitsaufgabe zu verändern oder zu verwenden“ [5]. Folglich wird der Leistungserstellungsprozess durch die Beschreibung des Arbeitsablaufes und der Arbeitssysteme entsprechend der Definition des Prozesses nach ENGELMANN als „ganzheitliche, sachlogische und zeitliche Folge von Aktivitäten“ [5] zur Bearbeitung eines Projektes erfasst.

Die Systematisierung des Arbeitsablaufes erfolgt durch die Einteilung in Ablaufabschnitte (s. Bild 2). Die Makro- und Mikroablaufabschnitte teilen die Tätigkeiten im komplexen System Bauen in zwei Ebenen auf. Als Makroablaufabschnitte sind solche Aufgaben zu verstehen, die sich in der Gliederung von Leistungsverzeichnissen auf der Ebene des Titels oder der Einzelposition befinden. Das Zerlegen des Arbeitsablaufes in Mikroablaufabschnitte dient beispielsweise dem Erstellen von Arbeitszeitstudien. Das Spektrum der Mikroablaufabschnitte erstreckt sich vom Vorgang bis zum Vorgangselement. Der Vorgang wird an der Mengeneinheit eines Arbeitsauftrages gemessen und befindet sich auf der Stufe des Bauarbeitsschlüssels. Das Vorgangselement umfasst Tätigkeiten mit einer Dauer von 0,6 bis 6 Sekunden und ist der kleinste Ablaufabschnitt. Die REFA-Methodenlehre gibt die Granularitätsstufen des Arbeitsablaufes für die Mikroablaufabschnitte präzise vor.

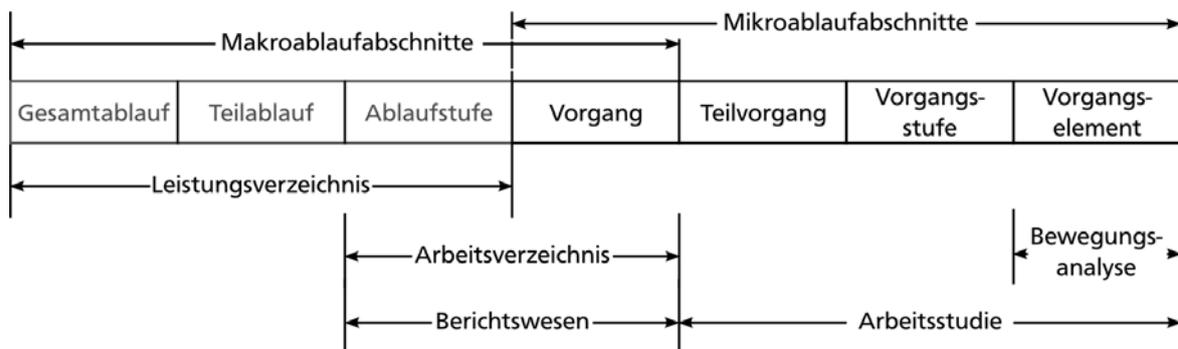
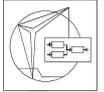


Bild 2 REFA-Ablaufabschnitte [5]

Auf der Grundlage derart systematisierter Arbeitsabläufe können die Arbeitssysteme abgegrenzt werden. Dem Anwender obliegt die Abgrenzung entsprechend dem verfolgten Zweck. Arbeitssysteme können simultan, sukzessiv sowie hierarchisch angeordnet werden.

Prozessabbildung mit REFA-Strukturen in der Ontologie

Der Prozess als Kern der Ontologie muss, wie eingangs gefordert, flexibel modelliert werden, um auch zukünftige Konzepte abbilden zu können. Eine Einordnung des modellierten Prozesses in anerkannte Strukturen dient der Kommunikationspräzision.



Um die Modellierung des abstrakten Prozesskonzepts, das verschiedene Ausprägungen erhalten kann, so flexibel wie möglich zu gestalten, wird er reflexiv abgebildet. Er kann beliebig viele Granularitätsstufen in Form von Sub- und Metaebenen sowie Vorgänger- und Nachfolgerprozesse aufweisen (s. Bild 3).



Bild 3 Reflexive Prozessdefinition

Zum Spezifizieren des Produktionsprozesses als eine Ausprägung des abstrakten Prozesses werden diesem die Elemente des Arbeitssystems zugeordnet. Diese Elemente werden durch Attributierung mit weiteren Konzepten der Ontologie respektive Variablen spezifiziert. Das Ergebnis dieser Modellierung des Produktionsprozesses spiegelt die Sichtweise der Arbeitswissenschaften auf den Produktionsprozess wider (s. Bild 4).

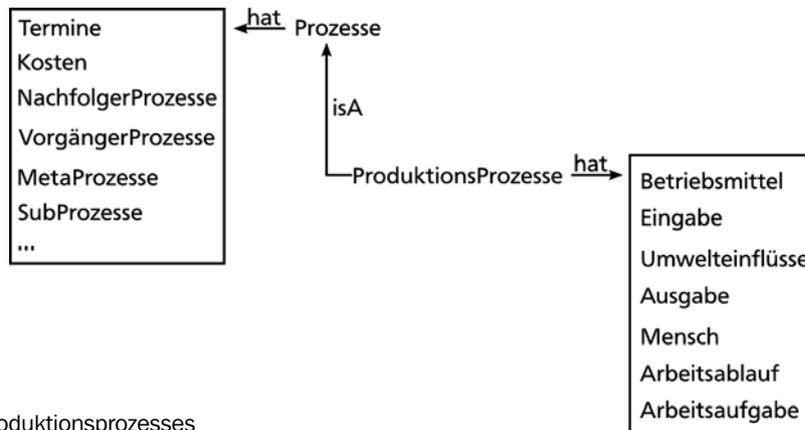


Bild 4 Modell des Produktionsprozesses

Als eine der Strukturen zur Einordnung des Produktionsprozesses kann die Gliederung der REFA-Mikroablaufabschnitte als Granularitätsskala verwendet werden. Im Gegensatz zur REFA-Lehre wird diese Gliederung in der statuierten Baubetriebsontologie als Hierarchie der Ordnungsebenen von Prozessen verwendet. Wie in Bild 5 dargestellt, kann jedem Produktionsprozess ein REFA-Mikroablaufabschnitt zugeordnet werden.

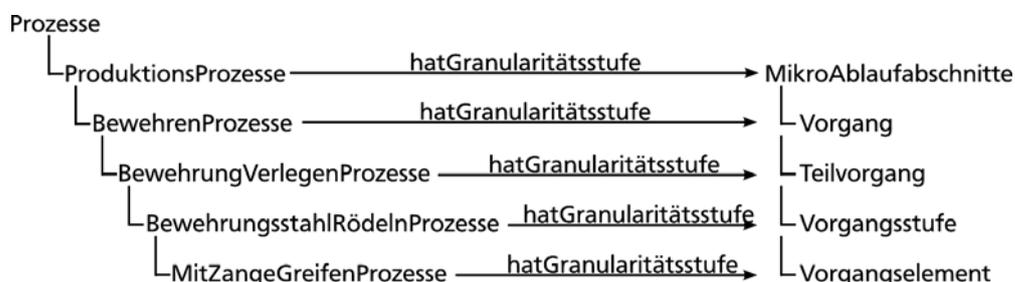


Bild 5 Zuordnung von Produktionsprozessen zu Mikroablaufabschnitten

Die Zuordnung von Produktionsprozessen zu REFA-Makroablaufabschnitten ist hingegen für den Baubetrieb nicht ausreichend. Der Grund dafür liegt im wechselnden Gebrauch von Skalen zur Beschreibung von Bauproduktionsprozessen.



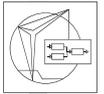
Ausblick

Die Kommunikation über Prozesse erfordert eine Charakterisierung des Prozesses anhand weiterer Skalen. Um den Gehalt der Aussagen über einen Prozess zu spezifizieren, werden Skalen benötigt, deren Semantik den Nutzern der Ontologie geläufig ist. Als Beispiele hierfür können die Prozesse im Bereich der Makroablaufabschnitte, die Charakterisierung von Prozessen im Spannungsfeld von Zeitpunkt, Intention und Datengrundlage sowie die Einordnung von Prozessen anhand ihres Fertigstellungsgrads dienen.

In der Fortentwicklung ist die Projektsicht zu verlassen und eine übergeordnete Unternehmenssicht zu generieren. Diese ist durch eine Vielfalt der in Bild 1 formulierten Module innerhalb der Management- und Geschäftsprozesse charakterisiert. Die Komplexität dieses Vorhabens kann alleine daraus erkannt werden, dass es sich um eine Kombination staatlich reglementierter Prozesse wie beispielsweise die Bilanzierung nach HGB und IFRS einerseits sowie interner Strukturen der Kosten- und Leistungsrechnung respektive technischer Realisierung andererseits handelt. Umso mehr besteht die Notwendigkeit einer Ordnung der Begrifflichkeiten dieser komplexen Struktur in einer Ontologie.

Literaturverzeichnis

- [1] GRUBER: Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing. In: International Journal Human-Computer Studies 43, 2003, S.907–928.
- [2] ENGELMANN: Marktveränderungen und organisatorischer Wandel. In: MAYRZEDT/FISSENEWERT (Hrsg.): Handbuch Bau-Betriebswirtschaft. 2. Auflage. Düsseldorf: Werner, 2005, S. 103–117.
- [3] GRUNINGER/LEE: Ontology – Applications and Design. In: Communications of the ACM Vol. 45 Nr. 2, 2002, S. 39–41.
- [4] GIRMSCHIED/MOTZKO: Kalkulation und Preisbildung in Bauunternehmen, Berlin [u. a.]: Springer-Verlag, 2007.
- [5] BERG: REFA in der Baupraxis, Teil 1 Grundlagen. Frankfurt a. M.: ztv-Verlag, 1984.



Erstellung einer Simulationsbibliothek für den Tiefbau

Die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit kann nicht nur über geringere Kosten, sondern vor allem auch in der Bauprozessgestaltung und Planungsqualität erfolgen. Der durchgängige Einsatz von EDV-Hilfsmitteln soll Prozessabläufe transparenter gestalten, indem standardisierte digitale Werkzeuge die Qualität und Zuverlässigkeit von Planungsdaten wesentlich erhöhen. Einen wichtigen Aspekt zur Planung komplexer Großbaustellen stellt hierbei die Methode der Ablaufsimulation dar. Um deren Einsatz im Tiefbau zu ermöglichen, wurde eine Bausteinbibliothek erstellt, welche in das stark vernetzte ForBAU-Konzept der digitalen Baustelle eingebunden ist.

1 Einleitung

Der Forschungsverbund ForBAU betrachtet sowohl die Planung als auch die Ausführung von Tiefbauprojekten. Über beide Phasen werden alle anfallenden Soll- und Ist-Daten aus der Planung beziehungsweise Ausführung mithilfe eines Produktdatenmanagementsystems (PDM) zentral verwaltet. Konventionell geplante Modelle (2D) werden ins Dreidimensionale überführt und miteinander kombiniert. Gemeinsam mit dem Bauablaufplan entsteht somit aus den 3D-Modellen von Gelände, Baugrund und Bauwerk ein zentrales 4D-Baustelleninformationsmodell. Diesem werden alle relevanten Soll- und Ist-Informationen hinzugefügt, unter anderem Qualitäts- und Lieferanteninformationen aber auch Einbauort und -zeit, so dass der Prozessablauf der untersuchten Baustelle transparenter wird.

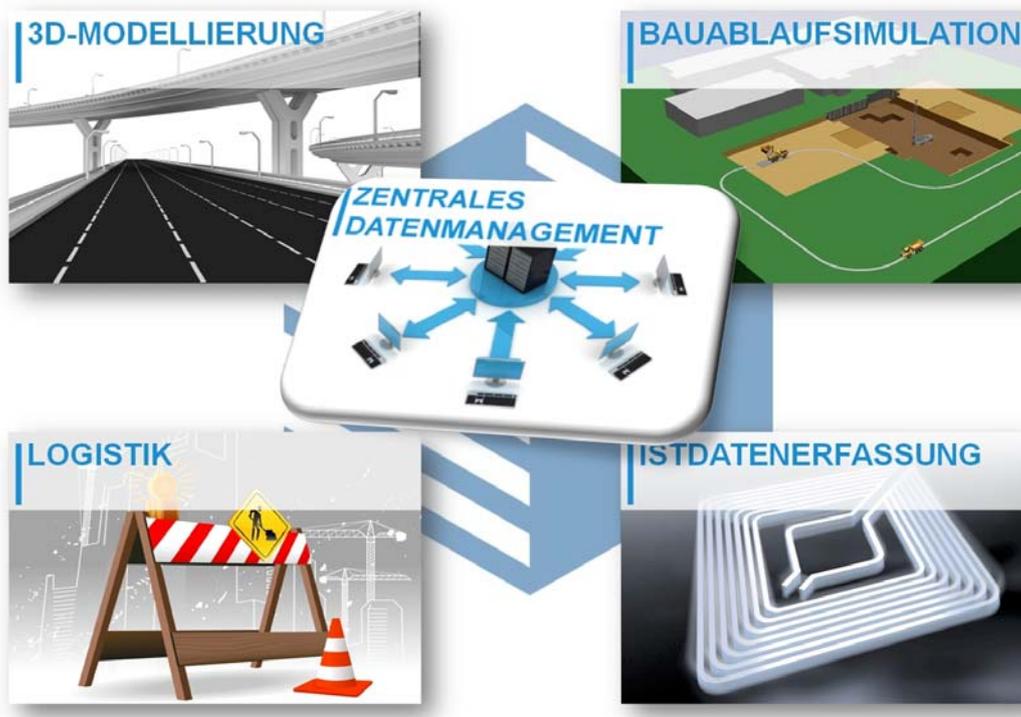


Bild 1 Konzept ForBAU



Um zeitnah aktuelle Fortschrittsdaten festzuhalten, werden sogenannte Auto-ID-Systeme zur Erfassung von Ist-Daten eingesetzt und entsprechend mit dem PDM-System verknüpft. Der Einsatz technologiegetriebener Logistikkonzepte soll die Erfassung unterstützen, Such- und Wartezeiten reduzieren sowie Bestände minimieren. Dadurch werden sichere Planungsgrundlagen geschaffen, die innovative Anlieferkonzepte in der Bauausführung ermöglichen.

Der hier näher beschriebene Teilaspekt beschäftigt sich mit der Simulation von Baustellenabläufen, insbesondere im Erd- und Tiefbau, um kritische Prozesse vorausschauend in einem virtuellen Modell zu testen. Schwierigkeiten in der Bauausführung werden vorab erkannt und relevante Abläufe können bereits in der Planungsphase visualisiert werden. Dadurch lassen sich bei der späteren Durchführung Verzögerungen oder unnötige Stillstandzeiten vermeiden.

2 Anforderungsanalyse

Um die Anforderungen an die Ablaufsimulation im Tiefbau zu ermitteln, wurde im ersten Schritt ein Workshop mit den Industriepartnern des Forschungsverbundes durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass die Simulation für unterschiedliche Ziele verwendet werden soll. Ein primäres Ziel ist die simulative Absicherung von Baumaßnahmen. Durch die entstehenden Unsicherheiten am Bau wird eine Methode gesucht, verschiedene Szenarien vor der Bauausführung durchzuspielen und deren relevante Parameter vergleichen zu können. Ein weiteres Ziel ist die Optimierung des Maschineneinsatzes, um die Wirtschaftlichkeit einer Baustelle zu verbessern. Neben den wirtschaftlichen Aspekten ist die anschauliche Visualisierung der Baustellenabläufe in der Simulationsumgebung ein essentieller Punkt. Den vielen teilhabenden Gewerken bietet ein 4D-Baustellenablauf eine übersichtliche Darstellung der konkreten Planungen, so dass Fehler aufgrund von Missverständnissen vermieden werden können.

Der Einsatz einer Simulationsanwendung im Tiefbau eignet sich vor allem in zwei Phasen. Zum Einen in der Angebotserstellungsphase, in der innerhalb eines kurzen Zeitraums der Bauablauf erstellt und die Kosten dafür kalkuliert werden müssen. Zum Anderen sollen in der anschließenden Arbeitsvorbereitung verschiedene Szenarien miteinander vergleichbar sein, um eine optimierte Lösung mit hohem Detaillierungsgrad zu generieren. Sinnvoll ist es daher, ein spezifisches Simulationsmodell für ein festgelegtes Bauprojekt zu erstellen, welches von der relativ groben Planung in der Angebotskalkulation bis zur Feinplanung in der Arbeitsvorbereitung durchgängig genutzt werden kann.

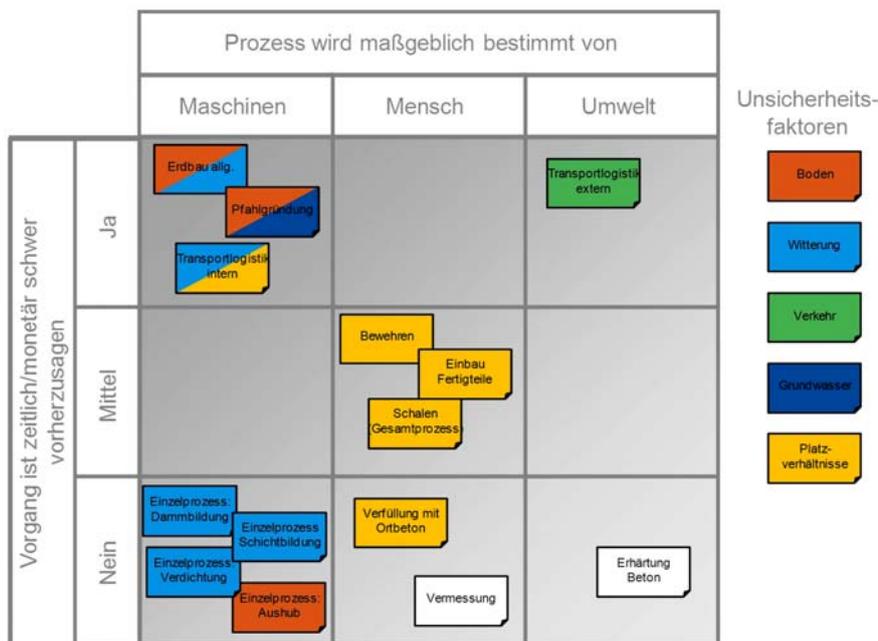
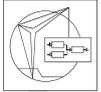


Bild 2 Einteilung verschiedener Bautätigkeiten nach Vorhersagbarkeit und Haupteinflussfaktoren



Da nicht alle Prozesse der Baustelle in der Simulation berücksichtigt werden können, wurde eine Einteilung der verschiedenen Prozesse für den Brücken- und Trassenbau vorgenommen. Wie in Bild 2 dargestellt, sind dabei die verschiedenen Prozesse in der vertikalen Achse nach deren Vorhersagbarkeit mit den bisherigen Planungsmethoden aufgeteilt. In der horizontalen Achse sind diese zudem nach dem maßgeblichen Einfluss, dem der Prozess unterliegt, gruppiert. Zudem sind diesen noch die bestimmenden Unsicherheitsfaktoren hinzugefügt, welche eine konventionelle Planung erschweren.

Einzelprozesse, wie die Dammbildung, die Verdichtung von Oberflächen oder der Schichtauftrag, die stark von der Maschinenleistung abhängen, sind bereits mit den bestehenden Planungsmethoden sehr gut vorhersehbar. Im Zusammenspiel mehrerer Maschinen, wie z. B. bei der Pfahlgründung oder im Erdbau, ergeben sich hingegen Schwierigkeiten in der Prognostizierbarkeit. Vor allem Bodeneigenschaften und Witterung sind beim Erdbau entscheidende Unsicherheitsfaktoren, welche eine Vorhersage der erzielbaren Leistung unterschiedlicher Maschinenkombinationen erschweren. Des Weiteren ist die interne Baustellenlogistik geprägt von den Raum- und Platzverhältnissen sowie den Bodenparametern der Transportwege.

