

# Schriftenreihe Bauwirtschaft

## III Tagungen und Berichte

2. IBW-Workshop

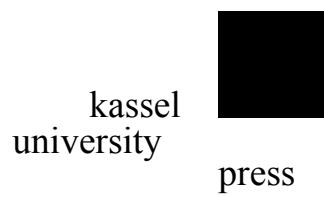
Simulation von Unikatprozessen

# **Schriftenreihe Bauwirtschaft**

III Tagungen und Berichte 8

Herausgegeben vom Institut für Bauwirtschaft an der Universität Kassel





**2. IBW-Workshop, 24. März 2011 an der Universität Kassel**  
Simulation von Unikatprozessen – Neue Anwendungen aus Forschung und Praxis

Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz (Hrsg.)

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

ISBN print: 978-3-86219-096-6  
ISBN online: 978-3-86219-097-3  
URN: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0002-30971>

© 2011, **kassel university press GmbH, Kassel**  
[www.upress.uni-kassel.de](http://www.upress.uni-kassel.de)

Druck und Verarbeitung: Unidruckerei der Universität Kassel  
Printed in Germany

## 2. IBW-Workshop

# Simulation von Unikatprozessen

Neue Anwendungen aus  
Forschung und Praxis

24. März 2011  
an der Universität Kassel

Veranstalter:

Arbeitsgruppe „Unikatprozesse“ der ASIM-Fachgruppe: „Simulation in  
Produktion und Logistik“ in der Gesellschaft für Informatik (GI)

Institut für Bauwirtschaft, Universität Kassel (IBW)





Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz

## **Vorwort des Herausgebers**

Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz  
Universität Kassel, Institut für Bauwirtschaft  
Fachgebiet Bauorganisation und Bauverfahren  
Mönchebergstraße 7, 34125 Kassel

Dieser Tagungsband ist anlässlich des 2. IBW-Workshops zum Thema „Simulation von Bauprozessen“ entstanden, der am 24.03.2011 an der Universität Kassel stattfand. Die Tagung stand unter dem Motto: Simulation von Unikatprozessen – neue Anwendungen aus Forschung und Praxis. Veranstalter dieser Tagung sind das Institut für Bauwirtschaft an der Universität Kassel und die Arbeitsgruppe „Unikatprozesse“ der ASIM-Fachgruppe „Simulation in Produktion und Logistik“, eine Unterorganisation der Gesellschaft für Informatik. Herausgegeben wird der Tagungsband vom Leiter des Fachgebietes, der auch gewählter Sprecher der Arbeitsgruppe ist.

Die Veranstaltung behandelt den derzeitigen Stand der Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Simulation von Unikatprozessen, insbesondere im Bauwesen und in der stationären Industrie. Die Beiträge dieses Tagungsbandes sind von den Referentinnen und Referenten aus der Hochschulforschung als auch aus der Industrie verfasst. Dabei wollen sich insbesondere auch die Mitglieder der Arbeitsgruppe mit ihren Forschungsansätzen präsentieren und ihre einschlägigen Arbeiten vorstellen.

Neben der Vorstellung der Möglichkeiten von Simulationstools behandeln die Themen vor allem Anwendungen aus der industriellen Nutzung in Form von Best-Practice-Beispielen und neue Entwicklungen und Ideen der Simulation in Forschung und Praxis. Die Schwerpunkte der Themen liegen dabei im Bereich der Datenerfassung und –aufbereitung, der Vorstellung von praxistauglichen Modellierungskonzepten für Unikatprozesse sowie der Beschreibung der Unterschiede zwischen der stationären Produktion und der Unikatfertigung. Den Teilnehmern der Tagung und den Lesern dieses Tagungsbandes sollen die neuesten Entwicklungen und Innovationen im Bereich der Simulation vorgestellt werden.

Im Jahr 2007 fand, organisiert vom Herausgeber dieses Tagungsbandes, im Institut für Bauwirtschaft die erste ganztägige Tagung zum Thema Simulation in der Bauwirtschaft in Kassel statt. Seinerzeit wurde beklagt, dass die Simulation von Bauprozessen in der Bauwirtschaft noch zu wenig in der Praxis eingesetzt wird. Es fehlten geeignete Modellierungstools, die leicht zu erlernen und anwenderfreundlich sind sowie die besonderen Bedingungen von Bauprozessen berücksichtigen. Ferner wurde noch zu wenig auf dem Gebiet der Simulation von Bauprozessen geforscht und publiziert.