3 Analyse der Erd- und Tiefbauverfahren

Nach der Ermittlung der Anforderungen an die Ablaufsimulation, wurden bestehende Berechnungsverfahren [1], [2], [3] für die einzelnen Erd- und Tiefbauprozesse auf der Baustelle analysiert und auf ihre Eignung für den Einsatz in der Simulation überprüft. Die Berechnung der Ladegerätleistung im Erdbau ist ausreichend bekannt, durch vielfältige Einflussfaktoren parametrierbar und kann daher für die Ablaufsimulation verwendet werden. Ein deutliches Optimierungspotenzial liegt hingegen in der Berechnung der Transportleistung, genauer in der Prognose von Umlaufzeiten spezifischer Transportfahrzeuge. Bisherige Verfahren berücksichtigen die dynamischen Bewegungen der Fahrzeuge nicht, Verzögerungs- und Beschleunigungszeiten sowie geringere Geschwindigkeiten bei Kurvenfahrten werden somit nicht betrachtet. Dies führt je nach Streckenprofil zu großen Abweichungen in den Fahrzeiten und somit zu Ungenauigkeiten bei der Planung von Transportkapazitäten.

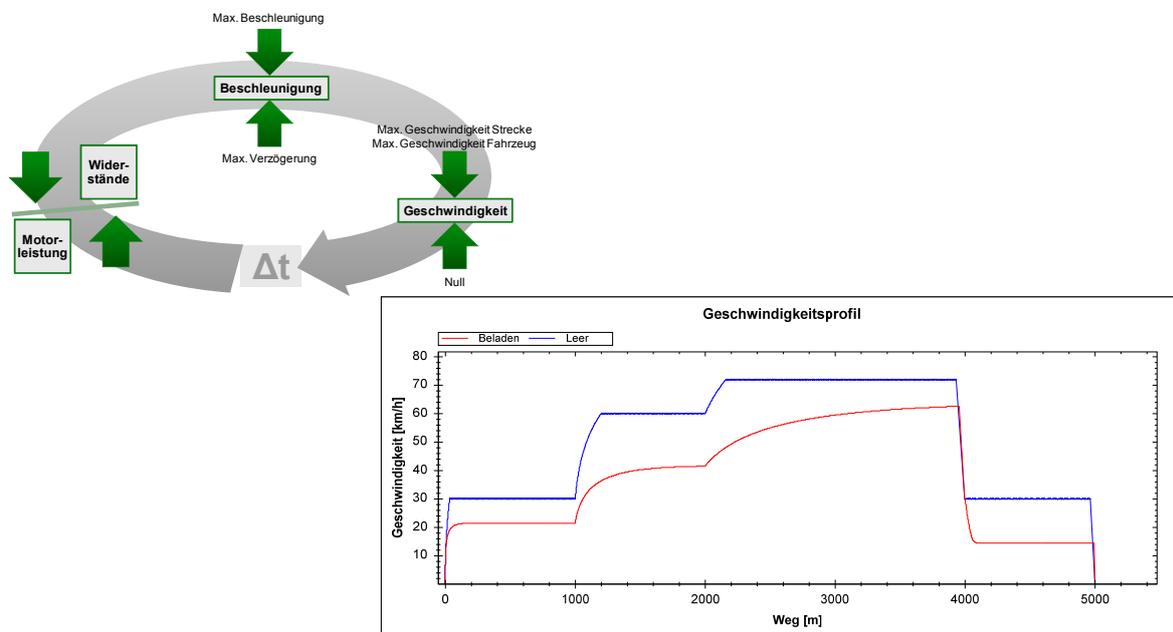


Bild 3 Funktionsweise Kinematiksimulation der Transportfahrzeuge

Um die Berechnung der Fahrzeiten zu verbessern, kann die Technik der kinematischen Simulation verwendet werden. Diese bietet für jedes Fahrzeug die Möglichkeit, ein Geschwindigkeitsprofil je nach befahrener Strecke und aktuellem Beladungszustand zu erstellen. Dabei wird in sehr kleinen Zeit-



schritten die Beschleunigungsfähigkeit des Fahrzeugs in Abhängigkeit der aktuellen Geschwindigkeit, der Fahrzeugeigenschaften und der Streckenparameter ermittelt. Ist die Antriebskraft im Vergleich zu den Fahrwiderständen zu klein, verringert sich die Geschwindigkeit in einem Zeitschritt, ansonsten wird sie erhöht. Grenzggeschwindigkeiten können sowohl für das Fahrzeug, als auch für die verschiedenen Streckenabschnitte angegeben werden, um beispielsweise Geschwindigkeitsbegrenzungen oder Stauinflüsse zu berücksichtigen. Ein Beispiel hierfür zeigt Bild 3. Im leeren Zustand erreicht das Fahrzeug die Grenzggeschwindigkeiten der Streckenabschnitte, im beladenen Zustand ist nur das Verhältnis von Fahrzeugleistung zu den Fahrwiderständen ausschlaggebend.

Zudem wurden verschiedene Verfahren der Tiefgründung auf deren Einflüsse und Prozessparameter untersucht. Diese Verfahren sind abhängig von verschiedenen Faktoren aus dem Bereich der geotechnischen Daten, der Maschinendaten und den organisatorischen Einflüssen auf der Baustelle. Die ersten beiden Gruppen können als Eingangswerte in die Simulation übernommen werden, die letztere ergibt sich zum größten Teil aus dem Baustellenablauf sowie dem importierten geometrischen Zusammenhang.

4 Modellbildung und Implementierung

Um eine Grundlage für den Einsatz der Ablaufsimulation zu schaffen, ist im Rahmen des Forschungsprojekts eine Bausteinbibliothek für den Tiefbau modelliert und in Tecnomatix Plant Simulation von Siemens PLM implementiert worden. Wie in Bild 4 dargestellt, umfasst die Bibliothek Bausteine für den Datenim- und -export, für die Modellierung der baustellenbedingten Vorgänge, interne Verwaltungsbausteine sowie spezifische Objekte für die Baustelleneinrichtung.

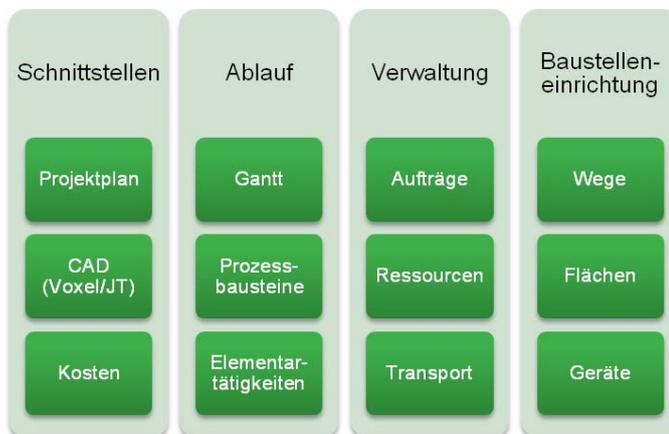


Bild 4 Zusammensetzung der Bausteinbibliothek

Schnittstellen

Ein wichtiger Grundsatz der Bausteinbibliothek ist die Wiederverwendung von bereits bestehenden Planungsdaten. In dem in Bild 5 dargestellten Schnittstellenkonzept der 4D-Ablaufsimulation sind die Ein- und Ausgangsdaten für das Gesamtkonzept des Simulationssystems dargestellt.

Zunächst wird ein vorweg erstellter Projektplan aus einem konventionellen Projektmanagementtool als Eingangswert in die Simulationsumgebung importiert. Eine weitere Eingangsgröße für die Simulation sind die auf- und abzutragenden Erdkörper. Um die Massenermittlung im Erdbau zu erleichtern, wurde im Forschungsverbund ein Tool geschaffen, mit dem das Untergrund-, das Oberflächen- sowie das Bauwerksmodell miteinander verschnitten und daraus das Volumen der jeweils abzutragenden und aufzubringenden Erdmassen bestimmt wird. Dabei werden die entsprechenden Massen als gleichförmige Quader (Voxel) gespeichert, welche Informationen über Position, Volumen und Bodenart

enthalten [4]. Die Voxelstruktur der ab- und der aufzutragenden Volumina wird in eine XML-Datei exportiert, welche dann in die Simulationsumgebung eingelesen werden kann.

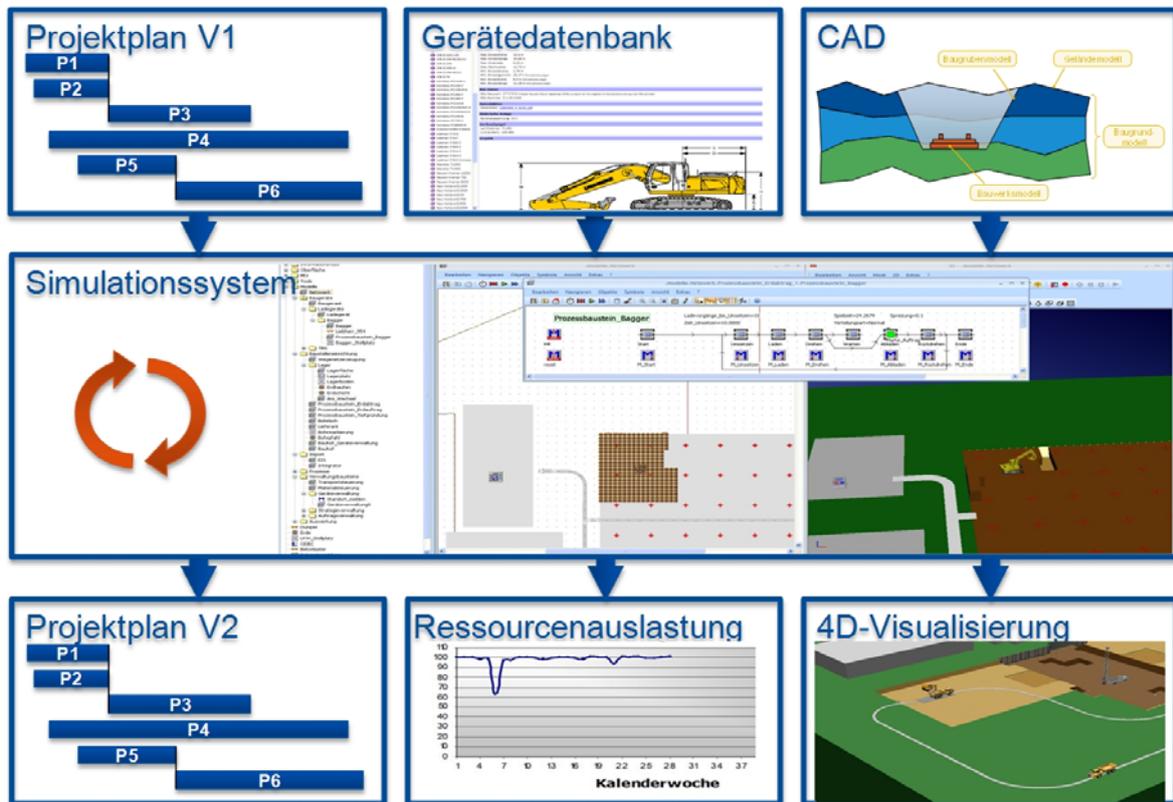
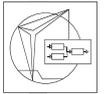


Bild 5 Schnittstellen Simulation

Neben der Voxelstruktur wird auch die Umgebung als 3D-Modell (JT-Format) importiert. Zudem kann eine aus mehreren Bauteilen zusammengesetzte Bauwerkstruktur für die Abbildung eines zeitlich veränderlichen Bauobjekts, wie beispielsweise ein Brückenmodell, übernommen werden. Eine Schnittstelle analysiert die CAD-Struktur des Bauwerks und übergibt diese an das Simulationssystem.

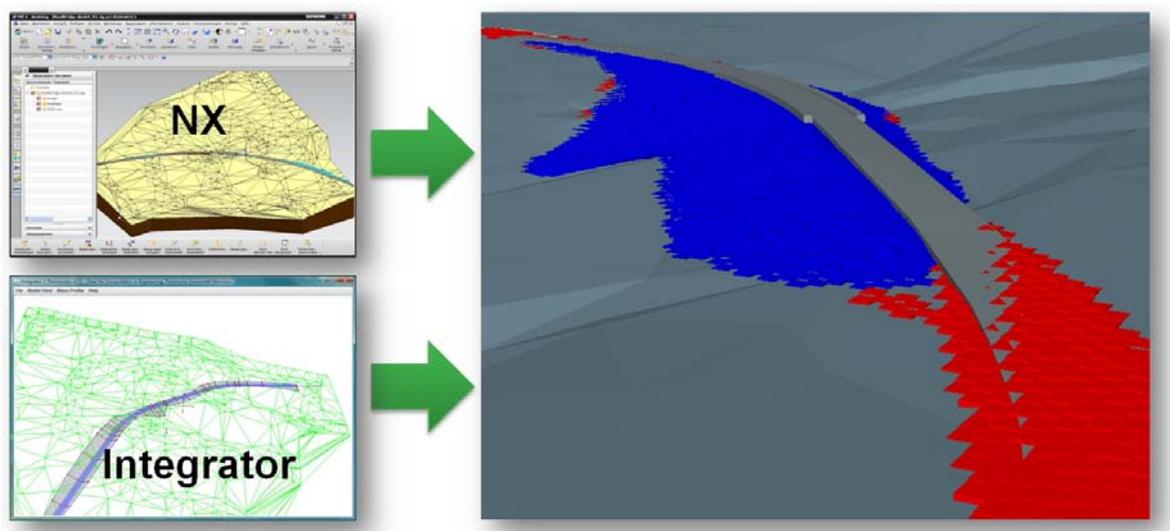


Bild 6 CAD-Schnittstellen



Mit Hilfe eines für das CAD-System NX entwickelten Plugins wird die Struktur mit der Lage der Einzelbauteile bezüglich des Ursprungs der Gesamtbaustelle analysiert und in eine XML-Datei exportiert. In der Simulationsumgebung wird dann die XML-Datei eingelesen und in eine hierarchische, objektorientierte Bauwerksstruktur überführt, so dass jeweils der aktuelle Grad der Fertigstellung und der Status des Bauwerks (im Bau, fertiggestellt, etc.) bis in die tiefste Strukturebene visualisiert werden.

Zudem ist eine Schnittstelle für die am Lehrstuhl fml entwickelte Baumaschinendatenbank Equipment Information System (EIS) vorhanden, in der Maschinendaten von über 2000 Baugeräten mit ihren jeweiligen Eigenschaften zur Beauskunftung hinterlegt sind [5]. Durch eine webbasierte Benutzeroberfläche und entsprechende Suchfunktionalitäten können dort mit wenig Aufwand geeignete Maschinen gefunden und deren spezifische Eigenschaften in das Simulationstool übertragen werden. Somit wird es möglich auch Leihgeräte ohne großen Aufwand in die Ablaufplanung mit einzubeziehen.

Die Importdaten werden anschließend in der Simulationssoftware miteinander verknüpft und eine ereignisgesteuerte Ablaufsimulation erzeugt. Ein erster Ablauf ohne Betrachtung der Detailvorgänge auf der Baustelle kann sofort gestartet werden. Hier werden die statistischen Schwankungen der Prozesse mit ihrer Auswirkung auf die Gesamtprozessdauer betrachtet. Sind Prozesse schwer vorherzusehen oder stark baustellenabhängig, können diese, wie anschließend gezeigt wird, im Detail simuliert werden. Hierzu wird die Vorgangsdauer in Abhängigkeit der Spielzeiten beteiligter Ressourcen und der gegebenen Baustellenrandbedingungen ermittelt.

Als Ergebnis der Simulation entsteht ein verbesserter Projektplan, in dem auch feingranular aufgeteilte Vorgänge betrachtet werden können. Dieser Projektplan, dem die benötigten Ressourcen und Materialien hinterlegt sind, kann anschließend in der Ausführungsphase als Basis für die Bedarfsermittlung und die Steuerung der Anlieferungen verwendet werden. Diese Auswertungen können zusätzlich für eine Prozesskostenrechnung genutzt werden, um detaillierte Kosteninformationen über die jeweilig simulierten Szenarien zu erhalten.

5 Detailsimulation der Baustellenvorgänge

Im Gegensatz zu weniger relevanten Standardabläufen werden kosten- oder zeitkritische Prozesse wesentlich detaillierter betrachtet und in einem sehr genauen, realitätsnahen Modell abgebildet. Bild 7 zeigt die daraus resultierende, hierarchische Struktur der Bauprozesse in der Detailsimulation.

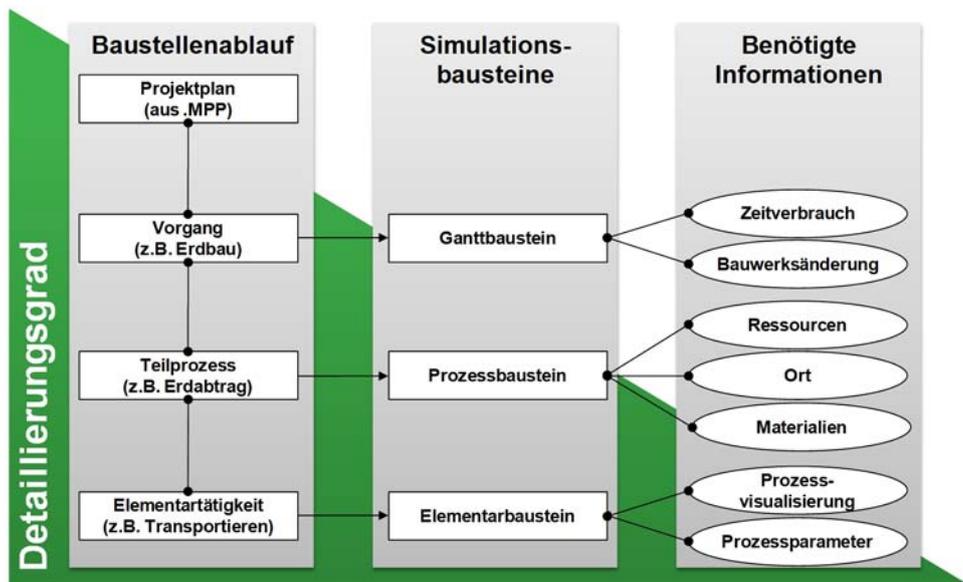
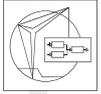


Bild 7 Hierarchieebenen der Baustellenabläufe



Der zuvor importierte Projektplan stellt einen groben Ablauf der Bauprozesse dar. Dieser ist in mehrere Vorgänge, wie beispielsweise den Erdbau, unterteilt, welche in der Simulation durch einen Gantt-Baustein abgebildet werden. Dieser kann wiederum aus weiteren Teilvorgängen mit entsprechenden Gantt-Bausteinen zusammengesetzt sein. Zur präziseren Spezifikation des Ablaufs sind zum Einen der Zeitverbrauch des Vorgangs und zum Anderen eine Information über den Fortschritt des Bauwerks nach Vorgangsende erforderlich. Bei Bedarf können Vorgänge in eine tiefere Detaillierungsebene überführt werden. Daraus ergeben sich mehrere Teilprozesse, welche in der Simulation mit sämtlichen Informationen angereichert werden, die für den Ablauf von Prozessbausteinen notwendig sind. Dazu gehören die örtliche Einordnung auf der Baustelle sowie die benötigten Ressourcentypen und Materialien, welche in diesen Teilprozessen verarbeitet werden. Für den höchsten Detaillierungsgrad wird ein Teilprozess weiter in dessen Elementartätigkeiten zerlegt. Um deren Ablauf sicherzustellen, sind zusätzlich die Prozessparameter sowie korrespondierende Visualisierungsinformationen notwendig.

Bild 8 zeigt den Gesamtzusammenhang der entwickelten Bausteine. Über Detaillierungsgrad und Simulationstiefe von Vorgängen wird bei der Implementierung des Simulationsmodells entschieden. Werden während der ausführlichen Experimente und Auswertungen weitere kritische Prozesse identifiziert, wird die Detailstufe für diese Vorgänge ebenfalls erhöht.

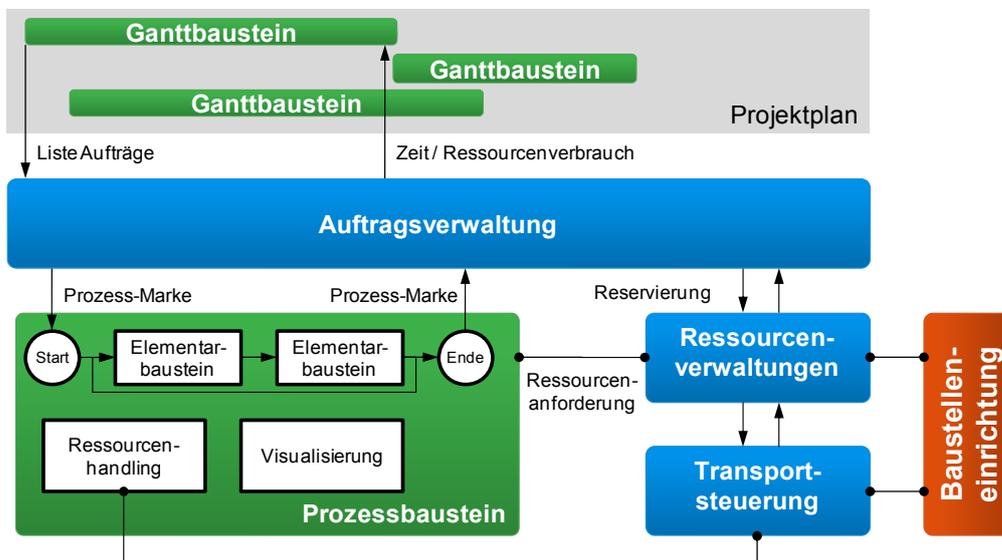


Bild 8 Interner Zusammenhang der Simulationsbausteine

Im Folgenden wird das Zusammenspiel der verschiedenen Bausteintypen erläutert. Gantt-Bausteine haben die Funktion einen Vorgang in Bezug auf seine Vorgänger und/oder ab einem bestimmten Termin zu starten. Wird ein Vorgang nicht weiter unterteilt, ist der Simulation lediglich ein Zeitverbrauch hinterlegt, welcher bei Beginn und am Ende eine Zustandsänderung des Bauwerks auslösen kann. Der Zeitverbrauch kann um eine statistische Komponente für die Monte-Carlo-Simulation erweitert werden. Dadurch kann eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Ende jedes Vorgangs und somit auch für den Fertigstellungszeitpunkt des Gesamtprojekts ermittelt werden. Für den Fall einer weiteren Detaillierung von Vorgängen werden im jeweiligen Gantt-Baustein die Informationen über die auszuführenden Teilprozesse und die benötigten Informationen aus Bild 7 vorgehalten. Beim Starten eines Gantt-Bausteines werden diese dann analog zum constraintbasierten Simulationsansatz (siehe [9]) über eine Auftragsverwaltung geordnet und alle zu dem Zeitpunkt möglichen Teilprozesse ausgeführt. Dabei wird in den Ressourcenverwaltungen geprüft, ob alle erforderlichen Ressourcen vorhanden sind, und diese für den Prozessbaustein reserviert. Anschließend erzeugt die Auftragsverwaltung einen Prozessbaustein und übergibt alle Informationen in Form einer Marke.



Bild 9 zeigt exemplarisch einen implementierten Prozessbaustein, welcher typischerweise in die drei Bereiche des Zustandsautomaten, des Ressourcenhandlings und der Visualisierung gegliedert ist. Im Zustandsautomaten (höchste Detaillierungsstufe) durchläuft eine Marke nacheinander verschiedene Elementartätigkeiten, wobei jeweils das Eintreten und das Vollenden einer Tätigkeit einen neuen Zustand aktivieren. Einzelne Zustände können mehrfach durchlaufen, aber auch übersprungen werden. Dies hängt von der Parametrierung und den aktuellen Randbedingungen des Prozessbausteins im Gesamtumfeld ab. Für das Ressourcenhandling sind Elementartätigkeiten in Form von Elementarbausteinen umgesetzt, die jeweils Material, Personal, Geräte und Flächen buchen und wieder freigeben können, indem Anfragen an eine globale Ressourcensteuerung gestellt werden. Die angeforderte Ressource ist jeweils einem bestimmten Tätigkeitstyp zugeordnet. Die Steuerung ermittelt eine entsprechende freie Ressource und übergibt diese an den Prozessbaustein. Sobald die Ressource eingetroffen ist, wird diese verarbeitet, der Prozess fortgesetzt und die Marke wird an die folgende Elementartätigkeit weitergeleitet. Des Weiteren übernimmt der Prozessbaustein Visualisierungsfunktionen, wie Drehungen und Translationen von 2D- und 3D-Objekten, die den aktuellen Prozesszustand übersichtlich abbilden.

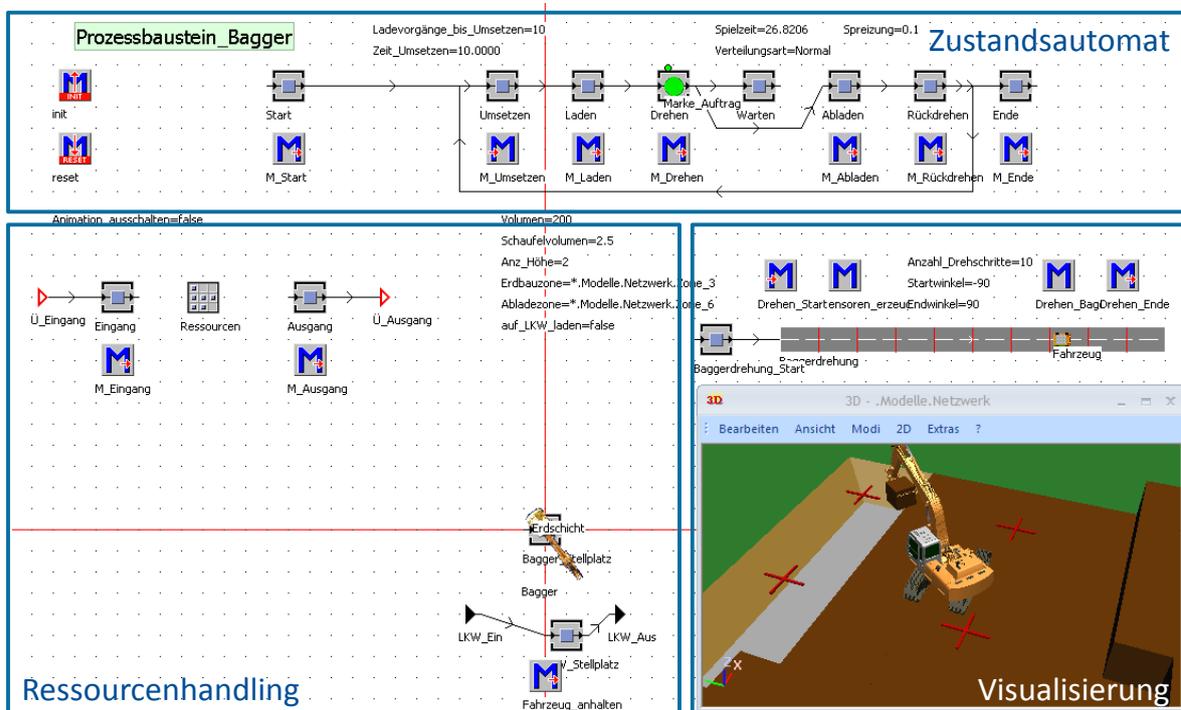


Bild 9 Prozessbaustein

Durch die in Bild 9 dargestellte Bausteinstruktur sind die verschiedenen Vorgänge in einer Baustelle beliebig kombinierbar. Die Ablaufbausteine haben standardisierte Schnittstellen, so dass auch beliebige weitere Aktivitäten in der Bausteinbibliothek umgesetzt werden können. Die Bausteinbibliothek ist objektorientiert aufgebaut, benutzerdefinierte Attribute, wie z. B. auch 3D-Objekte, sind jedem Baustein hinterlegt. Die Simulationsbibliothek ist für eine kombinierte 2D/3D-Visualisierung ausgelegt, so dass auch ein Einsatz als Kommunikationsmittel ermöglicht wird.

Dynamische Planung der Baustelleneinrichtung

Die Baustelleneinrichtung und das Layout der Baustelle schaffen die organisatorisch-strukturellen Voraussetzungen für einen störungsfreien, ungehinderten Materialfluss von Bauprozessen und sind daher Grundlage für die Detailsimulation. Dafür ist es notwendig Transportwege, Logistikflächen und den Geräteeinsatz derart zu planen, dass der Materialfluss trotz flexibler Baustellenabläufe sowie wech-

selnder Bedarfsorte und Anlieferstrategien sichergestellt wird [6]. Mithilfe der Ablaufsimulation sollen logistische und räumliche Kollisionen aufgedeckt und entsprechend optimiert werden.

Für die Planung des Materialflusses auf Baustellen wurde eine modulare Bibliothek mit intelligenten Baustelleneinrichtungsobjekten entwickelt. Über definierte Schnittstellen lassen sich die Objekte mit anderen Bausteinen koppeln. Neben den 2D- und 3D-CAD-Daten der herkömmlichen Baustelleneinrichtung sind in diesen weitere Attribute und Funktionen (z. B. Zeit und Kosten für die Errichtung) hinterlegt, um entsprechende Ergebnisse aus den Experimenten zu generieren. Die zeitliche Dynamik der Baustellenumgebung wird durch Objekte abgebildet, die spezifisch über die Zeit veränderlich sind. Somit können unterschiedliche Transportnetze, Szenarien verschiedener baustelleninterner Materialflussplanungen, aber auch der Geräteinsatz auf Nutzen und Qualität untersucht werden. Hierzu können Bausteine aus der Bibliothek auf dem Baufeld platziert und mit Hilfe von Dialogen parametrisiert werden. So kann die Baustelle planbasiert und in Abhängigkeit der bekannten Anliefer- und Lagerstrategien eingerichtet werden. Bild 10 zeigt das Vorgehen.

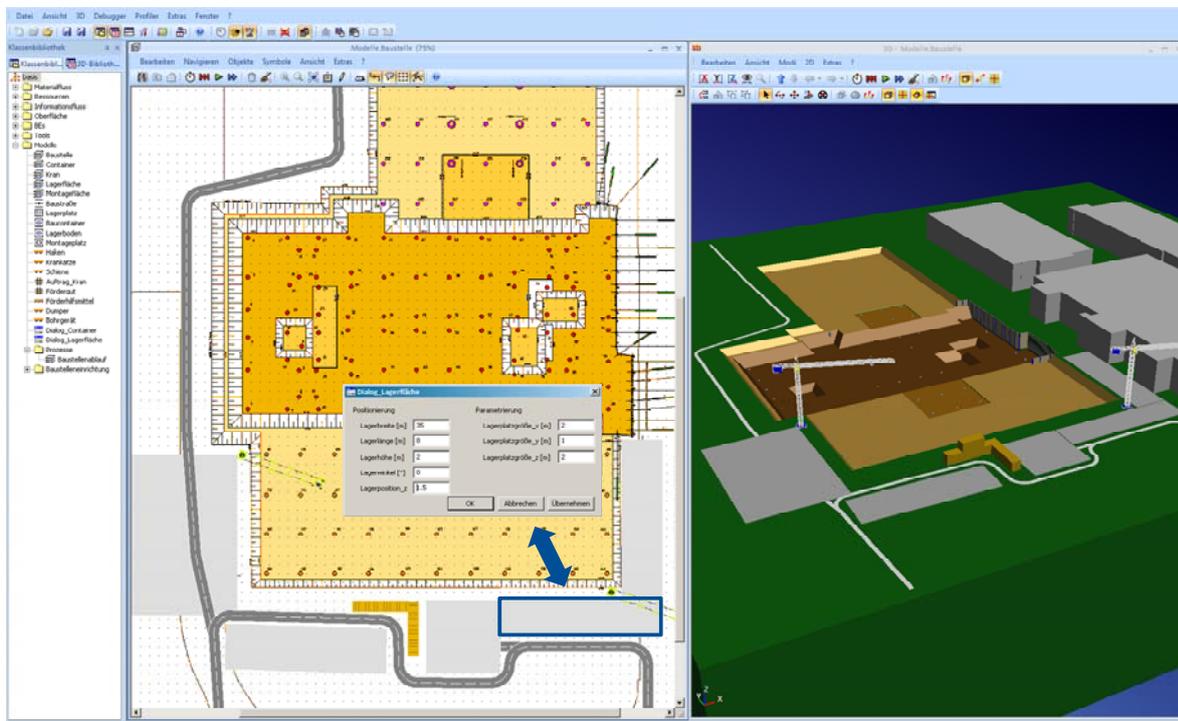
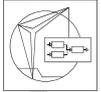


Bild 10 Layoutplanung und Baustelleneinrichtung

Sobald ein Baustelleneinrichtungselement auf dem 2D-Plan positioniert wird, wird das entsprechende 3D-Modell des Objektes geladen sowie das Gesamtmodell des räumlichen Layouts automatisch aktualisiert. Somit kann eine aufwandsarme, dreidimensionale Kontrolle der Einrichtungsgegenstände durchgeführt werden. Die jeweilige Konfiguration wird für jede Bauphase spezifisch erstellt und gespeichert. Auswertungen des Gesamtmodells sollen unter Anderem einen optimierten Einsatz von Geräten, ein ausgewogenes Transportnetz sowie sinnvoll geplante Flächen für Lagerung und Montage zum Ergebnis haben.

Die Bausteinbibliothek beinhaltet Baustraßen, die entsprechend der durchgeführten Maßnahme im Modell platziert werden können. Den verschiedenen Bauphasen können unterschiedliche Transportnetze zugeordnet werden, die aus parametrierbaren Wegen aufgebaut sind. Parameter sind beispielsweise die Ein- oder Mehrspurigkeit, aber auch Bauart, Steigung oder Rollwiderstand, welche für die Geschwindigkeit der Transporte maßgeblich sind. Somit ergibt sich für jeden Transportweg ein



Streckenprofil, das Basis für die oben erläuterte Kinematiksimulation ist. Mit Hilfe von Simulationsexperimenten kann für die spätere Ausführungsphase ein auf die jeweilige Bauphase optimiertes Transportnetz erzeugt und im Gesamtsystem validiert werden.

Die einzelnen Elemente der Baustelleneinrichtung sind über die Zeit veränderlich, um speziell im Bezug auf die Flächenplanung von Lagern oder Montageplätzen eine dynamische Belegung zu ermöglichen. Größe und Position können so den verschiedenen Bauphasen angepasst werden. An dieser Stelle ist es möglich, diverse Tools zur Optimierung des Layouts (z. B. [7], [8]) zu nutzen und den optimierten Entwurf einzubinden. Unbeplante Flächen einzelner Bauphasen stehen ebenso wie ungenutzte Geräte einer Ressourcenverwaltung zur Verfügung, die eine Doppelbelegung von Flächen unterbindet. So entstehen je nach Parametrisierung und Materialfluss andere Abläufe, da Prozesse – in Abhängigkeit des auszuführenden Prozessschritts – Einrichtungsfächen dynamisch anfordern und freigeben.

Ressourcenzuweisung

Eine Herausforderung in dieser flexiblen Simulationsarchitektur ist die Zuweisung der passenden Ressourcen zu den jeweiligen Vorgängen. Dabei gilt es verschiedene Fälle zu überprüfen, welche im Baustellenumfeld auftreten können:

- Eignung
 - Eine Tätigkeit kann von unterschiedlichen Ressourcen ausgeführt werden.
 - Eine Ressource kann mehrere Tätigkeiten mit unterschiedlicher Eignung ausführen.
- Zuweisungstiefe
 - Eine Tätigkeit und Parameter werden vorgegeben (z. B. Transport, 5t, Schüttgut).
 - Eine Ressourcengruppe und Parameter werden vorgegeben (z. B. Dumper, Nutzlast größer als 5t).
 - Ein Ressourcentyp wird vorgegeben (Hersteller X, Typ Y).
 - Eine spezifische Ressource wird benötigt.

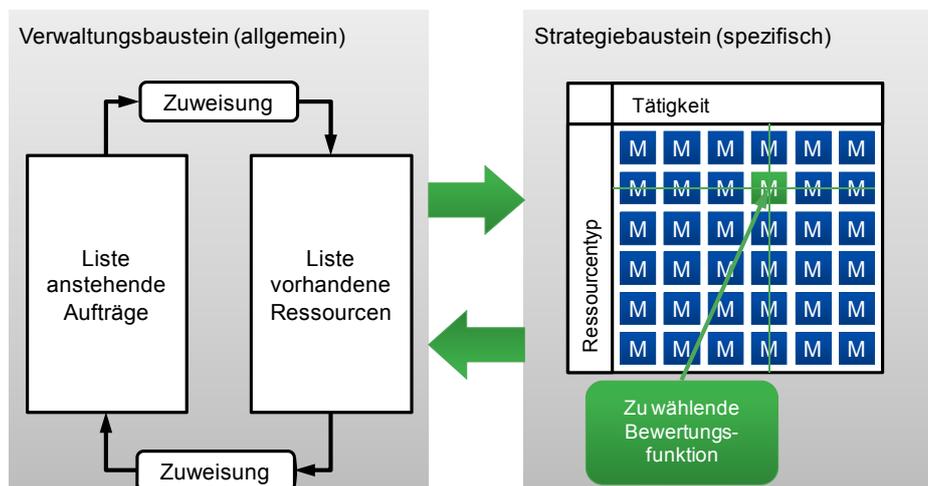
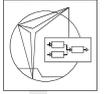


Bild 11. Flexible Steuerungsarchitektur

Deshalb werden die Ressourcenanforderungen aus den Prozessbausteinen in einer zentralen Ressourcenverwaltung bearbeitet. Um auf die verschiedenen Anforderungs- und Zuweisungsarten zu reagieren, wurde eine flexible Steuerungsarchitektur geschaffen, welche auf die Ressourcentypen Personal, Geräte, Material und Fläche anwendbar ist. Die Anforderung der Ressourcen erfolgt dynamisch zur Laufzeit über das Brokerprinzip, welches in Bild 11 auf der linken Seite schematisch dargestellt ist.



Dazu werden alle auszuführenden Buchungsaufträge der Elementartätigkeiten sowie alle vorhandenen Ressourcen in zwei Listen gesammelt. Nach jedem Eingang einer neuen Ressource oder eines Auftrages wird eine Funktion aufgerufen, welche die am besten geeigneten Ressourcen dem bestmöglichen Auftrag zuweist. Diese Bewertungsfunktionen können variieren, um je nach Ressourcen- und Auftrags-typ auch spezifische Parameter zu berücksichtigen. Die Parameter des Auftrags sowie der Ressourcen, wie z. B. Entfernung, Gewicht, etc., werden zudem verschieden stark gewichtet um eine optimale, für jede Baustelle anpassbare Zuweisung zu vollziehen. Die eingesetzte Strategie wird somit zum Simulationsparameter und kann für eine Optimierung genutzt werden.

6 Simulationsexperimente und Auswertung

Die Ergebnisse der durchgeführten Simulationsexperimente werden auf mehreren Ebenen bereitgestellt. Zum einen soll dem Projektplan, welcher auch als Eingang für die Simulation dient, die simulierten Dauern, die dafür benötigten Ressourcen und Materialien angefügt werden. Somit werden für die spätere Ausführungsphase detaillierte Prozessinformationen übergeben. Zum anderen können Maschinenauslastungen und -einsatzzeiten auf verschiedenen Detaillierungsebenen in eine Prozesskostenrechnung exportiert werden, so dass eine verursachungsgerechte Kostenbetrachtung vorgenommen werden kann.

Die Validierung der Baustelleneinrichtung stellt einen weiteren wichtigen Schritt im Konzept dar. Auf Basis der Prozesssimulation werden aussagekräftige Auswertungen über die Auslastung der Einrichtungsgegenstände für jede Phase gesondert erzeugt. So können beispielsweise Lagerfüllstände überprüft und die Kapazität überlasteter Flächen erweitert oder Maschinenauslastungen von teuren Großgeräten optimiert werden.

Außerdem kann durch die Modellierung innerhalb der Simulationsumgebung – anders als im CAD-System – direkt eine Materialflussanalyse, z. B. mittels Sankey-Diagramm oder Engpassanalyse, erfolgen. Dazu ergibt sich der Vorteil, dass das aktuelle Layout mit Hilfe der Simulation hinsichtlich eines optimalen Materialflusses und der effizienten Anordnung einzelner Funktionsflächen durch eine genügend große Anzahl an Experimenten validiert werden kann. Die Visualisierung der Materialflüsse ermöglicht eine übersichtliche Planung, in der Auswirkungen von Layoutänderungen einfach analysiert werden können.