In den vergangenen drei Jahren hat sich dieses Bild geändert. An zahlreichen Hochschulen wird an baubetrieblichen Lehrstühlen nun dieses Thema in der Forschung und zunehmend in der Lehre behandelt. Auch in einigen größeren Bauunternehmen hat man sich mittlerweile dieses Themas bei der Ausführungsplanung innerhalb der Arbeitsvorbereitung angenommen. Die erste Tagung konnte hier maßgebliche Impulse setzen und bereits vorhandene Forschungsgruppen zusammenführen, die sich mit der Simulation von Bauprozessen beschäftigen. Vom Veranstalter gefordert und vorgeschlagen wurde seinerzeit die Bildung einer Plattform zur Vorstellung der unterschiedlichen Forschungsarbeiten an den verschiedenen Lehrstühlen und zur Diskussion aller Wissenschaftler und Praktiker, die sich in Forschung, Lehre und Praxis mit dem Thema der Modellierung und Simulation von Prozessen in Produktion und Logistik im Bauwesen beschäftigen.

Mit der Einrichtung der Arbeitsgruppe „Unikatprozesse“ in der ASIM Fachgruppe „Simulation in Produktion und Logistik“ (SPL) ist uns dies nunmehr gelungen. Die Fachgruppe ist eine Unterorganisation der Gesellschaft für Informatik (GI) und die Arbeitsgruppe damit integriert in einen öffentlichen Rahmen, in dem die wesentlichen Wissenschaftler und Praktiker, die sich mit der Simulation beschäftigen, eingebunden sind. Die GI ist die größte Vereinigung von Informatikerinnen und Informatikern im deutschsprachigen Raum und setzt sich zusammen aus verschiedenen Fachbereichen und Fachgruppen. Die Fachgruppe SPL vertritt innerhalb der GI 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 die Organisation von Fachgruppensitzungen, Fachtagungen, Vortragsveranstaltungen, Diskussionsforen und die Einrichtung von zeitlich befristeten Arbeitsgruppen sowie der Mitarbeit bei VDI-Richtlinien und Publikationen.

Die Simulation von Produktionsprozessen ist in der stationären Industrie, vor allem in der Automobilindustrie, seit vielen Jahren ein anerkanntes Planungs- und Steuerungsinstrument in der Fertigung. Die Modellierung von Unikatprozessen erfordert eine andere Herangehensweise als bei der Serienfertigung. Insbesondere bei ortveränderlichen Arbeitssystemen, wie sie vor allem im Bauwesen, aber auch im Schiffsbau und im Anlagenbau bei der Errichtung von Industrieanlagen anzutreffen

sind, bedarf es einer speziellen Vorgehensweise bei der Modellerstellung und Simulation der Prozesse.

Die Planung und Herstellung von Unikaten ist geprägt durch eine hohe Individualität und Einmaligkeit der Ausführung. Erschwerend kommt hinzu, dass sich die aktuellen Rahmenbedingungen sowohl bei der Planung als auch bei der Realisierung aufgrund von Rückmeldungen z. B. aus dem Baufeld ad hoc verändern können. Oftmals gibt es jedoch vergleichbare Grundstrukturen. 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 im Modell zur Verringerung des Entwicklungsaufwandes führt zu ungenauen Ergebnissen in der Simulationsstudie. Daher sind Vorgehensmodelle und Simulationsentwicklungen zu erschließen, die die Abbildung der hohen Komplexität solcher Prozesse ermöglichen.