7 Zusammenfassung und Ausblick

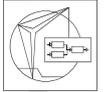
In den bisherigen Arbeiten wurden die Modelle der einzelnen Bauprozesse erstellt, im Rahmen einer Bausteinbibliothek zusammengefasst und damit begonnen, diese anhand bereits abgeschlossener Demobaustellen zu validieren. Für eine ausreichende Überprüfung der Prozessbausteine müssen jedoch noch weitere Praxistests durchgeführt werden. Die kommenden Demobaustellen sollen daher intensiv begleitet werden, um weitere Realdaten für den Vergleich mit den simulierten Werten zu erhalten.

8 Literaturverzeichnis

- [1] H. BAUER: Baubetrieb. Berlin: Springer, 2006.
- [2] F. HÜSTER: Leistungsberechnung der Baumaschinen, 2nd ed. Düsseldorf: Werner, 1992.
- [3] G. GIRMSCHIED: Leistungsermittlung für Baumaschinen und Bauprozesse. Berlin u. a.: Springer, 2003.
- [4] Y. Ji, K. LUKAS, M. OBERGRIEBER, and A. BORRMANN: Entwicklung integrierter 3D-Trassenproduktmodelle für die Bauablaufsimulation, in: Tagungsband des 20. Forum Bauinformatik, Dresden, 2008.



- [5] W. A. GÜNTNER, S. KESSLER, T. FRENZ, B. PETERS and Walther K.: Einsatz einer Baumaschinen-datenbank (EIS) bei der Bayerischen BauAkademie, no. 12, pp. 736–738, 2008.
- [6] RAINER SCHACH, JENS OTTO: Baustelleneinrichtung – Grundlagen – Planung – Praxishinweise – Vorschriften und Regeln, Wiesbaden: B.G Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2008.
- [7] F. ZHOU, S. M. ABOURIZK, H. AL-BATTAINEH: Optimisation of construction site layout using a hybrid simulation-based system, in: Simulation Modelling Practice and Theory, 2009.
- [8] SAI-ON CHEUNG, THOMAS KIN-LUN TONG, CHI-MING TAM: Site precast yard layout arrangement through genetic algorithms, in: Automation in Construction, 2002.
- [9] M. KÖNIG, U. BEIBERT: Constraint-basierte Simulation von Bauprozessen, in: Auf dem Weg zum digitalen (Bau-)haus-Bau, Weimar, 2008, pp. 17–36.
- [10] DIN e.V., VOB 2006 – Teil A – DIN 1960, Teil B – DIN 1961, Teil C – ATVen: Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen, Gebundene Ausgabe ed.: Beuth, 2006.



Baukalkulation durch Prozesssimulation in virtuellen Baustellenwelten

Durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG gefördert¹, wurde an der Professur Baubetrieb und Bauverfahren im Laufe von zwei Jahren das Thema „Baukalkulation durch Prozesssimulation in virtuellen Baustellenwelten“ bearbeitet. Die wesentlichen Ergebnisse sollen nachfolgend kurz vorgestellt werden.

1 Ausgangsfragen und Zielsetzung des Projekts

Ziel des Vorhabens war es, neue Prozesse und Verfahren zur Durchführung der Baukalkulation zu entwickeln, welche direkt auf den 3D-Computermodellen der Planer und konstruktiven Ingenieure aufbauen. Die neue Methode der Kalkulation soll die Zuverlässigkeit der Vorausschätzung der zu erwartenden Bauproduktionskosten im Bauunternehmen steigern, um im Vorfeld der Angebotsabgabe auf Bieterseite eine zutreffendere Einschätzung der realen Baukosten zu erreichen.

Je nach Qualität der Ausschreibung basieren Kostenkalkulationen heute aufgrund der Komplexität und der versteckten Risiken zu einem beträchtlichen Teil auf unzureichend fundierten Annahmen. Im vorliegenden Forschungsvorhaben werden die Grundlagen für ein Werkzeug entwickelt, mit dem der Kalkulator diese Annahmen in einem Bauproduktionsablauf am Modell definiert. Dabei werden Kostenparameter der durchzuführenden Baumaßnahme auf Basis der Entscheidungen des Kalkulators automatisch vom Computer erfasst und die getroffenen Annahmen für die folgenden Prozessschritte visuell aufgearbeitet.

Entsprechend dem Projektantrag gliedert sich das Arbeitsprogramm in vier Teile.

- Der erste Teil definiert ein Anforderungsprofil an das zu erstellende Werkzeug für den Kalkulator/die Arbeitsvorbereitung aus baubetrieblicher und baukalkulatorischer Sicht.
- Der zweite Teil bestimmt ein exemplarisches Spektrum abzubildender Prozesslogiken und bildet diese theoretisch ab.
- Im dritten Teil werden ausgewählte Prozesslogiken in der Entwicklungsumgebung implementiert und es wird die Datenbankanbindung aufgebaut.
- Im vierten Teil erfolgen schließlich der Test und die Evaluation des entwickelten Werkzeugs an einem praktischen Beispiel aus der Baukalkulation.

¹ DFG-Aktenzeichen BA 2215/4-1, Erstbewilligung der DFG für dieses Projekt vom 30.11.2005



2 Entwicklung der durchgeführten Arbeiten

Die eigenen Arbeiten wurden zunächst mit der Analyse des Anforderungsprofils begonnen, welches die aus baubetrieblicher und kalkulatorischer Sicht zu entwickelnden Werkzeuge erfüllen sollten. Der bisherige Prozess der Kalkulation wird wesentlich gespeist aus einer Kombination von objektiven Maschinen- und Aufwandskennwerten und der jeweiligen situativen Einschätzung der lokalen und globalen Randbedingungen des jeweiligen spezifischen Projekts. Dieses erfolgt durch den Kalkulator bzw. die Arbeitsvorbereitung, die damit die wesentlichen Eckpunkte für eine angepasste Kalkulationsumgebung setzen und wesentlich zur Treffsicherheit der Kalkulationsprognose beitragen.

Bisher liegen die Daten von vergleichbaren Bauprozessen aus der Vergangenheit lediglich rudimentär vor. Systematische Studien zu Aufwandswerten sowie verifizierte Messungen von Maschinenleistungen sind in der Literatur verfügbar. Der Kalkulator verfügt darüber hinaus über detaillierte Werte, die in der Regel im eigenen Unternehmen zusätzlich erhoben und ebenfalls in die Kalkulation übernommen wurden. Die Randbedingungen eines jeweils spezifischen Projekts werden im anschließenden Kalkulationsprozess eingearbeitet, wobei hierbei wiederum nach objektiv bestimmbar (z. B. Entfernung zum nächsten Lieferanten) und subjektiv einzuschätzenden Parametern (z. B. komplizierte oder schlichte Bauteilgeometrie) differenziert werden kann.

Die möglichen Ausprägungen sowie deren Wertebereiche sind breit gefächert. Derzeit werden diese eher intuitiv durch die Bauleitung erfasst und mehr oder weniger systematisch an die Arbeitsvorbereitung und den Kalkulator weitergegeben.

Folgende Schwachstellen und zu berücksichtigende Parameter wurden somit identifiziert:

- Unsicherheiten in der Definition des Bausolls, also der Beschreibung von Umfang und Art der durch einen Bauvertrag bestimmten Leistung. Durch 3-D-Darstellungen kann die Beschreibungstiefe verbessert werden, jedoch ergibt sich daraus noch keine hinreichende Voraussetzung für eine ausreichende Detaillierungstiefe und die Reduzierung von Unsicherheiten.
- In den bisherigen Kalkulationsverfahren werden wesentliche Kostenbestandteile durch allgemeine Umlagen und generelle Zuschläge erfasst und abgegolten. Mit Hilfe der bei einer Bauprozesssimulation erfassten Daten wird es möglich, die Inanspruchnahme bestimmter indirekter Leistungen, z. B. Transportleistungen, separat zu erfassen. Hierbei sind parallel Korrekturen an den bisherigen etablierten Aufwandswerten vorzunehmen, sofern sie bisher die Pauschalierung einiger der allgemeinen Leistungen beinhalteten.
- Einen deutlichen Einfluss auf die Kalkulation hat der gewählte Bauablauf, der in der heutigen Kalkulationspraxis eine sehr untergeordnete Rolle spielt und zum Teil zunächst vollkommen außer Acht gelassen wird. Die kalkulierten Teilleistungen werden in der Regel unabhängig voneinander betrachtet und mit Kosten bewertet. Zur Verifizierung dieser Herangehensweise wurde mit Hilfe einer testweise erstellten Simulationsumgebung der zeitliche Einfluss der Baureihenfolge auf die Bauzeit einer abgegrenzten Teilleistung untersucht [1].
- Die Auswertung zahlreicher Quellen im Bereich der Aufwands- und Leistungswerte zeigte auf, dass die hierzu verwendeten Richtwerte nur bedingt zutreffen. Ursachen sind vor allem in den zur Erfassungsumgebung abweichenden Einsatzbedingungen während der Leistungserbringung zu sehen. Diese abweichenden Bedingungen drücken sich u. a. in der Kolonnenzusammensetzung oder in der Einrichtung des Arbeitsplatzes aus, wie in der vom Autor wesentlich mitbetreuten Dissertation [2] nachzulesen ist. Weitere Ergebnisse aus der Literatur wurden ausgewertet.
- Projektspezifische Randbedingungen können einerseits den Bauablauf beeinflussen oder sich andererseits in den Leistungs- und Aufwandswerten niederschlagen. Zu den projektspezifischen Randbedingungen zählen vor allem logistische Aspekte, wie z. B. die Verfügbarkeit und Anordnung von Lagerflächen oder Zwangspunkten bei der Materialbelieferung. Einige grundlegende Überlegungen dazu wurden z. B. in [3] veröffentlicht.

Im zweiten Teil des Arbeitsprogramms standen die Prozesslogiken im Ingenieurbau im Vordergrund. Charakteristisch für Prozesslogiken ist die besonders stark ausgeprägte prototypische Situation (Unikat), die individuelle Randbedingungen und Einschränkungen aus baubetrieblicher Sicht mit sich bringt. Hierbei wurden in einem ersten Schritt Prozesse so zerlegt, dass sie sich aus nicht mehr reduzierbaren Einzelprozessen zusammensetzen, deren Charakteristik im Gesamtprozess die mehrfache Wiederholung dieser identischen Einzelprozesse ist.

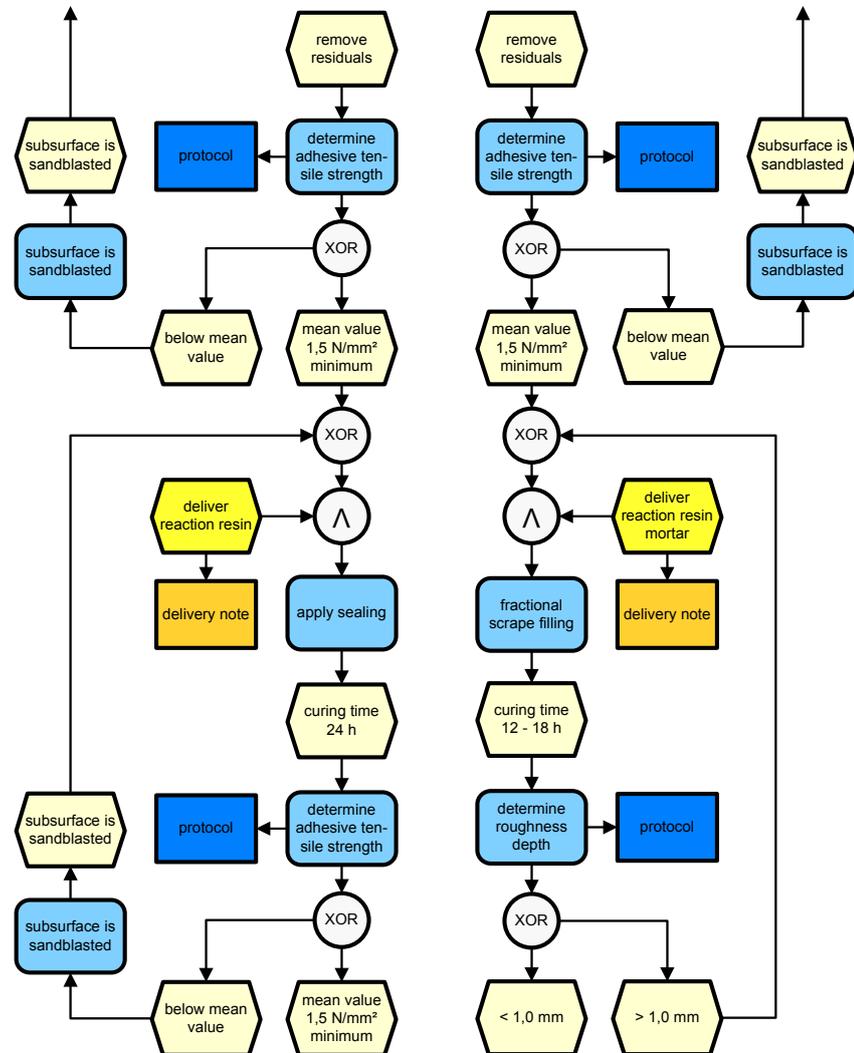
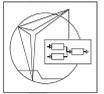
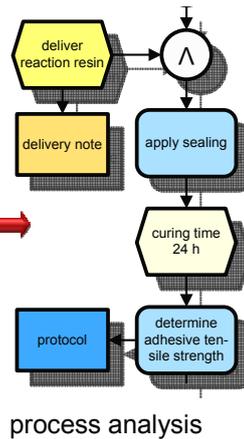


Bild 1 Bauprozessanalyse mit Hilfe von EPC (Event-driven Process Chains)

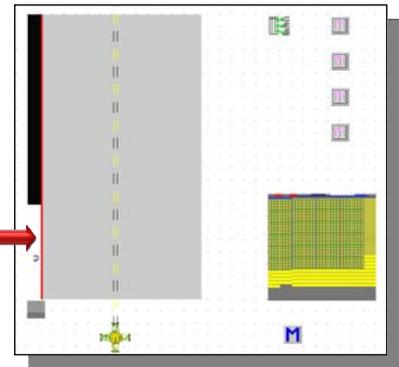
Diese Einzelprozesse wurden exemplarisch für zwei unterschiedliche Typen von Bauaufgaben untersucht. Zum einen wurde eine typische Bauaufgabe aus dem Hochbau, der Innenausbau von Rohbauten mittels Trockenbauwänden, weiter entwickelt. Hierbei konnten parallele Forschungsarbeiten zur Optimierung von komplexen Zusammenhängen innerhalb eines Simulationsmodells genutzt werden (Einsatz von Soft Constraints zur Simulation von Trockenbauarbeiten [4]). Zum anderen wurde eine Ingenieuraufgabe als weitere Test- und Entwicklungsumgebung gewählt – und zwar der Brückenbau. Um hier zunächst die Komplexität der überwiegend sehr individuell geplanten Prozesse im Brückenbau auf ein erfassbares Maß zu reduzieren, wurde der Untersuchungsgegenstand Brücke auf die Herstellung der Brückenkappen eingegrenzt (Bild 2). Brückenkappen stellen überwiegend eindimensional linear verlaufende Prozesse dar und eignen sich deshalb gut für eine Umgebungsentwicklung, die trotz der Abbildung in detaillierten Ablaufdiagrammen immer auch noch händisch nachvollziehbar und gut kontrollierbar sind.



documentation of construction site



process analysis



implementation of simulation tool

Bild 2 Implementierung des Bauprozesses in ein Simulationstool

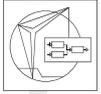
Die in Teil 3 des Arbeitsprogramms vorgesehene Verknüpfung der entwickelten und beschriebenen Einzelprozesse mit Objekten einer virtuellen Baustelle verursachte unvorhergesehene Schwierigkeiten. Ein Abruf virtueller Echtzeit benötigte zunächst die Ermittlung und Bereitstellung der entsprechenden in Details zutreffenden Zeitparameter. Eine virtuelle Echtzeit, wie sie BUCKLING in [5] und [6] ausführlich dargestellt hat, setzt in jedem Fall voraus, dass diese zunächst mit entsprechend zutreffenden Aufwandswerten bestückt ist, die in einer Prozessdatenbank abgelegt sind und im Zuge der Kalkulation bzw. Arbeitsvorbereitung vom Kalkulator mit dem Abruf von Teilschritten der Arbeitsprozesse als Stammdaten abgerufen werden können.

Eine Lösung dieses Problems wurde darin gesucht, die typischen Baustellenprozesse nach relevanten Informationsgebern aus dem laufenden Betrieb abzufragen. Hierbei wurde zutreffend angenommen, dass derzeit kein einzelnes Informationsmedium (Tagesbericht, Lieferschein, RFID-Erfassung, Laser-Scanning etc.) allein ausreichende Baustelleninformationen generieren kann, mit denen sich der reale Ist-Ablauf eines Bauprozesses sicher bestimmen lässt [7].

Bei der eingehenden Analyse der Arbeitsweise von Kalkulator und Arbeitsvorbereitung wurde offenbar, dass die Prozessschritte einer komplexen Fertigung in vielen Fällen nur eine geringe Zahl zwingender logischer Abhängigkeiten aufweisen (Montage von Wand und Stütze erfolgt nach der Herstellung von Fundament und vor dem Einschalen der darüber liegenden Decke).

Insbesondere im Hochbau ist durch den Kalkulator oder die Arbeitsvorbereitung eine große Anzahl von Entscheidungen zu treffen, die lediglich durch die Zweckmäßigkeit gegeben sind, dass eine mögliche Variante günstiger ist als eine andere. Da dieses Kriterium der Günstigkeit nicht nur auf die Kosten zu beziehen ist, ist eine umfassende Bewertung entsprechend anspruchsvoll. Im Extremfall ist sogar davon auszugehen, dass im vorliegenden Beispiel die Montage der Decke vor den darunter liegenden Stützen und Wänden erfolgen kann, sofern sie vorübergehend auf Hilfspfeilern abgesetzt werden kann und die Stützen später nachträglich darunter betoniert werden. Diese zunächst nicht logisch erscheinende Reihenfolge hat entsprechende Kosten, kann aber durch andere Vorteile im Gesamtrahmen die günstigere oder sogar die einzig mögliche sein. Ein bekanntes Beispiel dafür ist die sogenannte Deckelbauweise, die in innerstädtischen Bereichen häufig eingesetzt wird [8].

Im vierten Teil des Arbeitsprogramms war der Arbeitsschwerpunkt neu zu verorten, da die aus dem vorherigen Teil erwarteten realen und praxistypischen Ergebnisse aus Anwendungen im Ingenieurbau nicht rechtzeitig generiert werden konnten. Derzeit laufen noch Erhebungen und Feldstudien über mehrere Monate auf zwei großen Brückenbaustellen in Thüringen, durch die die ersten, bereits in 2007 im Rahmen von Abschlussarbeiten ermittelten Arbeitsparameter an kleineren Einfeldbrücken [9], [10] ergänzt und erweitert werden. Erste Tendenzen wurden bereits in Chicago vorgestellt [11].



Der Bau mehrerer Straßenbrücken unterschiedlicher Komplexität und unter verschiedenen Randbedingungen wurde begleitet, detaillierte erfasst und dokumentiert. Die größte war eine 445 m lange Spannbeton-Autobahnbrücke, die sich dadurch auszeichnete, dass eine Vielzahl von Randbedingungen den Bauprozess, die Verfahrensauswahl sowie die Terminplanung beeinflusste. Bei der Prozessbeobachtung wurden der Materialfluss, der Kapazitätseinsatz sowie alle Störungen und die daraus folgenden Abweichungen sowie die korrigierenden Maßnahmen erfasst, um sie in künftigen Simulationsszenarien zu nutzen.