Vorhandene Tools aus der stationären Industrie sind für die Simulation von Bau- prozessen und anderen Unikatprozessen oftmals nicht geeignet, da der Modellierungsaufwand zu hoch ist und die Kosten einer solchen Simulationsstudie eventuell nicht durch den einmaligen Effizienzgewinn gedeckt werden. Bei der Simulation von Unikatprozessen geht es auch nicht vorrangig um die Optimierung der Prozesse, wie dies bei der Simulation von stationären Prozessen in der Serienfertigung angestrebt wird, sondern vielmehr zunächst nur um die Überprüfung der Machbarkeit und Ermittlung der Reihenfolgen, der Abhängigkeiten und der erforderlichen Zeitdauer unter Beachtung ökonomischer, stochastischer und vertraglicher Randbedingungen. Dabei kann die Simulation aber auch zur Erhöhung der Sicherheit prognostizierter Aussagen dienen.

Ferner ist die genaue Visualisierung bei Unikatprozessen wesentlich schwieriger als bei stationären Fertigungsprozessen, so dass es bisher nur wenige solche Ansätze gibt. Infolge der variablen Abhängigkeiten und veränderlichen räumlichen und klimatischen Umgebungseinflüsse erfordert eine Modellierung von Unikatprozessen auch die Berücksichtigung zufallsabhängiger Parameter. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit der stochastischen Modellierung solcher Prozesse.

Des weiteren dauert die Simulationsstudie bei Unikatprozessen infolge der aufwändigen Datenerfassung und Modellierung oftmals zu lang, so dass deren Ergebnisse zur Verbesserung des Prozesses nicht mehr genutzt werden können, da

der entsprechende Prozess in der Praxis mittlerweile schon abgeschlossen wurde. Dazu ist insbesondere im Hochbau aber auch im Schiffbau die Anzahl der unterschiedlichen Akteure zu groß, und die Abhängigkeiten sind besonders vielfältig und selten eindeutig.

Simulationstools zur Abbildung von Bauprozessen und anderen Unikatprozessen müssen daher komplexe Abläufe schnell und ohne hohen Aufwand abbilden können. Erforderlich ist die Abbildung vieler unterschiedlich agierender Arbeitskräfte mit ihren individuellen Fähigkeiten und Aufgaben in einer sich stetig verändernden Arbeitsumgebung. Ferner sind die Maschinen und Arbeitsgeräte mit ihren spezifischen Charakteristika zu berücksichtigen. Hinzu kommt, dass die Prozesse aus einem sehr komplexen, verzahnten und dynamischen Geflecht einzelner Arbeitsschritte und Abhängigkeitsbeziehungen bestehen.

Zur Modellierung solcher Prozesse gibt es bereits Erfahrungen auf Basis der deterministischen und stochastischen Netzplantechnik sowie erste Ansätze auf Grundlage von erweiterten Petri-Netzen, kommerziellen bausteinorientierten Simulationstools und agentenbasierten Simulationsentwicklungsumgebungen. An verschiedenen Universitäten, aber auch in den Entwicklungsabteilungen einiger Unternehmen wird derzeit nach Lösungsmöglichkeiten geforscht zum Einsatz der Simulation bei Unikatprozessen mit dem Ziel der Steigerung der Effizienz der eingesetzten Ressourcen und der Wirtschaftlichkeit. Unter anderem sind vorhandene Ansätze zu bündeln, entsprechende Werkzeuge weiter zu entwickeln, vorhandene Tools miteinander zu verzahnen und die erforderlichen Schnittstellen zu definieren sowie geeignete neue Instrumente zu erforschen.

Die Arbeitsgruppe „Unikatprozesse“ hat diese verschiedenen Entwicklungen und Forschungsansätze aufgegriffen und zusammengefasst und will sie in gemeinsamen Aktivitäten bündeln. Mit ihrer Arbeit will die Arbeitsgruppe einen Überblick geben über den derzeitigen Stand der Forschung und Entwicklung sowie neue Impulse zum Einsatz der Simulation in der Bauwirtschaft und darüber hinaus bei der Abbildung von anderen Unikatprozessen im Schiff- und Anlagenbau geben. Hierzu werden von der Arbeitsgruppe verschiedene Arbeitsgruppensitzungen, Workshops und Tagungen organisiert, um sich auszutauschen und darüber hinaus vorhandene Ansätze zu vergleichen. Darauf aufbauend soll nach praktikablen Lösungen für die speziellen Probleme bei der Modellierung und Simulation von Uni-

katprozessen gesucht und in gemeinsamen Publikationen die Ideen der Modellierung und Simulation branchenübergreifend verbreitet werden. Hierzu soll auch innerhalb der nächsten drei Jahre eine zusammenfassende Publikation in der Arbeitsgruppe zum Stand der Simulation von Unikatprozessen und der wesentlichen aktuellen Forschungsansätze und –ergebnisse erarbeitet werden.