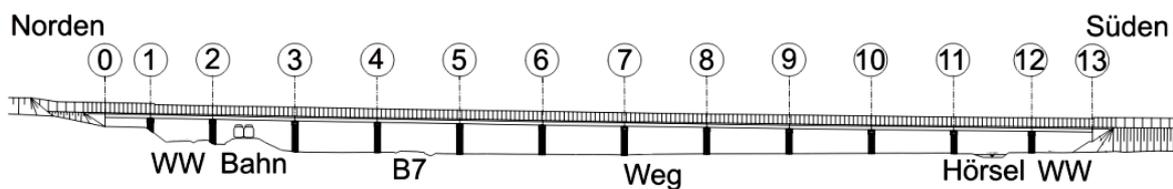
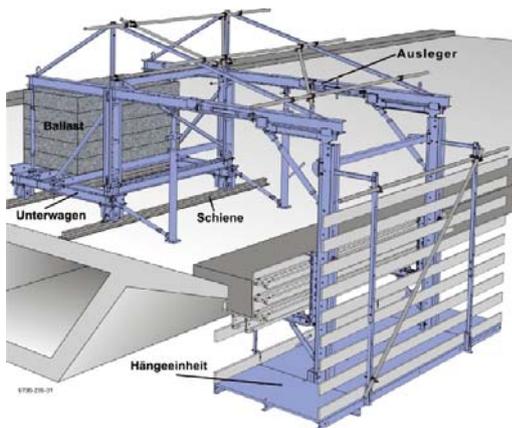
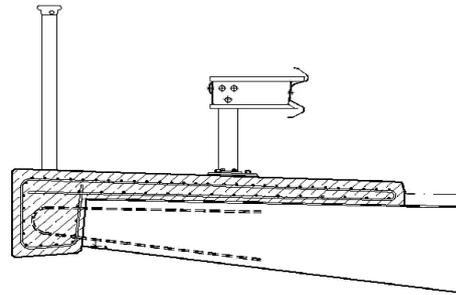


Bild 3 Monitoring von Brückenkapenarbeiten [11]

Für die Anwendung im Hochbau, im Segment Innenausbau, konnten demgegenüber bessere Ergebnisse erreicht werden. Hierbei ist zu beachten, dass der Trockenbau innerhalb des Hochbaus eine Sonderstellung einnimmt, da die weitgehend standardisierten Arbeitsschritte im Raum bildenden Ausbau überschaubar sind und in Leistungsverzeichnissen deshalb nur wenige Positionsnummern umfassen. Dennoch haben gerade die vielfältigen Umgebungsbedingungen großen Einfluss auf die Produktivität einer Arbeitskolonne. Darüber hinaus bestimmen häufig räumliche Enge, Zeitdruck und parallel zueinander konkurrierende unterschiedliche Gewerke die erreichbare Arbeitsleistung. Dieses wurde durch einige prototypische Ansätze zur Bewertung von Arbeitsstrategien und individueller Arbeitsbelastung exemplarisch ermittelt [12], [13].



3 Darstellung der erreichten Ergebnisse

Die parallele Untersuchung der Bauprozesse einerseits von der Seite der methodischen Beschreibung für eine virtuelle Umgebung und andererseits ausgehend von der praxisorientierten Vielfalt von Parametern und Prozessalternativen hat dazu geführt, dass zunächst die den Prozessen zugrunde liegenden Logiken zu beschreiben waren. Systematische Arbeiten in Bezug darauf, nach welchen Logiken die chaotisch erscheinenden Prozesse gefiltert, systematisiert und priorisiert werden können, waren bisher für das Bauwesen nicht bekannt. Ohne diese baubetrieblich orientierte Grundlagenarbeit konnten bisher jedoch vielfache Forschungsergebnisse, insbesondere aus der Bauinformatik, nicht ausreichend für die Anwendung adaptiert und weiter entwickelt werden.

Während im Ingenieurbau häufig durch zwingende Abhängigkeiten bereits ein ausreichend bestimmbarer Bauablauf projektiert werden kann, überwiegen im Hochbau die zweckmäßigen Abhängigkeiten. Hier können die Prozesse der Arbeitvorbereitung und der Kalkulation nun nachhaltig durch den Ansatz begründeter und wissenschaftlich untersuchter Priorisierungen zielgerichtet unterstützt werden. Die Ergebnisse sollten jedoch noch in Anwendung auf unterschiedliche typische Arbeiten am Bau und verschiedene Gewerke und Gewerkekombinationen überprüft werden.

Im Zuge der Protokollierung von Ist-Zuständen zur Übernahme in die Datenbestände der Kalkulation wurden noch Defizite festgestellt. Bisherige Forschungsarbeiten zum Monitoring von Bau-Ist-Zuständen befassen sich überwiegend mit jeweils einem Informationsmedium (z. B. RFID: HELMUS, Bergische Universität Wuppertal; Fernerkundung durch Befliegen: RANK und GÜNTNER, Technische Universität München; Laserscanning: KUTTERER, LEIBNIZ-Universität Hannover; Photoscanning: MOTZKO, Technische Universität Darmstadt, etc.).

Da die aufzunehmenden Parameter von Bauzuständen jedoch in großer Bandbreite variieren, sind je nach Arbeitsprozess grobe geometrische Daten zu erfassen (Aushub, Baugrubenverfüllung), Baubehelfe zu identifizieren (Gerüst, Schalung), Materialzustände zu bestimmen (Beton: frisch, abgebunden, ausgehärtet), Farbnuancen zu beobachten (Verkleidung von Fassaden) oder Schichtstärken unterhalb des mm-Bereiches zu messen (Beschichtung und Korrosionsschutz von Stahlteilen). Das führt dazu, dass trotz wesentlicher Entwicklungsschritte jedes einzelnen Informationsmediums für die Bau-Ist-Aufnahme dennoch gerade der Einsatz und das Potential mehrerer unterschiedlich agierender und aufeinander abgestimmter Erfassungssysteme für die bautypischen Anforderungen untersucht werden sollten.

Die Kombination geeigneter Mess- und Erfassungssysteme erfordert grundlegende Forschungsarbeiten, mit denen sicher auf die aktuellen Prozesszustände in einem unikat-orientierten Bauprozess geschlossen werden kann. Es ist vorgesehen, hierzu demnächst einen entsprechend qualifizierten Forschungsantrag zu stellen.

4 Stellungnahme zur Verwertbarkeit

Die Verwertbarkeit der Ergebnisse der grundlagenorientierten Forschung in der derzeitigen Wirtschaftssituation ist schwierig. Bauunternehmen und Ingenieurbüros, die potentielle Anwender und Endentwickler der hier kurz skizzierten Forschungsergebnisse sein können, sind bei der Unterstützung von Entwicklungen bis zur Anwendungsreife grundsätzlich und in dieser Zeit noch besonders zurückhaltend.

5 Kooperationspartner (im In- und Ausland)

Durch das Forschungsvorhaben konnten einige wesentliche Aktivitäten im In- und Ausland begonnen bzw. intensiviert werden.

Eine enge Kooperation entstand zum Forschungsverbund ForBAU der Bayerischen Forschungsstiftung, bei dem nicht zuletzt aufgrund dieses Forschungsvorhabens auch die Mitarbeit des Verfassers als Gutachter gewünscht wurde.

Ausgehend von den im Zuge der Forschungstätigkeit intensivierten wissenschaftlichen Kontakten wurde der im November 2008 eingereichte Antrag zur Einrichtung eines Schwerpunktprogramms bei der DFG („Digitale Baufabrik“) entwickelt, der leider kürzlich zunächst abschlägig beschieden wurde.

Die Arbeiten zur Simulation von Bauprozessen haben zu langjährigen Arbeitstreffen in einer Allianz von Bauinformatikern und Baubetrieblern und unter Hinzuziehung von Geodäten und Logistikern geführt. Daraus wurde zu Beginn 2009 der Entschluss gefasst, innerhalb der Gesellschaft für Informatik (GI) eine ASIM-Arbeitsgruppe zum Thema Unikatprozesse zu gründen. Die Gründung erfolgte im Mai 2009 und bietet eine verstärkte Plattform, um die Forschungsergebnisse aus der Simulation in Produktion und Logistik auch für das Bauwesen zur Anwendungsreife weiter zu entwickeln.

Vor wenigen Monaten konnte unter Federführung der TU Dresden das BMBF-Verbundprojekt MEFISTO (Management – Führung – Information – Simulation im Bauwesen; eine Modell-, Informations- und Wissensplattform im Bauwesen) eingeworben werden, in welchem die Simulation unter Verwendung entsprechender durchgängiger Daten ein eigenes Arbeitspaket darstellt, an dem auch die Professur Baubetrieb und Bauverfahren der Bauhaus-Universität Weimar beteiligt ist.

6 Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses

Im Zuge der Bearbeitung des Forschungsprojekts konnte wissenschaftlicher Nachwuchs vielfältig qualifiziert werden. Bereits eine im Thema angesiedelte Bachelorarbeit brachte sehr gute Ergebnisse, so dass sie mit einem Preis beim bundesweiten Wettbewerb Built-IT ausgezeichnet werden konnte. Die Bearbeitung von Diplomarbeiten mit ebenfalls sehr gutem Ergebnis führte zur Übernahme der Absolventen als wissenschaftliche Mitarbeiter auf Promotionsstellen.

Eine Dissertation wird noch im Laufe dieses Jahres auf Basis der dargestellten Forschungsergebnisse und weiterer ergänzender Entwicklungen eingereicht werden.

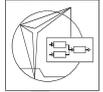
Das hiermit abgeschlossene DFG-Forschungsprojekt unterstützte den Verfasser sehr erfolgreich dabei, zusammen mit der Juniorprofessur für theoretische Methoden im Projektmanagement (Professor MARKUS KÖNIG) an der Bauhaus-Universität Weimar eine siebenköpfige Arbeitsgruppe mit dem Forschungsschwerpunkt Simulation von Bauprozessen aufzubauen.

7 Zusammenfassung

Bauprozesse sind dadurch gekennzeichnet, dass sie häufig Unikatcharakter und einen geringen Grad an Standardisierung und Wiederholungen haben. Die bisher entwickelten Werkzeuge der Kalkulation und Arbeitsvorbereitung verfügen über eine geringe Tiefe baubetrieblich methodischer Grundlagen.

Die hier entwickelten Ansätze zu einer verbesserten Kalkulation und Arbeitsvorbereitung basieren darauf, die Prozesssimulation verstärkt für die Baukalkulation und Arbeitsvorbereitung zu entwickeln und einen baupraktischen Einsatz auch bei komplexen Projekten zu ermöglichen.

Dazu wurden die derzeitigen Schwachstellen in der Kalkulation herausgearbeitet. Darauf aufbauend wurden grundlegenden Prozesslogiken entwickelt und mit typischen baubetrieblichen Abläufen und Fragestellungen abgeglichen. Dieses stellt eine Neuerung dar, da bisher die baubetrieblichen Logiken,



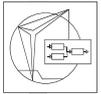


insbesondere im Ingenieurbau, lediglich unter der Annahme von zwingenden Abhängigkeiten betrachtet wurden. Vielfach, insbesondere im Hochbau, besteht eine unendliche Vielfalt möglicher Ausführungs- und Ablaufvarianten. Diese können nur mit zweckmäßigen oder gar bewusst eingerichteten ordnenden Logiken beherrscht werden. Die dazu erforderliche Systematisierung unterschiedlicher Bauabläufe wurde deshalb hier vorbereitet.

Baukalkulation benötigt stets die Rückkoppelung mit den Ist-Daten aktueller Projekte. Diese Ist-Daten sind nicht durch unisensorische Informationsgeber ausreichend vollständig und sicher erfassbar. Daher wurden im weiteren Verlauf des Forschungsprojekts die Grundlagen für eine multisensorische bzw. multimediale Erfassung von Bau-Ist-Zuständen erarbeitet. Erste Feldstudien wurden durchgeführt, um damit nachzuweisen, dass Ist-Zustände auf Basis unvollständiger, aber multisensorischer Messgrößen ausreichend sicher erschlossen werden können. Die Vielfalt der dabei zu berücksichtigenden praxisrelevanten Parameter konnte dabei im ersten Schritt noch nicht vollständig erschlossen werden.

8 Liste der Publikationen aus diesem Projekt

- [1] GIEBEL, K.: Entwicklung eines Produktionsplanungsmodells zur Simulation der Herstellung von Trockenbauwänden, Bauhaus-Universität Weimar, 2006
- [2] HAIDE, J.: Methode zur Quantifizierung der Einflüsse auf Vorgangsdauern lohnintensiver Arbeiten am Beispiel von Pflasterarbeiten, Dissertation Universität Rostock, 2008.
- [3] KÖNIG, M., BEISSERT, U. und BARGSTÄDT, H.-J.: Visual simulation – an appropriate approach to support execution planning in building engineering. Proceedings of the 7th CONVR, International Conference on Construction application of virtual reality, Lisboa, 2007.
- [4] BEISSERT, U., KÖNIG, M. und BARGSTÄDT, H.-J.: Constraint based simulation of outfitting processes in building engineering. Proceedings of the 24th W 78 conference, Maribor, pp 491–497.
- [5] BLICKLING, A.: Spezifikation des Bau-Solls durch interaktive Modellierung auf virtuellen Baustellen. Dissertation an der Professur Baubetrieb und Bauverfahren, Bauhaus-Universität Weimar, 2006
- [6] BARGSTÄDT, H.-J., KATH, T. und BLICKLING, A.: Darstellung von Bauaufwandswerten durch Simulation der Bauprozesse. Herausgeber K. WENZEL. ASIM-Conference, Kassel, 2006. pp 591–600.
- [7] AILLAND, K. und BARGSTÄDT, H.-J.: Taggenaues Termincontrolling auf Baustellen mit Hilfe der Simulation. In: Advances in Simulation for production and logistics application. Herausgeber M. RABE. ASIM-Conference, Berlin 2008, pp 169–178.
- [8] BARGSTÄDT, H.-J.: Montagestrategien und die Logik der Bauprozesse. In: Tag des Baubetriebs 2008; Auf dem Weg zum digitalen (Bau-)Haus-Bau. Herausgeber: BARGSTÄDT, H.-J.; Bauhaus-Universität Weimar, 2008, S. 81–94.
- [9] RAUCH, CHR.: Simulation – Termincontrolling beim Bau einer Brückenkappe, Masterarbeit an der Professur für Baubetrieb und Bauverfahren, Bauhaus-Universität Weimar, 2008
- [10] LATOSIK, S.: Modellierung von Bauprozessen – Erfassung, Bewertung und Vergleich von Methoden. Bachelorarbeit an der Professur für Baubetrieb und Bauverfahren, Bauhaus-Universität Weimar, 2008.
- [11] AILLAND, K. und BARGSTÄDT, H.-J.: Construction Process Simulation Based on Significant day-to-day Data. 17th congress of IABSE Conference Chicago, 2008, pp 618–619.
- [12] VOIGTMANN, J. und BARGSTÄDT, H.-J.: Simulation von Baulogistikprozessen im Ausbau. In: Advances in Simulation for production and logistics application. Herausgeber M. RABE. ASIM-Conference., Berlin 2008, pp 131–140.
- [13] KÖNIG, M. und BEISSERT, U.: Constraint-basierte Simulation von Bauprozessen. In: Tag des Baubetriebs 2008; Auf dem Weg zum digitalen (Bau-)Haus-Bau. Herausgeber: BARGSTÄDT, H.-J.; Bauhaus-Universität Weimar, 2008, S. 17–36.



Ermittlung von Maschineneinsatzzeiten für ereignisorientierte Simulationsmodelle im Baubetriebswesen

Moderne Bauprozesse sind durch umfassenden Maschineneinsatz geprägt. In aktuellen baubetrieblichen ereignisdiskreten Simulationsmodellen wird dieser jedoch in der Regel nicht adäquat abgebildet, weil die Modelle zu wenig detailliert sind und zu starke Vereinfachungen getroffen werden oder geeignete Daten fehlen. Damit bleiben einige Erwartungen an diese Modelle unerfüllt.

In der Vergangenheit wurden bereits baubetriebliche Forschungsarbeiten zur Nutzung mathematisch-statistischer Methoden für die Simulation mechanisierter produzierender Einheiten betrieben. So gab es in den 70er Jahren zahlreiche mit Enthusiasmus betriebene Ansätze, den stochastischen Charakter der Einflussfaktoren und die Wechselwirkung der am Gesamtprozess beteiligten Maschinen mit Hilfe der Warteschlangen- bzw. Bedienungstheorie und stochastischen Simulation zu berücksichtigen (z. B. U. BLECKEN [5], F. DANNER [7], F. GEHBAUER [9], W. JURECKA und H.-J. ZIMMERMANN [12], Z. MARTINOVA und D. MARTIN [15]). Etwas später folgten Prozesssimulationen unter Nutzung von Petri-Netzen (vgl. z. B. V. FRANZ [8], G. HOHMANN [10]). In dieser Zeit wurden auch umfassende Grundlagen für die Berechnung der Baumaschinenleistung gelegt, die bis heute Bestand haben und als Standard Eingang in die baubetriebliche Literatur gefunden haben.

Die baumaschinentechnische Forschung unterbreitete Modelle zur Abschätzung der Effizienzparameter bei unvollständiger Information, wie sie in frühen Entwicklungsphasen oder beim Benchmarking vorliegen (vgl. z.B. V.I. BALOVNEV [1] sowie [17]), und stellte auch die Grundlagen der physikalischen Modellierung für die vergleichende Betrachtung von Baumaschinentypenreihen bereit (vgl. G. KÜHN [13], der außerordentlich unterhaltsam und anschaulich wissenschaftliche Sachverhalte aus dem Gebiet der Baumaschinen darzustellen vermag, und den Nestor der Theorie der physikalischen Modellierung von Baumaschinen V.I. BALOVNEV [2]).

Die Forschungsergebnisse der Vergangenheit dürfen nicht in Vergessenheit geraten und sollten angesichts der aktuellen Möglichkeiten der Informatik wieder aufgegriffen, vertieft und weiter bearbeitet werden, um eine hinreichend genaue Abbildung des Maschineneinsatzes in Simulationsmodellen für die Untersuchung von Bauprozessen zu ermöglichen. Methodisches und mathematisches Instrumentarium sowie entsprechende Software sind also vorhanden. Defizite sieht der Verfasser noch in der Modellbildung. In der Regel ist das auch die schwierigste Etappe von Simulationsexperimenten. Mit diesem Beitrag sollen Ansätze für die Verbesserung der Situation zur Diskussion gestellt werden. Folgende Aufgaben sind zu lösen:

- Klärung der Zielstellung, welche die Simulation unter besonderer Beachtung des Einsatzes mechanisierter produzierender Einheiten liefern soll,
- Präzisierung des Bedarfs an Aussagen über den Maschineneinsatz für die Modellbildung (Ein- und Ausgangsgrößen, Zustandsgrößen) und den Detaillierungsgrad der Modellierung für die Untersuchung von Bauprozessen in Simulationsmodellen,
- Diskussion vorhandener Ansätze für die theoretische Abbildung des Maschineneinsatzes (Einsatzorganisation, Leistungs-, Prozess- und Einsatzdauerermittlung) und deren Weiterentwicklung,
- Erarbeitung eines im Sinne der Aufgabenstellung geeigneten Modellierungsansatzes,
- Implementierung eines Simulationsmodells, Evaluierung mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen am Beispiel typischer Baumaschinen (Einzelmaschinen).



Mit möglichst einfachen Ansätzen sollen ausreichend genaue Bausteine für die Abbildung von Mensch-Maschine-Systemen in Simulationsmodellen bereitgestellt werden, die vorhandene Daten aus eigenen Erhebungen (z. B. durch Arbeitsstudien) oder allgemein bekannten Datenbanken sowie allgemein verfügbaren Herstellerangaben verifizieren, nutzen und verbessern können sowie Vergleichsmöglichkeiten zu konkurrierenden Varianten eröffnen.

Modelle, die auf Ansätzen der Maschinendynamik beruhen (vgl. z. B. [18]), finden heute breite Anwendung in der Baumaschinenforschung und -industrie. Für die gegebenen Anwendungen sind sie aber zu aufwändig und ohne Kenntnis spezieller Maschinendaten nicht direkt anwendbar. Doch ihre Kopplung mit baubetrieblichen Simulationsmodellen ist – unter Voraussetzung einer Zusammenarbeit mit den Maschinenfachleuten – denkbar.