Zahlreiche Wissenschaftler aus verschiedenen Universitäten, einschlägige Softwareentwickler und Praktiker aus Unternehmen sind Mitglieder der Arbeitsgruppe geworden und unterstützen durch ihre Teilnahme an den Veranstaltungen die Tätigkeiten und Ziele der Arbeitsgruppe. Die Mitglieder der Arbeitsgruppe erhoffen sich durch die gemeinsame Arbeit einen Mehrwert durch die fach- und ortsübergreifende Zusammenarbeit und eine bessere Ausschöpfung des Potenzials, welches in den Methoden der Simulation liegt und derzeit bei Unikatprozessen nur ungenügend zum Einsatz kommt.

Möge dieser Tagungsband einen weiteren Impuls geben für die Entwicklung der Modellierung und Simulation von Bauprozessen und darüber hinaus für die weitere Zusammenarbeit der Arbeitsgruppe „Unikatprozesse“ in der Fachgruppe „Simulation in Produktion und Logistik“.

Der vorliegende Tagungsband wird finanziell unterstützt durch die GFB, die Gesellschaft zur Förderung der Forschung und Lehre im Institut für Bauwirtschaft der Universität Kassel.

## Inhaltsübersicht

<i>Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz</i>	
Vorwort des Herausgebers .....	VII
<i>Dipl.-Wi.-Ing. Christian Flemming, Prof. Dr.-Ing. Rainer Schach</i>	
Zum Begriff der Simulation .....	1
<i>Dr.-Ing. Holger Pitsch</i>	
Simulation von Unikatprozessen —	
Herausforderung für kommerzielle Simulationswerkzeuge .....	11
<i>Prof. Dr.-Ing. Bernd Kochendörfer, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Huhnt,</i>	
<i>Dipl.-Ing. Lydia Pabst, Dipl.-Ing. Sven Richter</i>	
Teilprozesse als Grundlage zur Modellierung der Bauplanung .....	29
<i>Prof. Dr.-Ing. Fritz Berner</i>	
Die Entwicklung projekt- und fertigungsspezifischer Baulogistikprozesse -	
Ein Planungsmodell.....	45
<i>Dr.-Ing. Racha Chahrour, Dr.-Ing. Jan Tulke</i>	
Anbindung der Simulation an eine BIM-Umgebung, Chancen und	
Anforderungen im Vergleich zur Terminplanung .....	63
<i>Dipl.-Ing. Basel Kordi, Dipl.-Ing. Martin Kugler, Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz</i>	
Entwicklung eines Prozessmodells für die Simulation der Ablaufplanung	
für Roh- und Ausbauarbeiten .....	81
<i>Dr. sc. techn. Peter Wotschke, Dipl.-Wirt.-Ing. Gregor Kindermann</i>	
Die Simulation des (un)gestörten Bauablaufs als Beweismittel	
in einem Streitfall.....	93

<i>Prof. Dr.-Ing. André Borrmann, Dipl.-Inf. Yang Ji, Dipl.-Ing. Johannes Wimmer</i>	
Kopplung makroskopischer und mikroskopischer Verfahren zur	
Optimierung von Erdbauprozessen .....	109
<i>Dipl.-Wi.-Ing. Christian Flemming</i>	
Simulation für die Risikoprognose von Bauprojekten .....	121
<i>Dipl.-Ing. Ramez Edris, Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz, Dr. rer. nat. Armin Wolf</i>	
Constraint-basierter Ansatz zur Optimierung von Bauablauftermin-	
plänen auf Basis von optimalen Lohnstundensummen im Hochbau .....	143
<i>Dipl.-Ing. Martin Kugler, Dipl.-Ing. Basel Kordi, Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz</i>	
Der Aufbau der Modellierungsumgebung CiSmo .....	157