An der Technischen Universität Dresden, Institut für Fördertechnik, Baumaschinen und Logistik, wurde zum Beispiel am Anfang des Jahres 2003 ein interaktiver Forschungs- und Entwicklungssimulator in Betrieb genommen. „Den Kern dieser Modellstruktur bildet das Maschinenmodell im Sinne eines komplexen technischen Systems. Es besteht selbst aus den Anteilen:

- mechanisches Strukturmodell (Starrkörper, Feder, Dämpfer, Massen),
- antriebstechnisches Modell (Antriebsquelle, Leistungsübertragung, Verluste),
- Kontakt- und Lenkmodell (Kontakt-, Traktions- und Lenkmechanik),
- Steuer- und Regelungsmodell.

Bei mobilen Arbeitsmaschinen gibt es auch immer eine Kopplung zum

- Prozessmodell (z. B. Grabkräfte, Arbeitsgeschwindigkeiten) und
- Umgebungsmodell (z. B. Geländeprofile, Witterungsbedingungen).

Dabei sind die Simulationsmodelle (z. B. Umgebung) nicht statisch, da sie unter dem Einfluss des Arbeitsprozesses (z. B. Graben) sich selbst verändern und damit in der Simulation ständig aktualisiert werden müssen.“ [14].

Auf dieser Basis und unter Nutzung der Ähnlichkeitsmechanik und physikalischen Modellierung können Bausteine für die Simulation von Mensch-Maschine-Systemen in baubetrieblichen Makromodellen erarbeitet werden. Ein Ansatz für die Einbeziehung mechanisierter produzierender Einheiten in die baubetriebliche Simulation, der einen minimalen Aufwand verspricht, ist in Bild 1 aufgezeigt.

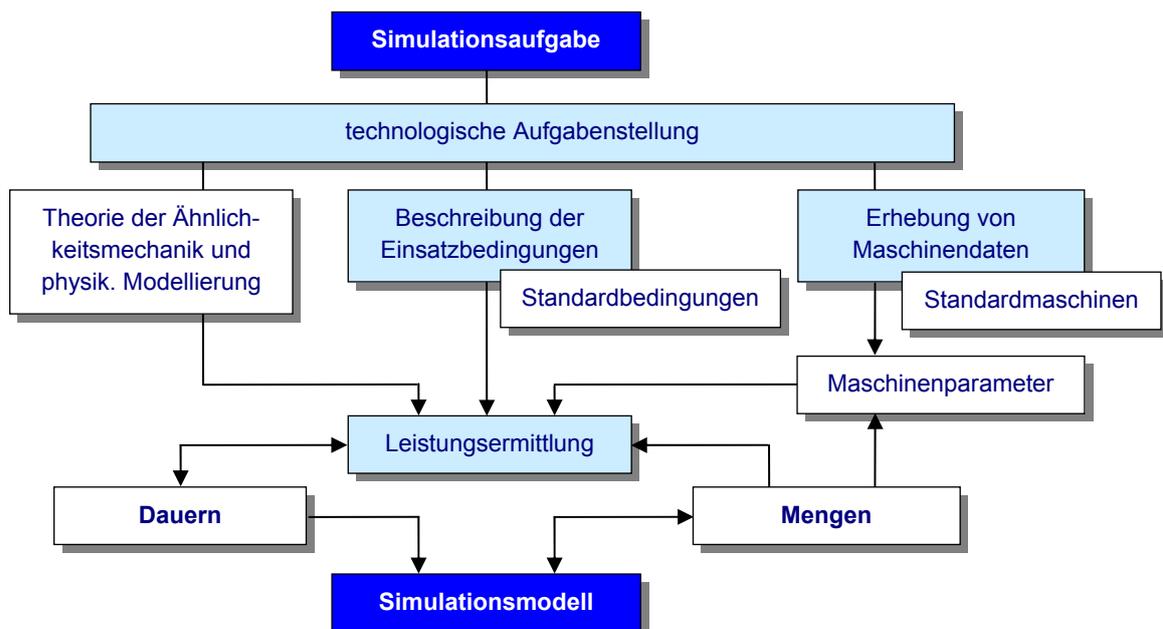
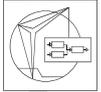


Bild 1 Einbeziehung mechanisierter produzierender Einheiten in die baubetriebliche Simulation anhand von Standardmodellen



Die Leistung einer Baumaschine beinhaltet die Menge des Arbeitsgegenstandes, die diese bestimmungsgemäß unter definierten Bedingungen in einer bestimmten Zeitdauer verändert werden kann. Qualität, Mengen und Dauern sind ihre Bestimmungsgrößen und zugleich die maßgebenden Eingangsgrößen für die Simulation. Sie hängen von den Maschinenparametern und den durch die technologische Aufgabenstellung determinierten Einsatzbedingungen mit all ihren Facetten (Struktur und Umfang der Arbeiten, technologisches Schema) ab. Die Leistung selbst erscheint als eine Ergebnisgröße der Simulation. Sind die Angaben für Standardmaschinen unter Standardbedingungen bekannt, so können sie mit Hilfe der Theorie der Ähnlichkeitsmechanik und physikalischen Modellierung variiert werden.

Es sind verschiedene Leistungskategorien zu unterscheiden, die hier nicht näher erörtert werden sollen. Der Charakter der Maschinenleistung als Basisgröße für die Simulation wird aus der nachfolgenden Abbildung deutlich.

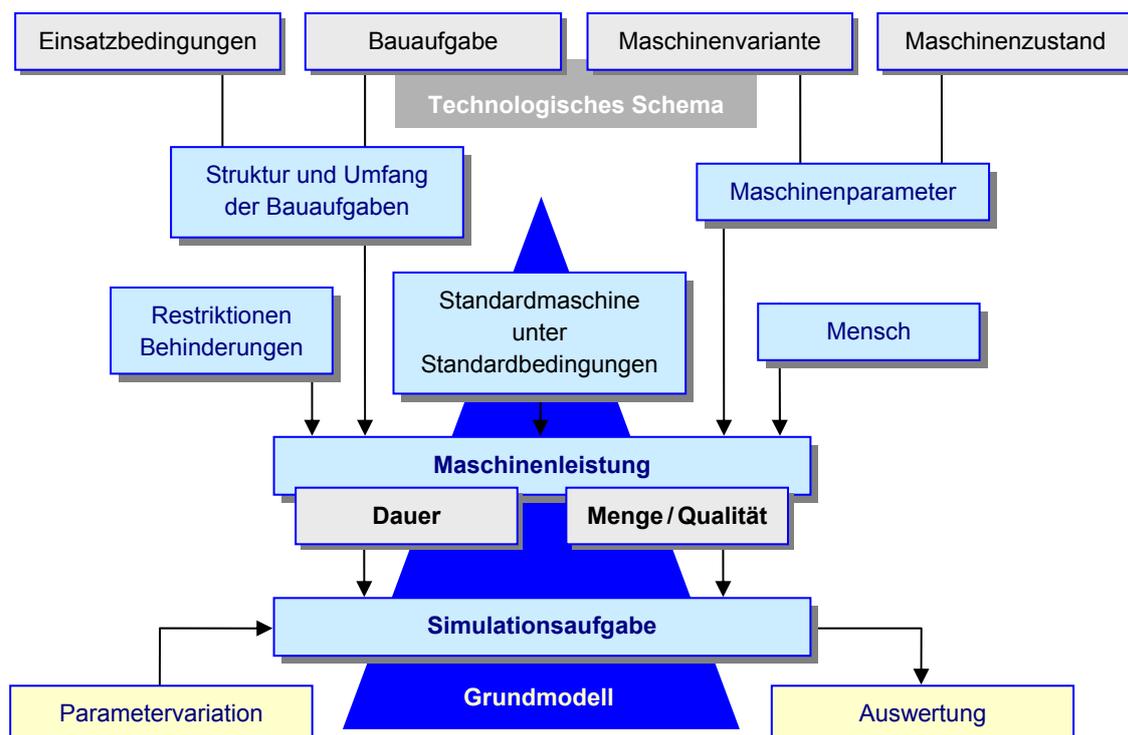


Bild 2 Maschinenleistung als Basisgröße für die Simulation in einem Grundmodell

In typischen baubetrieblichen Simulationsmodellen ist es ausreichend, die prozessbestimmenden Maschinen darzustellen. Das sind in der Regel zyklisch arbeitende Hebezeuge und Baumaschinen, mobile Arbeitsmaschinen und Transportfahrzeuge. Für diese sind Standardtechnologien verfügbar, die in der Regel umfassend qualitativ und quantitativ beschrieben sind – hier arbeiten Standardmaschinen nach einem Standardschema.

In der baubetrieblichen Praxis sind für Zwecke der Leistungsberechnung Standardbedingungen bereits üblich. Dem Meinungsstreit unterliegt immer noch die Berücksichtigung der sie variierenden Einflussfaktoren (vgl. z. B. F. HÜSTER [11]). Hier sollte die Theorie der Ähnlichkeitsmechanik und physikalischen Modellierung Beachtung finden, sie könnte einen Lösungsansatz bieten:

Auf der Grundlage von Parameteruntersuchungen der Maschinenvarianten und der Spezifizierung der Einsatzbedingungen werden Abweichungen gegenüber den Standardlösungen festgestellt. Deren Auswirkungen auf die Geschwindigkeiten, Dauern, spezifischen Durchsatzmengen (z. B. Menge je Zyklus) – und daraus folgend auf die Leistung – werden mit Hilfe der Ähnlichkeitsmechanik untersucht und in den Ansätzen des Simulationsmodells umgesetzt.



Für die ereignisorientierte Simulation ist die Maschineneinsatzzeit mit ihren Komponenten die interessierende Größe. Es sind die Dauern der einzelnen Teilvorgänge zu ermitteln. Abhängig vom Simulationsmodell können sie Eingangsgrößen sein oder sich aus systeminternen Prozessgrößen (Zustandsgrößen) ergeben. Der Grad der Dekomposition hängt einerseits von der konkreten Aufgabenstellung und der angestrebten Genauigkeit ab. Andererseits müssen entsprechende Modelle gebildet werden und die dazugehörigen Eingangsdaten beschaffbar sein. Die Mengen (je Bearbeitungsvorgang oder als spezifischer Durchsatz) werden durch die technischen Möglichkeiten der Maschine und die Beschaffenheit der Arbeitsgegenstände bestimmt. Sie sind hier als gegeben anzunehmen und anhand stoffspezifischer Bestimmungsgrößen zu ermitteln.

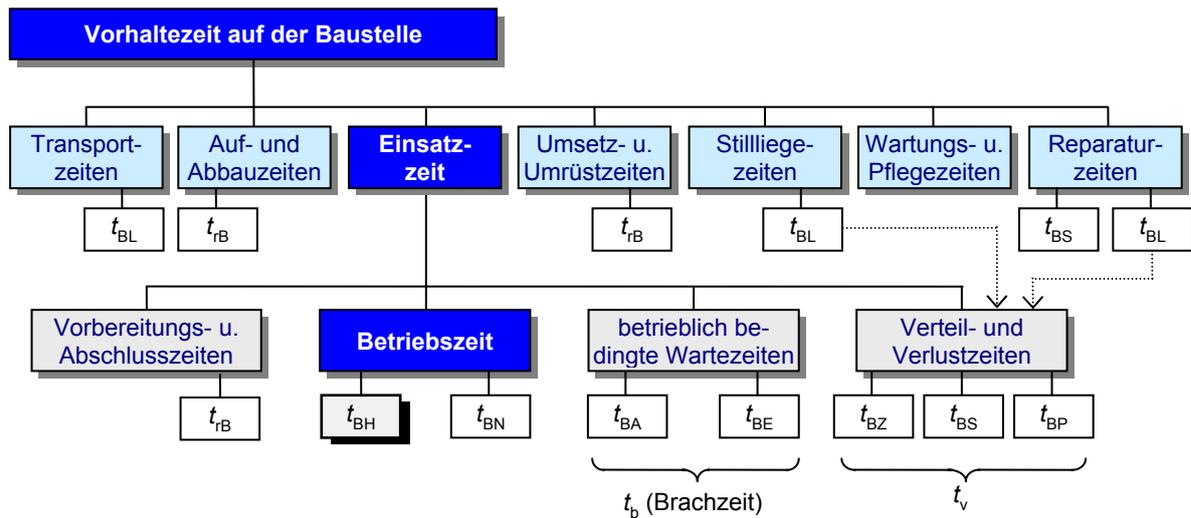
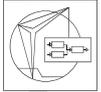


Bild 3 Zeitbegriffe nach BGL [3] und Zeitarten nach REFA (vgl. [16])

Die Granularität des Simulationsmodells bestimmt, auf welcher Ebene die Zeiten abzubilden sind – vgl. Bild 3. Die Betrachtung der Vorhaltezeit kommt nur für grobe Modelle der allgemeinen Baustellenorganisation in Frage. Für die Ablaufplanung von Baustellen ist die zweite Ebene von Interesse. Hier sind über gesonderte Modelle logistische Fragestellungen, wie der Antransport, der Auf- und Abbau sowie Zeiten für Umsetzen zur und von der Baustelle und große Umrüstarbeiten, zu analysieren. Das sind Rüstzeiten der Arbeitssysteme. Stillliegezeiten, die auf Grund höherer Gewalt auftreten, sowie Zeiten für Wartung, Pflege und größere Reparaturen, die außerhalb der Abwicklung von Bauaufträgen liegen und auf der Grundlage langfristiger Planungen ablaufen, sind hier nicht relevant.

In Simulationsmodellen, die die Bauprozesse detailliert abbilden sollen, ist vor allem die Untersuchung der Einsatzzeit von Interesse. Vorbereitungs- und Abschlusszeiten, die auch Zeiten für operatives Umrüsten enthalten können, tragen wiederum den Charakter von Rüstzeiten, fallen also einmalig pro Los, aber durchaus häufiger an. Die Verteil- und Verlustzeiten sind stochastische Größen und beinhalten Zeiten für zusätzliche Nutzung t_{BZ} , störungsbedingte Ausfallzeiten t_{BS} sowie Zeiten für persönlich bedingte Unterbrechungen t_{BP} . Obgleich diese Zeiten in der Baupraxis als konstante, oft summarisch vereinbarte Zuschläge zu den Grundzeiten Berücksichtigung finden, können sie im Einzelfall stark schwanken. Sie sollten also als stochastische Größen in die Simulation einbezogen werden. Problematisch ist allerdings die Ermittlung der Verteilungsfunktionen und ihrer Parameter, weil viele Firmen den Aufwand der Datenerhebung scheuen und demzufolge die Modelle nicht abgebildet werden können.

Die sogenannten betrieblich bedingten Wartezeiten sind vorbestimmte Größen. Zeiten für ablaufbedingtes Unterbrechen t_{BA} , oft auch als „technologische Pause“ bezeichnet, sind Prozesszeiten und dementsprechend zu behandeln. Erholungszeiten t_{BE} sind normative Größen und werden bei Zeitberechnungen als Zuschläge zur Grundzeit berücksichtigt. In der Simulation können sie bei entsprechend feiner Granularität als Prozesszeiten abgebildet werden, da diese Zeiten aus arbeitsmedizinischen Gründen durch die Beschäftigten in einem bestimmten Regime in Anspruch zu nehmen sind.



Am interessantesten für die Abbildung mechanisierter produzierender Einheiten in Simulationsmodellen ist die Darstellung der Betriebszeit. Das sind die Zeiten, in der die Maschine eine Haupt- oder Nebennutzung (nach REFA) erfährt. Bei der Hauptnutzung führt die Maschine unmittelbar wertschöpfende Arbeiten entsprechend aktuellem Arbeitsauftrag aus. Bei der Nebennutzung führt sie Arbeiten aus, die die Hauptnutzung ermöglichen bzw. unterstützen, wie z. B. das Weiterrücken eines Baggers an der Gewinnungsstelle. Die Zeiten für Hauptnutzung t_{BH} und Nebennutzung t_{BN} bilden gemeinsam mit den Zeiten für ablaufbedingte und erholungsbedingte Unterbrechungen der Nutzung die Betriebsmittel-Grundzeit t_{GB} . Das Verhältnis zwischen Hauptnutzungsdauer und Einsatzzeit charakterisiert als Hauptnutzungsgrad den Anteil direkt wertschöpfender Prozesse und ermöglicht damit die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit verschiedener Mechanisierungsvarianten bzw. technologischer Lösungen.

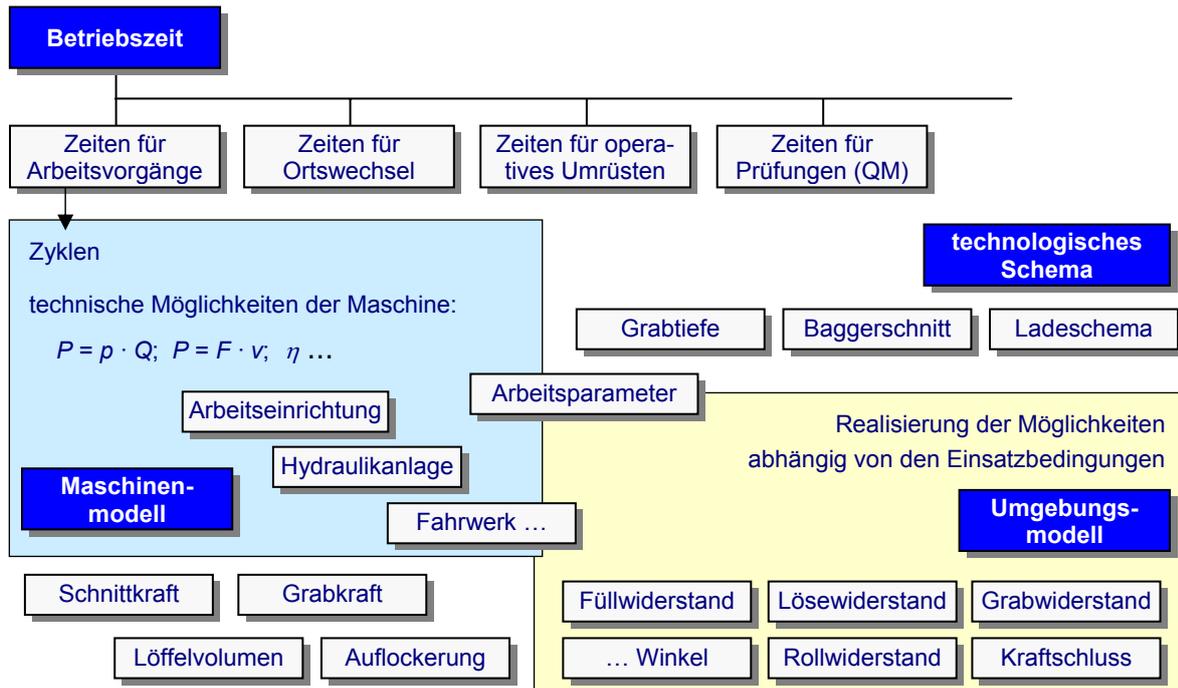


Bild 4 Skizze für ein Modell zur Ermittlung der Betriebszeitkomponenten (Beispiel mobile Arbeitsmaschine)
 P – mechanische Leistung, p – Hydraulikdruck, Q – Volumenstrom, F – Kraftkomponente, v – Geschwindigkeit, η – Wirkungsgrad

Die Einflüsse auf die Betriebszeit kann man unter Berücksichtigung der maschinentechnischen Besonderheiten (z. B. Arbeitsparameter, Überlappung von Arbeitsvorgängen, Kraft- und Leistungsreserven), der Besonderheiten des Arbeitsgegenstands (z. B. zulässige Verarbeitungsdauer, Grabwiderstand, Auflockerung), des technologischen Schemas (z. B. Baggerschnittgestaltung, Baggerungsarten, Abbauethoden) und der Umgebungsbedingungen (z. B. Beschaffenheit des Arbeitsbereichs und des Arbeitsumfelds) sehr umfassend modellieren.

Da der Aufwand dafür sehr groß ist, setzt an dieser Stelle die Arbeit mit Standardmodellen ein, die durch Methoden der Ähnlichkeitsmechanik modifiziert werden sollen. Die Methodik dafür lässt sich an dieser Stelle nicht angemessen darstellen (vgl. [1], [2]) und bedarf noch weiterer Ausarbeitungen. Ansätze gestalten sich beispielsweise für Erdbewegungsmaschinen innerhalb bestimmter Typengrößenbereiche analog zu nachfolgenden Beispielen für den Fall, dass der Arbeitsgegenstand (Baugrund) nicht modelliert, also invariant angenommen wird (vgl. z. B. [17]):

$$\frac{F_1}{F_2} = \left(\frac{l_1}{l_2} \right)^3 \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{l_1}{l_2} \right)^{7/2} \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{m_1}{m_2} \right)^{7/6} \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{F_1}{F_2} \right)^{7/6} \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^7$$



Für Vergleichszwecke – und das ist das Wesentliche dieses Ansatzes – lässt sich die Zyklusdauer relativ einfach parametrisieren, also durch Maschinenparameter, Parameter des Arbeitsmediums und des technologischen Schemas darstellen¹. Dennoch erfordert es bis zur lauffähigen Implementierung in Simulationsmodelle noch weitere Forschungsarbeit.

Durch den Verfasser² konnte zum Beispiel für nichtvollschwenkbare Hecktieflöffelbagger von Mehrzweckbaumaschinen (Baggerlader) unter Standardbedingungen anhand maschinendynamischer Grundlagen und statistischer Untersuchungen konstruktiv ähnlicher Maschinen ein praktikabler Ansatz für die Zyklusdauer des Grabvorgangs abgeleitet werden (vgl. [18]):

$$t_z = \left\{ 357 \frac{V_n (1 - 2,6b)}{P} + \frac{1}{257P} \left[10^3 (1,36 LH + 1,52 T - 0,20 W_{\max}) m + 309,5 \sqrt[3]{(p \cdot W_{\max})^2 m + 4,7 m} \right] \right\} k_v$$

mit

- t_z – Zyklusdauer in s,
- V_n – Grabgefäßnenninhalt in m³,
- P – installierte Motornennleistung in kW,
- m – Gesamtbetriebsmasse in t,
- b – Grabgefäßbreite (Schnittbreite) in m,
- LH – maximale Ladehöhe des Baggers in m,
- T – tatsächliche Aushubtiefe in m,
- W_{\max} – maximale Aushubweite in m,
- k_v – Korrekturbeiwert zur Berücksichtigung der Ungleichförmigkeit der Bewegungsabläufe, von Schaltvorgängen und der Zeit zum genauen Ansetzen des Grabwerkzeugs.

Über geometrische Untersuchungen des Baggerschnitts ist die Häufigkeit des Weiterrückens des Baggers bestimmbar, so dass auch diese Vorgänge bei der Simulation abgebildet werden können.

Etwas einfacher gestaltet sich die Abbildung von zyklisch arbeitenden Erdbewegungsmaschinen, wie Planiertrauen oder Motorschürfkübelwagen. Nach Ansätzen von V.I. BALOVNEV konnte der Verfasser zum Beispiel den Arbeitszyklus einer Planiertraue

$$t_z = t_1 + t_2 + t_3 + 2t_v$$

- t_1 – Schürfdauer in s,
- t_2 – Schiebedauer in s,
- t_3 – Rückfahrdauer in s,
- t_v – Zeit für zusätzliche Operationen (Schalt- und Beschleunigungsvorgänge) in s,

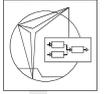
wie folgt parametrisieren:

$$t_z = \frac{V_{Pr} \cdot k_v}{P \cdot \eta} \left[\frac{k_{Pr} \cdot k_{Gr}}{f_A \cdot (1 - \delta_{Gr}) \cdot \left(1 - \frac{f \pm i}{\mu_K} \right)} + \frac{k_G \cdot (f \pm i) \cdot G \cdot l_{Tr}}{(1 - \delta_{Tr}) \cdot V_{Pr}} \right]$$

- V_{Pr} – Volumen des Bodenprismas im m³,
- k_v – Koeffizient für zusätzliche Operationen (Schalt- und Beschleunigungsvorgänge),
- P – Motorleistung in kW,
- η – Wirkungsgrad des Antriebsstrangs,
- k_{Pr} – Koeffizient für die Bodenverluste in die Seitenwände,
- k_{Gr} – Grabwiderstandsbeiwert in kN/m²,

¹ vgl. http://www.baumaschine.de/Portal/Archive/1_2007/Wissenschaft/bautechnik/bautechnik.html

² Der Abruf einer Auswahl von Aufsätzen des Verfassers ist unter <http://www.uni-weimar.de/cms/bauin/organisation/baubetrieb-und-bauverfahren/pers/personen/prof-steinmetzger.html> möglich.



- f_A – Auflockerungsfaktor,
- δ_{Gr} – Schlupf während des Grabvorgangs,
- f – Fahrwiderstandskoeffizient (aus Rollwiderstand und Fahrwerksreibung),
- i – Steigungsverhältnis (entspricht bei kleinen Winkeln dem Steigwiderstandsbeiwert),
- μ_K – Kraftschlussbeiwert,
- k_G – Koeffizient der Gesamtgewichtserhöhung durch das Bodenprisma,
- G – Maschinengewicht in kN,
- l_{Tr} – Transportweg in m (Transportweg = Gesamtweg – Schürfweg),
- δ_{Tr} – Schlupf während des Transportvorgangs (Schieben und Nachschneiden).

Bei grober Näherung der teilweise in ihren Werten gegensätzlichen Koeffizienten mit $k_{Pr} \cong 1$, $f_A \cong 1$, $\eta \cong 1$, $1 - \delta_{Gr} \cong 1$, $1 - \delta_{Tr} \cong 1$, $k_G \cong 2$, $k_v \cong 1$ ergibt sich für tendenzielle Untersuchungen oder Sensitivitätsanalysen

$$t_z = \frac{V_{Pr}}{P} \left[\frac{k_{Gr}}{1 - \frac{f \pm i}{\mu_K}} + \frac{(f \pm i) \cdot G \cdot l_{Tr}}{V_{Pr}} \right]$$

Die Berechnungsmodelle lassen sich mit Hilfe von Zeitaufnahmen kalibrieren und durch Ansätze der Ähnlichkeitsmechanik auf andere Maschinengrößen transformieren.

Obwohl die oben gezeigten Ansätze weiter verfolgt werden sollten, sind REFA-Zeitstudien und die Bildung von Planzeitkatalogen die aktuell praktikabelste Lösung. Doch der Aufwand ist ebenso groß. Er kann durch Nutzung von Standardmodellen reduziert werden. Im Zusammenhang damit ist zu betonen, dass Simulationsmodelle auf flexiblen Prozessgliederungen anstelle der vom REFA-Fachausschuss Bau unterbreiteten starren Prozessgliederung (vgl. z. B. G. BERG [4, S. 57–60], R. CHAHROUR in [6, Kapitel 5.6.3]) basieren sollten. Diese Forderung hat der Verfasser vom Grundsatz her bereits 1988 erhoben (vgl. [19, Anlagen S. 9-3]).

Fazit

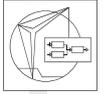
In baubetrieblichen ereignisorientierten Simulationsmodellen sollen mechanisierte produzierende Einheiten besser abgebildet werden. Lösungsansätze für die Modellbildung sind vorhanden. Grundmodelle mit Standardmaschinen in Standardsituationen sollen dazu beitragen, den Aufwand bei der Erarbeitung der Simulationsmodelle zu verringern. Das gelingt über zunächst sehr allgemein gehaltene generische Bausteine, die über spezielle Schnittstellen später verfeinert werden können. Es wird eine Basislösung erarbeitet, getestet und kalibriert, die später mit Hilfe von Ähnlichkeitsbetrachtungen und Ansätzen der physikalischen Modellierung modifiziert werden kann. Die praktische Anwendung der Idee erfordert noch intensive Forschungsarbeit zur Aufbereitung der Grundlagen sowie Bildung und Validierung der Modelle.

Literatur:

- [1] BALOVNEV, V.I.; ZELENIN, A.N.; KEROV, I.P.: Machines for Moving the Earth – Fundamentals of the Theory of Soil Loosening, Modeling of Working Processes and Forecasting Machine Parameters (ISBN 9061914515). – Rotterdam: Balkema, 1982 und Lisse (NL): Swets & Zeitlinger Publishers, 1986
- [2] БАЛОВНЕВ, ВЛАДИЛЕН ИВАНОВИЧ: Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин (BALOWNJEW, W.I.: Modellierung der Interaktionsprozesse der Arbeitsorgane von Straßenbaumaschinen mit dem Medium). – Москва: Высшая школа, 1981
- [3] Baugeräteliste 2001: BGL; technisch-wirtschaftliche Baumaschinendaten. – Wiesbaden, Berlin: Bauverlag, 2001



- [4] BERG, G.: REFA in der Baupraxis – Teil 1: Grundlagen. – Frankfurt/M.: ZTV-Verlag, 1984
- [5] BLECKEN, UDO: Ablaufprozesse im Licht der Warteschlangentheorie. – In: Bauwirtschaft, Wiesbaden 26 (1972) 18, S. 686–700
- [6] CHAHROUR, RACHA: Integration von CAD und Simulation auf Basis von Produktmodellen im Erdbau. – Kassel: Universität 2006
- [7] DANNER, FRIEDRICH: Warteschlangentheorie und Simulationstechnik – Hilfsmittel zur Leistungsbestimmung maschineller Produktionsketten im Baubetrieb (Fortschrittberichte der VDI-Zeitschriften: Reihe 4; 22). – Düsseldorf: VDI-Verlag, 1975
- [8] FRANZ, VOLKHARD: Planung und Steuerung komplexer Bauprozesse durch Simulation mit modifizierten höheren Petri-Netzen; Dissertation. – Kassel: Gesamthochschule-Universität 1989
- [9] GEHBAUER, FRITZ: Neue Methoden zur Leistungsberechnung von komplexen Transportprozessen im Erdbau. – In: Baumaschine und Bautechnik, Wiesbaden 21 (1974) 6. – S. 201–211
- [10] HOHMANN, GEORG: Von der Netzplantechnik zur Simulation – Analyse von Bauprozessen mit Hilfe von Petri-Netzen. – In: IKM 1997 – Internationales Kolloquium über Anwendungen der Informatik und der Mathematik in Architektur und Bauwesen. <http://e-pub.uni-weimar.de/volltexte/2005/475/pdf/040IKM97.PDF>
- [11] HÜSTER, FELIX: Leistungsberechnung der Baumaschinen. – Aachen: Shaker-Verlag GmbH, 2003
- [12] JURECKA, WALTER; ZIMMERMANN, HANS-JÜRGEN: Operations Research im Bauwesen – Optimierung und Entscheidung von Ingenieurproblemen. – Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1972
- [13] KÜHN, GÜNTER: Modell-Simulation für die Optimierung der Erdbaumaschinen. – In: Baumaschine und Bautechnik, Wiesbaden 40 (1993) 6. – S. 327–331, 41 (1994) 1. – S. 33–34
- [14] KUNZE, GÜNTER: Virtuelle Realität – Simulationsmethoden in Forschung und Entwicklung – Möglichkeiten sowie Grenzen der Modellbildung und Simulation technischer Systeme für praktische Anwendungen im Maschinenbau. – In: Fachtagung Baumaschinentechnik 20.-21.3.2003 in Dresden, TU Dresden/VDMA, Tagungsband, S. 63–78
- [15] MARTINOVA, ZDENA; MARTIN, DIETER: Operationsforschung zur Baumaschineneinsatzplanung. – In: Bauplanung, Bautechnik, Berlin 23 (1969) 3, S. 115–117
- [16] REFA-Methodenlehre der Betriebsorganisation: Datenermittlung. – München: C. Hanser Verlag, 1997
- [17] STEINMETZGER, ROLF: Bestimmung der Hauptparameter einer Mehrzweckbaumaschine in einem frühen Projektstadium. – In: Wiss. Zeitschr. d. Hochsch. f. Archit. u. Bauwesen Weimar. – Weimar 30 (1984) 5, S. 316–321
- [18] STEINMETZGER, ROLF: Bestimmung der technischen Leistung eines nichtvollschwenkbaren Hydraulik-Anbaubaggers im Projektstadium. – In: Wiss. Zeitschr. d. Hochsch. f. Archit. u. Bauwesen Weimar. – Weimar 27 (1980) 3, S. 127–131
- [19] STEINMETZGER, ROLF: Grundlagen der Erarbeitung und Bewertung bautechnischer Lösungen unter besonderer Beachtung arbeitswissenschaftlicher Aspekte – am Beispiel des Auslandsbaus. – Weimar: Hochsch. f. Archit. u. Bauw., Fak. Architektur – Bauingenieurwiss., 1989. – 221 S., Anl. (Dissertation B)



Baubetriebliche Anforderungen an die diskret ereignisorientierte Modellierung und Simulation von Prozessen zur Planung und Fertigung von Unikaten

Motivation

Das Bauen ist ein Spiegelbild seiner Zeit. Bauherren verlangen immer individuellere Bauwerke und stellen nie dagewesene Ansprüche an die Planung und Ausführung. Technologische Grenzen müssen durch innovative Lösungen in immer kürzerer Zeit überwunden werden. Der wirtschaftliche Zwang der Investoren fordert stets eine schnelle Realisierung des Bauvorhabens. Die Komplexität des Bauens erhöht sich deutlich.

Sinnbild für die neuen Herausforderungen im Bauwesen sind die Bauvorhaben in Dubai, deren Dimensionen alles Bisherige überbieten. Bild 1 zeigt die Silhouette von Dubai mit dem aktuell höchsten Bauwerk der Welt, dem 828 Meter hohen Burj Khalifa (früher: Burj Dubai).



Bild 1 Burj Khalifa in Dubai

Herkömmliche Planungs- und Fertigungsmethoden stoßen zunehmend an ihre Grenze. Nicht nur bei Fertigungsmethoden, wie dem Fördern von Beton in über 600 Meter Höhe, sind innovative Konzepte notwendig, sondern auch bei deren Planung. Das Bauen sieht sich heutzutage mit vielfältigen Randbedingungen konfrontiert. Neue Anforderungen, wie Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit, müssen in der Planung und Ausführung Beachtung finden. Die Grundsätze von Sicherheit und Gesundheitsschutz auf Baustellen sind stets zu berücksichtigen.



Diese Komplexität des Bauens und der hohe Konkurrenzdruck erschweren den ausführenden Unternehmen in ihrer Arbeitsvorbereitung, aus der Vielzahl der theoretisch möglichen Varianten die wirtschaftlichste zu finden. Neben dem subjektiven Wissen der Bauleiter sollten annähernd objektiv optimale Lösungen gefunden werden. Bei Planungen, die nur auf dem Erfahrungsschatz basieren, können technologische Abhängigkeiten der Gewerke schnell übersehen werden. Das menschliche Vorstellungsvermögen ist vor allem bei größeren Projekten schnell überfordert.

Eine **diskret ereignisorientierte Modellierung und Simulation** von Bauvorhaben bietet die Möglichkeit, alle planerischen Aufgaben im Vorfeld zu untersuchen, Schwachstellen zu beseitigen und ein optimales Ergebnis zu realisieren. Der Einsatz solcher Modellierungsmethoden in der Planung soll Rationalisierungspotenzial in der Phase der tatsächlichen Ausführung schaffen. Eine effizient durchgeführte Modellierung und Simulation der Herstellung des Unikats „Bauwerk“ kann für das ausführende Unternehmen einen Wettbewerbsvorteil bedeuten.

Die Anwendung von Methoden, wie der diskret ereignisorientierten Modellierung, gestaltet sich im Baubetriebswesen deutlich schwieriger als in der stationären Industrie. Die Fertigung eines Unikatproduktes in den für das Bauen üblichen Dimensionen und die spezifischen Randbedingungen eines Bauvorhabens bedingen besondere Anforderungen an die Umsetzung von neuen Modellierungstechniken im Baubetriebswesen.

Bevor jedoch auf diese baubetrieblichen Anforderungen zur Modellierung und Simulation von Unikaten eingegangen werden kann, sollen eine Definition für den Begriff des Unikats gefunden werden sowie die Prozesse zur Fertigung von Unikaten differenziert betrachtet werden.

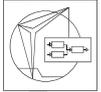
Unikat – Abgrenzung und Definition

Die Herstellungsformen in den einzelnen Wirtschaftszweigen lassen sich anhand verschiedener Kriterien unterscheiden. Solche Kriterien sind zum Beispiel die Standardisierung der Produktion, die Ausbringungsmenge, die Aufgabenkomplexität und der Ressourceneinsatz je Ausbringungseinheit. STEVENSON klassifiziert die Herstellungsformen anhand dieser Kriterien in Projekte (gemeint ist Unikatfertigung), Einzelfertigung, Chargenfertigung, Serienfertigung und kontinuierliche Fertigung [2].

Die Unikatfertigung konzentriert sich auf die Realisierung eines einmaligen, meist sehr umfangreichen, zeitlich begrenzten Vorhabens. Alle Aktivitäten sind auf die Erbringung einer einzelnen Einheit ausgerichtet. Beispiele für Unikatfertigungen stellen alle Bauvorhaben dar. Aber auch die Organisation und Durchführung von Veranstaltungen, wie Messen und Tagungen, stellen Unikate dar.

Im Gegensatz zur Unikatfertigung besteht bei der Einzelfertigung die Möglichkeit, ein Produkt in gleicher oder ähnlicher Weise erneut herzustellen. Im Allgemeinen erweist sich der finanzielle wie auch zeitliche Umfang bei der Einzelfertigung als geringer gegenüber der Unikatfertigung. Der Schiffbau ist ein Beispiel für die Einzelfertigung. Aufgrund der individuellen Kundenwünsche wird in der Regel nur eine Einheit hergestellt. Die Produktionstechnologie würde es jedoch erlauben, ein exakt identisches Schiff erneut zu fertigen.

Die Chargenfertigung eignet sich zur Herstellung gleicher oder sich nur in wenigen Komponenten unterscheidender Produkte, die denselben Verfahrensschritt absolvieren müssen. Die Produkte können sowohl standardisiert (z. B. Herstellung von Bewehrungsstäben) wie auch kundenspezifisch (z. B. Drucken eines Tagungsbandes) sein. Die Serienfertigung weist einen hohen Standardisierungsgrad auf und wird zur Herstellung einer großen Anzahl gleicher Produkte verwendet. Solche Produkte können zum Beispiel Baumaschinen sein. Während bei der Serienfertigung ein getakteter Produktionsablauf vorhanden ist, verliert sich dieser zunehmend bis zur kontinuierlichen Fertigung. Die produzierten Einheiten weisen keinerlei (gewollte) Ausprägungsunterschiede auf. Zum Beispiel sind die Produktionsabschnitte bei der Fertigung von Ziegelsteinen nahezu aufgelöst und bei der Produktion von Flüssigkeiten wie Erdöl gar nicht mehr vorhanden.



In Bild 2 sind die unterschiedlichen Herstellungsformen anhand der vier genannten Kriterien dargestellt. Die Unikat- und Einzelfertigung weisen eine niedrige Standardisierung und Ausbringungsmenge auf, während die Aufgabenkomplexität und der Ressourceneinsatz je Ausbringungseinheit hoch sind.

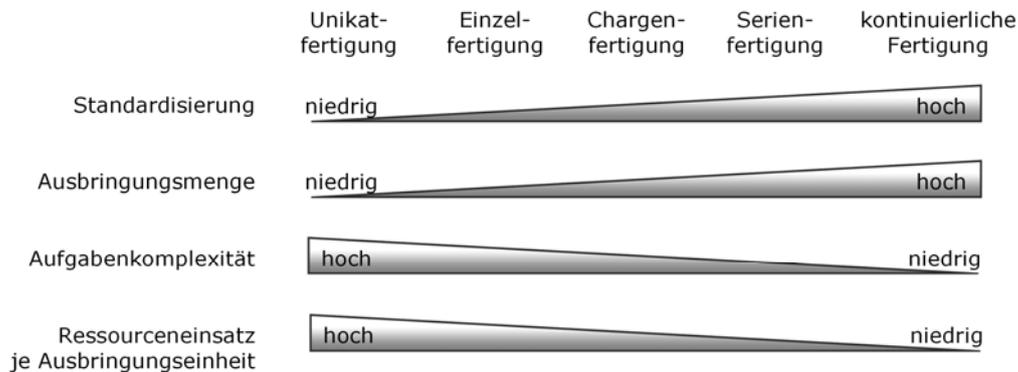


Bild 2 Unterscheidung der Herstellungsformen anhand verschiedener Kriterien

Die baubetriebliche Literatur ist sich weitgehend darüber einig, dass die Produkte der Bauwirtschaft gegenüber den Erzeugnissen der stationären Industrie – zu der auch die Baustoffindustrie gehört – Unikate darstellen. Der Unikatcharakter von Bauleistungen bezieht sich unter anderem auf die von den einzelnen Bauherren gestellten Anforderungen an das Bauwerk, die variierende Organisation der am Bau beteiligten Partner, den Standort des Bauwerks und die eingesetzten Bauverfahren [3]. Während die Merkmale eines Unikats in der Literatur ausführlich diskutiert werden, fehlt eine Definition des Begriffs „Unikat“. Die Autoren schlagen folgende Definition vor:

Ein Unikat ist eine individuelle Anordnung von Ressourcen zur Erfüllung eines spezifischen Zwecks unter Beachtung spezieller Standort- und Rahmenbedingungen, dessen exakte Nachbildung nicht realisierbar ist.