Dipl.-Wi.-Ing. Christian Flemming  
und  
Prof. Dr.-Ing. Rainer Schach

## **Zum Begriff der Simulation**

Dipl.-Wi.-Ing. Christian Flemming  
Prof. Dr.-Ing. Rainer Schach  
Technische Universität Dresden  
Fakultät Bauingenieurwesen  
Institut für Baubetriebswesen  
Nürnberger Straße 31 A, 01187 Dresden

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	3
1 Motivation.....	3
2 Simulation in Abgrenzung zu anderen Begriffe .....	4
3 Grundlegende Arten der Simulation .....	5
3.1 Monte-Carlo-Simulation.....	5
3.2 Diskrete Simulation.....	6
3.3 Kontinuierliche Simulation .....	6
4 Simulation – ein Begriff, viele Definitionen .....	7
5 Zusammenfassung.....	8
Literatur .....	9

## Kurzfassung

Dieser Beitrag widmet sich dem Begriff der Simulation. Das Ziel ist es, neben den vielen speziellen Beschreibungen für die Simulation eine allgemeingültige Definition zu finden. Damit sollen die unterschiedlichen Ansichten des Simulationsbegriffs zusammengefasst werden. Zunächst wird auf die Ursache für die Entstehung der unterschiedlichen Definitionen eingegangen. Anschließend erfolgt eine inhaltliche Trennung der Begriffe Modell, Simulation, Visualisierung und Animation. Es werden verschiedene Arten der Simulation vorgestellt und abschließend von den Autoren eine allgemeingültige Definition für den Begriff der Simulation diskutiert.

## 1 Motivation

Vor der Entwicklung der IT-Technologie konnten technische und wissenschaftliche Fragestellungen nur in analogen (mechanisch, hydraulisch etc.) Simulationen an einem Realobjekt untersucht werden. Durch den Einsatz rechnergestützter Modelle wurden analoge Simulationen für viele Fragestellungen immer mehr durch virtuelle Simulationen ersetzt (*Kühn 2006*). Die Untersuchung an einem virtuellen Modell bietet verschiedene Vorteile (*Kahlert 2004*). Die Komplexität der Fragestellung lässt sich durch die Abstraktion aus der realen Welt in das virtuelle Modell auf die relevanten Parameter beschränken. Die Ergebnisse der Untersuchung können nicht durch unberücksichtigte Störungen beeinträchtigt werden und sind somit reproduzierbar. Es ist ebenfalls möglich, die Parameter in beliebiger Form zu variieren und deren Auswirkungen zu untersuchen. Auf diese Weise können auch gefährliche Szenarien betrachtet werden, ohne dass eine reale Gefahr entsteht. Ein weiterer Vorteil der virtuellen Welt besteht in der Kontrolle der Zeit. Die Geschwindigkeit schnell ablaufender Prozesse kann reduziert und der Ablauf für die menschliche Wahrnehmung sichtbar gemacht werden. Langsam ablaufende oder langandauernde Prozesse können beschleunigt werden. Die virtuelle Simulationen schafft damit einen Zeitgewinn gegenüber der analogen Simulation. Virtuelle Simulationen können in vielen Fällen zu einem Kostenvorteil gegenüber der Betrachtung in der realen Welt führen, da keine Ressourcen oder Investitionen – bis auf die Energie für die Hardware und die Softwarelizenzen – benötigt werden.

Der Nutzen aus diesen Vorteilen und die stetige Steigerung der Leistungsfähigkeit von Computern sorgen dafür, dass virtuelle Simulationen in den verschiedensten Forschungsgebieten zum Einsatz kommen. Dabei ist eine enorme Begriffsvielfalt für den Terminus „*Simulation*“ entstanden. Die Definitionen unterschieden sich hinsichtlich des Anwendungsfeldes und der Begriffsweite. Dadurch kann es zu Missverständnissen kommen, wenn von „*Simulation*“ gesprochen wird, sich aber unterschiedliche Vorstellungen dahinter verbergen. In diesem Beitrag sollen verschiedene Definitionen diskutiert werden und der Versuch unternommen werden, eine allgemeingültige Definition für den Begriff der Simulation zu finden. Zunächst sollen aber die Begriffe „*Simulation*“, „*Modell*“, „*Visualisierung*“ und „*Animation*“ inhaltlich abgegrenzt werden.

## 2 Simulation in Abgrenzung zu anderen Begriffe

Bevor für den Begriff der Simulation eine Definition gefunden werden kann, ist es sinnvoll, andere Begriffe zu definieren, die in einem Zusammenhang mit der Simulation stehen. Damit wird der Rahmen für den Simulationsbegriff geschaffen.

Das **Modell** ist ein Abbild eines Originals, das nur diejenigen Elemente enthält, die für die zu untersuchende Fragestellung relevant sind (Stachowiak 1973). Es soll so wenige Elemente wie möglich, aber so viele Elemente wie nötig enthalten. Das Modell schafft damit die virtuelle Welt, in der sich die Simulation bewegen kann. Das Modell stellt die Voraussetzung für die Simulation dar.

Die **Visualisierung** ist eine bildhafte Darstellung von abstrakten Informationen und Daten (Schumann und Müller 2000). Sie soll die Auswertung und Ergebnisinterpretation unterstützen und somit zum Verständnis der Fragestellung beitragen. Bei einer **Animation** verändert sich diese bildhafte Darstellung in Abhängigkeit der Zeit (Buziek et al. 2000). Die Animation zeigt, wie sich die Elemente des Modells während der Simulation ändern. Visualisierungen und Animationen verdeutlichen die simulierten Daten und können somit nur das Ergebnis der Simulation sein. Es sei aber darauf hingewiesen, dass visualisierte oder animierte Daten nicht zwangsläufig durch eine Simulation entstanden sein müssen. Das Bild 2.1 als Visualisierung dieser Ausführungen ist ein Beispiel für eine bildhafte Darstellung, die keine Simulation voraussetzt. Bild 2.1 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen den

verschiedenen Begriffen.

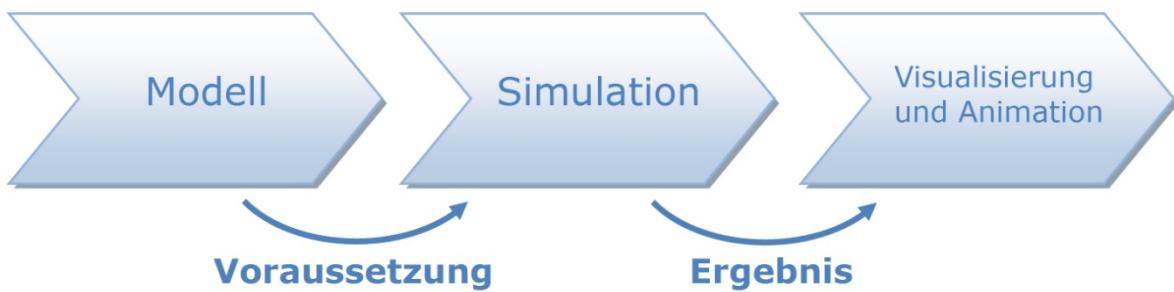


Bild 2.1: Simulation im Kontext

### 3 Grundlegende Arten der Simulation

Nachdem der Rahmen für den Simulationsbegriff geschaffen ist, erscheint es hilfreich, die grundlegenden Arten der Simulation zu betrachten, um einen Simulationsbegriff zu finden, der allgemeingültig für alle Simulationsarten sein soll. Domschke/Drexel beschreiben drei Arten der Simulation, die im Folgenden kurz betrachtet werden (*Domschke und Drexel 2007*).