Die **individuelle Anordnung von Ressourcen** beschreibt den unterschiedlichen Einsatz von Maschinen, Material und Menschen bei der Herstellung von Bauwerken. Jedes Unikat wird von einer anderen Konstellation von planenden, ausführenden und überwachenden Partnern erstellt. Diese nehmen maßgebend Einfluss auf den Bauablauf, die Bauverfahren, die verwendeten Materialien und Maschinen. Als Material kommen bei der Fertigung von Unikaten Serienprodukte oder Produkte einer kontinuierlichen Fertigung zum Einsatz. Es wäre ein enormer Kostentreiber, würden zum Beispiel keine standardisierten, sondern speziell für das Bauwerk hergestellte Ziegel oder Bewehrungsstäbe verwendet. Das Unikat besteht somit in den meisten Fällen aus Nicht-Unikaten, deren Anordnung aufgrund der Wünsche des Bauherren und der notwendigen Randbedingungen jedoch einmalig ist.

Die **Erfüllung eines spezifischen Zwecks** bezieht sich auf die Funktion, die das Unikat erfüllen soll. KOCHENDÖRFER/LIEBCHEN/VIERING nennen als Grundfunktionen unter anderen „Wohnen“, „Arbeiten“, „Bildung“ und „Versorgung“ [4]. Die Funktion hat einen wesentlichen Einfluss auf das Aussehen und die Struktur des Bauwerks. So erfordert zum Beispiel ein Hotel eher kleinere Räume, während eine Schule eher größere Räume benötigt.

Die **speziellen Standortbedingungen** sind ein elementares Merkmal, welches Bauleistungen einen Unikatcharakter verleiht. Jedes Bauwerk befindet sich an einem spezifischen Ort. Selbst bei der Fertigung eines exakt gleichen Gebäudes B neben dem Originalgebäude A besteht ein Unterschied in der Fertigungsstruktur, da Gebäude A ein „Hindernis“ für die Baustelle und deren Logistik von Gebäude B darstellt.

Die **speziellen Rahmenbedingungen** umfassen Gesetze, Vorschriften und sonstige Regeln, die beispielsweise vom Standort, von der Funktion, von den eingesetzten Verfahren und von den besonderen



Wünschen der Bauherren abhängig sind. So sind in Wohngebieten andere Emissionsgrenzen für Lärm und Staub während der Ausführungs- und Nutzungsphase erlaubt als in Gewerbegebieten.

Die **Einmaligkeit der Fertigung** unterscheidet die Unikatfertigung von allen anderen Herstellungsformen. In Abhängigkeit der anderen Merkmale – vor allem aber der Standortbedingungen – ist eine exakte Nachbildung nicht möglich. Der Nachbau wird sich häufig bei der Gründung, aber auch durch andere Verfahren unterscheiden. Das Aussehen kann identisch wirken, durch andere oder neue Technologien wird das Bauwerk dennoch eine andere Ressourcenanordnung aufweisen und somit zum Unikat werden.

In Bild 3 wird eine grafische Umsetzung der Definition von Unikaten aufgezeigt.

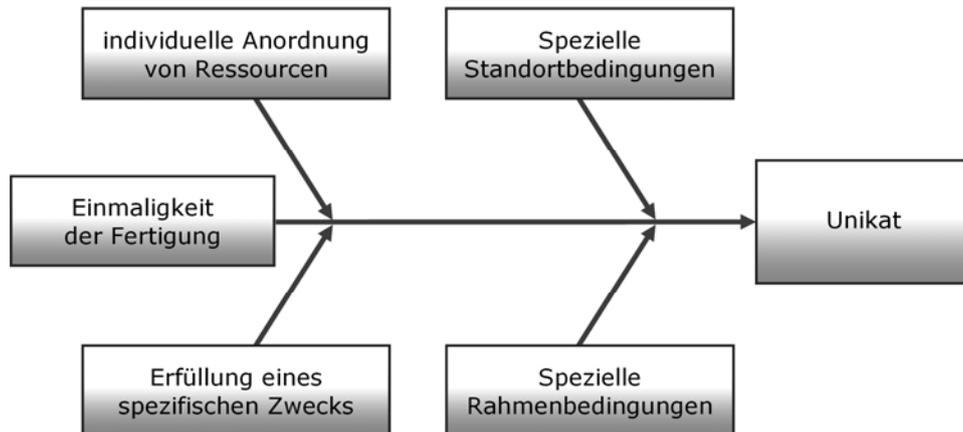


Bild 3 Merkmale eines Unikats

Aus diesen Überlegungen bleibt festzuhalten, dass jedes Bauwerk ein Unikat ist. Ein Unikat wird aber zu einem großen Anteil aus Materialien gefertigt, die keinen Unikatcharakter aufweisen. Erst die spezifische Anordnung der Baustoffe sowie der individuelle Einsatz der weiteren Ressourcen führen zum Unikat. Eine diskret ereignisorientierte Modellierung und Simulation von Unikaten stellt daher eine sehr hohe Herausforderung dar, da sie ebenfalls individuell ist.

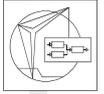
Prozesse zur Fertigung von Unikaten

Der Leistungserstellungsprozess kennt zwei grundlegende Prozessarten: Informationsprozesse und Fertigungsprozesse [1].

Informationsprozesse verarbeiten Informationen. Eingabeinformationen werden in Ausgabeinformationen transformiert. Die Bedeutung von Informationsprozessen liegt in der Wertsteigerung der Informationen durch Erhöhung oder Präzisierung ihrer Aussagekraft. Zu den Informationsprozessen gehören Prozesse, wie die Kalkulation oder das Controlling.

Gegenüber den Informationsprozessen zeichnen sich Fertigungsprozesse dadurch aus, dass physische Materie ver- oder bearbeitet wird. Vorprodukte werden durch den Einsatz von Geräten und Personal in Zwischen- oder Endprodukte gewandelt. Zu den Fertigungsprozessen gehören alle auf der Baustelle vorhandenen Prozesse zur physischen Realisierung von Bauwerken, wie zum Beispiel das Einbringen von Beton.

Im Bauwesen unterscheiden sich Informations- und Fertigungsprozesse im Wesentlichen in den jeweiligen Planungsanforderungen. Informationsprozesse können wiederholt nach einem ähnlichen Schema ablaufen. Zum Beispiel kann in einem ausführenden Bauunternehmen ein grundlegender Kalkulationsablauf definiert werden, wonach zuerst die Ausschreibungsunterlagen auf Vollständigkeit und Richtig-



keit zu prüfen sind, danach eine Begehung des zukünftigen Baufeldes erfolgen soll, um anschließend die Ermittlung der Einheitspreise für die Leistungspositionen des Leistungsverzeichnis durchführen zu können. Einzigartig in diesem Kalkulationsprozess sind nur die verarbeiteten Informationen, nicht aber der Ablauf des Kalkulationsprozesses als solcher. Die Fertigungsprozesse des Bauwesens sind dagegen in ihrer Ausführung im Wesentlichen einmalig stattfindende Prozesse, da ihre Planung ebenso wie die Ausführung die vorhandenen Standort- und Rahmenbedingungen beachten muss.

Im baubetrieblichen Aufgabenfeld zeigen sich das Kostenmodell (Kalkulation) und das Terminmodell als die wichtigsten Formen der Modellanwendung. Beide Modelle bilden Informationsprozesse ab. Für diese Prozesse liegen bereits Softwarelösungen zur Modellierung vor. Zum Beispiel können Programme wie ARRIBA von RIB leicht an die betriebsinternen Anforderungen des Kalkulationsablaufs angepasst werden.

Eine diskret ereignisorientierte Modellierung des Bauvorhabens soll als „drittes Modell“ für die Bauausführenden entwickelt werden, um eine weitere Sicht auf die Entscheidungsfindung in der Bauablaufplanung zu schaffen. Nachfolgend werden für ein solches Modell verschiedene Anforderungen aus baubetrieblicher Sicht diskutiert.

Baubetriebliche Anforderungen an die diskret ereignisorientierte Modellierung und Simulation von Unikaten

Eine prinzipielle Forderung, die an jede Tätigkeiten unternehmerischen Handels gestellt werden kann, besteht in dem zusätzlichen Nutzen, den eine diskret ereignisorientierte Modellierung und Simulation schafft.

Der mögliche Nutzen für die Bauausführenden kann anhand verschiedener Kriterien gemessen werden. Im Baubetriebswesen bestehen die wesentlichen Beurteilungskriterien in der Einhaltung der geforderten Qualität, in der Vermeidung von Kostenüberschreitungen und in der Einhaltung der vereinbarten Termine. Die diskret ereignisorientierte Modellierung und Simulation muss mindestens bei einem dieser Kriterien einen Mehrwert schaffen. In den meisten Fällen wird sich der Nutzen auf mehrere Kriterien auswirken, da sich die baubetrieblichen Kriterien gegenseitig beeinflussen und voneinander abhängig sind. Es steht jedoch außer Frage, dass mit einer diskret ereignisorientierten Modellierung und Simulation auch weitere Zielvorgaben bei einem Bauprojekt, wie zum Beispiel Sicherheit und Gesundheitsschutz, betrachtet werden können.

Das Hilfsmittel „diskret ereignisorientierte Modellierung und Simulation“ muss einen positiven Beitrag zur Wertschöpfung des Bauunternehmens leisten. Vor der Modellierung und der späteren Simulation ist es erforderlich, die Problemstellung zu definieren und das zu erreichende Ziel festzulegen.

Der baubetrieblichen Modellanwender sieht sich mit der Frage konfrontiert, bei welchen bauausführenden Aufgaben der Einsatz der diskret ereignisorientierten Modellierung und Simulation nützlich sein kann. Um eine Antwort auf diese Frage zu finden, sollen Schwachstellen der bisherigen Planung im Bauunternehmen betrachtet werden.

Wie eingangs in Kapitel 1 erwähnt, wird die Ausführung von Bauvorhaben durch die steigende Komplexität der Bauaufgabe und der wirkenden Randbedingungen immer anspruchsvoller. Der einzelne Kalkulator oder Arbeitsvorbereiter kann diese vielfältigen Anforderungen im Kosten- oder Terminmodell oft nicht mehr vollständig berücksichtigen. Die Verteilung der Arbeitsaufgabe auf mehrere Personen hilft nur bedingt, da mit der Koordination der einzelnen Personen ein neues Problemfeld auftritt. Das Ergebnis sind Ausführungsrisiken im Kosten- und Terminmodell.

Eine Möglichkeit diese Risiken zu bewerten oder zumindest zu identifizieren, sind stochastische Ansätze. Kostenrisiken in Abhängigkeit der Kostenkennwerte und der auszuführenden Mengen können dem Bauunternehmen Informationen über den möglichen Gewinn oder Verlust einer Baustelle liefern.



Stochastische Ansätze bei der Dauer einzelner Vorgänge liefern eine Aussage, in wie weit der vom Bauherrn gesetzte Termin des Bauzeitendes überschritten wird.

Mit dieser Methodik kann aber nicht der kausale Zusammenhang der einzelnen Vorgänge überprüft werden. Ist im Terminmodell zum Beispiel geplant, zuerst die Decke des 4. OG und anschließend die tragenden Wände im 3. OG herzustellen, fällt dieser logische Fehler des Bauablaufs nicht auf. Die diskret ereignisorientierten Modellierung und Simulation bietet dagegen Möglichkeiten, derartige Unstimmigkeiten des Bauablaufs aufzudecken.

Ein weiteres Problem der baubetrieblichen Ablaufplanung ist die Koordination der einzelnen Gewerke und der auf der Baustelle beschäftigten Unternehmern. Im herkömmlichen Terminmodell ist es nicht möglich, den dreidimensionalen Raum zu erfassen und die Abhängigkeiten sowie mögliche Beeinträchtigungen zwischen den verschiedenen Gewerken zu betrachten. Eine diskret ereignisorientierten Modellierung und Simulation kann dem Arbeitsvorbereiter helfen, kritische Situationen zu erkennen und notwendige Änderungen im Terminmodell vorzunehmen, um Verzögerungen im Bauablauf zu verhindern.

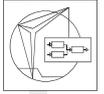
Beispiele, wie logische Unstimmigkeiten und Verzögerungen des Bauablaufs, zeigen häufig auch Auswirkungen auf das Kostenmodell. Verbesserungen des Terminmodells durch die diskret ereignisorientierte Modellierung und Simulation wirken sich indirekt auch auf die Projektkosten aus. Die Modellierung und Simulation können aber auch einen direkten Einfluss auf das Kostenmodell nehmen. Die Baustelleneinrichtung mit der notwendigen Baulogistik kann ebenfalls mittels eines diskret ereignisorientierten Modells untersucht und simuliert werden, um mögliche Verbesserungen beim Standort von Kränen, Umschlag- oder Lagerplätzen zu erkennen. Besonders interessant wird sich ein solcher Vergleich zeigen, wenn verschiedene Bauablaufvarianten mit unterschiedlichen Bauabschnitten oder Takten möglich sind. Voraussetzung ist hierbei, dass keine Variante aufgrund spezieller Standort- oder Rahmenbedingungen dominiert und zwingend zur Ausführung gebracht werden muss.

Bei jeder Modellierung und Simulation – insbesondere wenn diese zum Vergleich verschiedener Alternativen genutzt werden soll – ist die Güte der Eingabedaten von enormer Bedeutung. Fehlerhafte Eingabedaten führen selbst bei der Simulation eines in sich korrekten Modells zu ungeeigneten Ergebnissen. Adäquate Eingabedaten zu ermitteln, stellt sich im Bauwesen als besonderes Problem heraus. Zum Beispiel variiert der Kennwert zum Fördern von Schalungsteilen unter anderem in Abhängigkeit der Förderhöhe, der Arbeitsleistung der Bauarbeiter und des Kranfahrers sowie der Wetter- und Windverhältnisse. Der Kennwert ist somit von eindeutig bestimmbar wie auch nur schwer zu bestimmenden Variablen abhängig. Aufgrund der Unschärfe der Eingabedaten kann die diskrete ereignisorientierte Modellierung und Simulation nur in Form einer Szenarioanalyse des Bauablaufs unter definierten Randbedingungen angewandt werden, zum Beispiel bei dem Szenario „Ideale Wetterverhältnisse“. Der Vergleich der Alternativen darf nur auf Basis gleichwertig aufgenommener Eingangsdaten erfolgen. Ansonsten erweisen sich die Simulationsergebnisse als wertlos.

Neben der Unschärfe der Eingabedaten besteht mit dem zu errichtenden Bausoll ein weiterer Unsicherheitsfaktor. Zwar wird zur Auftragserteilung ein Bausoll mit einer definierten Qualität, Konstruktion und den einzuhaltenden Terminen eindeutig beschrieben und vertraglich festgelegt, jedoch wird bei den meisten Bauprojekten das Bausoll über die Bauzeit verändert. Diese Änderungen des Bausolls basieren einerseits auf dem Recht des Bauherrn zur Änderung des Planentwurfs (§ 1 Abs. 3 VOB/B) und entstehen andererseits zum Beispiel durch zusätzliche technologische Maßnahmen, um den Bauvertrag zu erfüllen (§ 2 Abs. 8 VOB/B).

Ein herkömmliches Terminmodell lässt sich noch relativ unkompliziert an das neue Bausoll anpassen. Das diskrete ereignisorientierte Modell benötigt dagegen einen deutlich höheren Aufwand zur Anpassung an das veränderte Bausoll. Eine schnelle und einfache Anpassung ist für das baubetriebliche Anwendungsfeld von großer Bedeutung, wenn das Modell wie oben erwähnt zum Beispiel zur logischen Überprüfung des Bauablaufs eingesetzt werden soll. Bildet das Modell die realen (veränderten) Verhältnisse nicht mehr ab, so können die Simulationsergebnisse nicht als Entscheidungshilfe für das reale Problem dienen.

Zusammenfassung



Dieser Beitrag betrachtet die Anforderungen an die diskret ereignisorientierte Modellierung und Simulation von Prozessen zur Planung und Fertigung von Unikaten aus einer baubetrieblichen Sicht. Für diese Überlegungen war es notwendig, zunächst eine Definition für den Begriff des Unikats zu finden und die vorhandenen Prozesse zu betrachten. Es wurde festgestellt, dass ein Unikat aus einer individuellen Anordnung von Nicht-Unikaten besteht. Die grundlegenden Prozesse zur Fertigung dieser Unikatbauten sind jedoch selten selber ein Unikat, vielmehr erfahren sie eine häufige Wiederholung auf den unterschiedlichen Baustellen.

Im zweiten Teil des Beitrags wurden die baubetrieblichen Anforderungen konkretisiert. Die wesentliche Entscheidungsgrundlage im Baubetriebswesen besteht mit dem Kosten- und Terminmodell, da diese die dominierenden Kriterien für die Ausführung darstellen. Die diskret ereignisorientierte Modellierung und Simulation kann eine Unterstützung für diese beiden Modelle – wie es Bild 4 verdeutlicht – bedeuten.

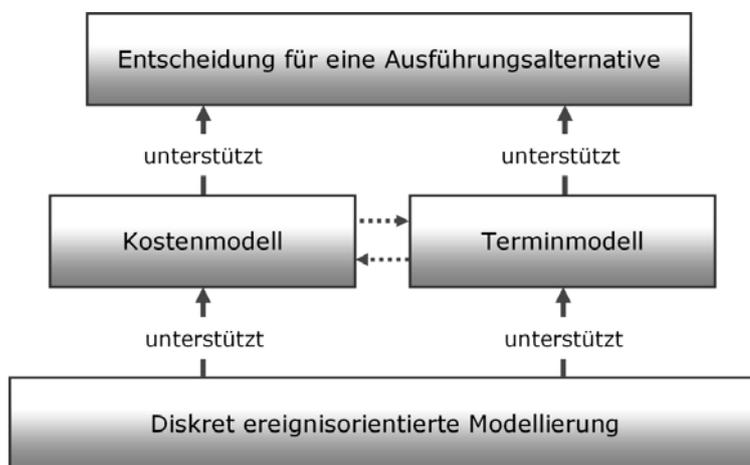


Bild 4 Diskret ereignisorientierte Modellierung im Zusammenhang mit anderen Modellen

Literatur

- [1] SCHMIDT, G.: Prozessmanagement – Modelle und Methoden, 2. Auflage, Berlin, Heidelberg u. a., Springer, 2002.
- [2] STEVENSON, W. J.: Production operations management, 5. Auflage, Chicago u. a., Irwin Verlag, 1996.
- [3] SCHACH, R.; SPERLING, W.: Baukosten – Kostensteuerung in Planung und Ausführung, 1. Auflage, Berlin u. a., Springer, 2001.
- [4] KOCHENDÖRFER, B.; LIEBCHEN, J. H.; VIERING, M. G.: Bau-Projekt-Management – Grundlagen und Vorgehensweisen, 3. Auflage, Wiesbaden, Teubner, 2007.

Autorenangaben

Dipl.-Wi.-Ing. Christian Flemming
Wissenschaftlicher Assistent
Christian.Flemming@TU-Dresden.de

Dipl.-Ing. Marco Wach
Wissenschaftlicher Assistent
Marco.Wach@TU-Dresden.de

Technische Universität Dresden
Institut für Baubetriebswesen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Schach, Institutsdirektor
Nürnberger Straße 31 A
01187 Dresden