#### 3.1 Monte-Carlo-Simulation

Die Monte-Carlo-Simulation ist nach dem gleichnamigen Stadtteil von Monaco benannt, der für sein Kasino bekannt ist. Die Bezeichnung beruht darauf, dass Glücksspiele in der theoretischen Betrachtung Zufallsexperimente darstellen. Beim Roulette können inklusive der Null 37 mögliche Ereignisse mit der gleichen Wahrscheinlichkeit eintreten. Auf welcher Zahl die Kugel landet, ist für jeden Wurf – bei einem nicht manipulierten Spieltisch – vom Zufall abhängig. In ähnlicher Weise funktioniert die Monte-Carlo-Simulation. Aus einem vorgegebenen Wahrscheinlichkeitsintervall, das alle potenziellen Realisierungen enthält, wählt das Verfahren einen Wert zufällig aus. Die Wahl der Realisierung hängt dabei ausschließlich vom Zufall ab. Eine Abhängigkeit zwischen der vorherigen Ziehung und der nächstfolgenden Ziehung existiert nicht. Die Monte-Carlo-Simulation eignet sich daher insbesondere für statische, also zeitunabhängige Fragestellungen. Eine bekannte Variante der Monte-Carlo-Simulation ist die Latin-Hypercube-Simulation (*Fang et al. 2005*).

### 3.2 Diskrete Simulation

Im Gegensatz zur Monte-Carlo-Simulation betrachtet die diskrete Simulation Fragestellungen mit dynamischen, das heißt zeitabhängigen Komponenten. Ein Modellobjekt kann während des Zeitverlaufs seinen Zustand ändern. Die Zustandsänderung wird durch Ereignisse ausgelöst. Daher wird diese Form der Simulation häufig auch als diskret-ereignisorientierte Simulation bezeichnet (Banks et al. 2010). Die Zustände und die Abfolge der Zustände müssen vor der Simulation definiert sein. Zum Beispiel kann ein Bauteil die Zustände „*nicht ausgeführt*“, „*in Bearbeitung*“ oder „*fertiggestellt*“ annehmen. Die Abfolge der Zustände entspricht der genannten Reihenfolge. Durch den Eintritt von Ereignissen wie „*Beginn der Ausführung*“ oder „*Ende der Ausführung*“ verändert sich der Zustand des Bauteils. Hier zeigt sich der Unterschied zur Monte-Carlo-Simulation. Die Änderung des Zustandes erfolgt nicht zufällig, sondern entsprechend der vorgegebenen Abfolge. Der neue Zustand ist vom alten Zustand des Objektes abhängig. Der Zeitpunkt, zu dem die Zustandsänderung in der Simulation eintritt, kann zeitgesteuert oder ereignisgesteuert geregelt sein. Eine zeitgesteuerte Aktualisierung der Zustandsänderungen bedeutet, dass zum Zeitpunkt  $t_i$  alle Zustandsänderungen vorgenommen werden, deren Auslöser im Intervall  $\Delta t = t_i - t_{i-1}$  liegen. Bei einer ereignisgesteuerten Regelung wird der Zeitpunkt des nächsten Ereignisses ermittelt und mit dem Zeitpunkt  $t_i$  für die Aktualisierung des Zustandes gleichgesetzt.

### 3.3 Kontinuierliche Simulation

Die kontinuierliche Simulation befasst sich wie die diskrete Simulation mit dynamischen Fragestellungen. Im Unterschied zur diskreten Simulation erfolgt bei der kontinuierlichen Simulation die Zustandsänderung nicht nur zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t_i$ , sondern stetig mit dem zeitlichen Fortschritt. Diese fortlaufende Änderung des Zustands wird durch Differentialgleichungen beschrieben. Mit analytischen Methoden stellt sich die Lösung von Differentialgleichungen als sehr mühevoll heraus. Aus diesem Grund kommen Simulationsverfahren zur Lösung der mittels Differentialgleichungen modellierten Zusammenhänge zum Einsatz (Bossel 2004). Ein solches Simulationsverfahren ist der System-Dynamics-Ansatz von Forrester (Forrester 1972).

## 4 Simulation – ein Begriff, viele Definitionen

Kapitel 2 schaffte durch die Definition des Modells als Voraussetzung und die Visualisierung und die Animation als Ergebnis der Simulation die Grenzen für den Simulationsbegriff. Es erscheint sinnvoll, diese inhaltliche Trennung vorzunehmen, um eine Verwechslung der Begriffe auszuschließen. Kapitel 3 stellte die verschiedenen Arten der Simulation vor. Auf dieser Basis kann der Versuch unternommen, eine allgemeingültige Definition zu finden.

Der Begriff „*Simulation*“ wird häufig anhand der Definition des VDI erklärt. Die *VDI Richtlinie 3633, Blatt 1* definiert die Simulation als ein „Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ (VDI 2010). Diese Definition hat das Ziel, die Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen zu beschreiben. Daher stellen die „*dynamischen Prozesse*“ eine wichtige Komponente dar. Für eine allgemeine Definition ist diese Formulierung zu speziell und schließt die statischen Simulationen aus. Die „*Nachbildung [...] in einem experimentierfähigen Modell*“ kann als die Entwicklung des Modells verstanden werden und fasst damit den Simulationsbegriff zu weit. Eine Verwechslung der Begriffe wäre möglich. Eine andere Definition, die ebenfalls zur Verwechslung zwischen Modell und Simulation führen kann, bieten Bever/Teichmann an: „Simulation heißt die Darstellung oder Nachbildung von technischen oder biologischen Systemen durch mathematische Modelle, [...].“ (Bever und Teichmann 2002). Ähnlich zeigt sich die Definition im Brockhaus. Simulation wird hier als die „Darstellung technischer, biologischer, ökonomischer und anderer Prozesse oder Systeme durch mathematische Modelle.“ beschrieben (Brockhaus 2003). Die Abgrenzung in Kapitel 2 hat gezeigt, dass die Modellierung nicht mit der Simulation gleichzusetzen ist. Eine weitere Sicht auf den Simulationsbegriff geben Böhret et al. Sie formulieren die Simulation als eine „Methode der Beobachtung und Analyse von Entwicklungen variierender Inputs (Systemzustände) innerhalb dynamischer Modelle (Simulationsmodelle)“ (Böhret et al. 1997). Sie schließen zwar nicht die Modellierung in ihre Definition mit ein, dafür aber die Auswertung der simulierten Ergebnisse. Damit wird die Simulation ebenfalls zu weit definiert. Die Definition von Dale/Lewis lautet: „*Simulation is the development of a model of a complex system and the experimental manipulation of that model to*

observe the result.“ (Dale und Lewis 2010). Dale/Lewis ziehen zwar auch die Modellierung in ihre Definition mit ein, beschreiben aber daneben die Simulation als experimentelles Vorgehen, um das Verhalten des Modells zu beobachten. Der Ansatz des Experimentierens scheint sehr viel versprechend zu sein. Die Autoren wollen darauf aufbauen und folgende allgemeingültige Definition für die Simulation vorschlagen:

*Simulation ist das zielgerichtete Experimentieren an einem Modell, um Erkenntnisse zu gewinnen, die zur Lösung eines realen Problems geeignet sind.*

Das „zielgerichtete Experimentieren“ verweist auf eine festgelegte Fragestellung, die mit der Simulation beantwortet werden soll. Durch die Formulierung „an einem Modell“ wird kein Bezug zu einer speziellen Simulationsart geschaffen. Die speziellen Eigenschaften der Elemente eines Modells sind für einen allgemeingültigen Simulationsbegriff nicht relevant. Der Zweck der Simulation besteht darin, „Erkenntnisse zu gewinnen“. Diese Bezeichnung grenzt den Nutzen der Simulation vom Modell und von der Visualisierung und Animation ab. Der Nutzen des Modells besteht in der Abbildung der realen Fragestellung; der Nutzen von Visualisierung und Animation ist die Aufbereitung von Daten und Informationen. Der Nutzen der Simulation besteht dagegen darin, diese Daten und Informationen durch aktives Experimentieren zu erzeugen. Eine wichtige Bedeutung erhält der letzte Teil der Definition. Die simulierten Daten und Informationen entstehen in der Modellebene. Sie besitzen ihre Gültigkeit nur aufgrund der getroffenen Modellannahmen. In der Auswertung der Simulationsergebnisse, die kein Bestandteil der eigentlichen Simulation ist, müssen die Daten aus der Modellebene in die Realebene übersetzt werden, um falsche Schlussfolgerungen zu verhindern.

## 5 Zusammenfassung

Dieser Beitrag diskutierte den Begriff der Simulation. Zunächst wurde aufgezeigt, wie die Vielfalt der möglichen Definitionen entstanden ist. Anschließend erfolgte eine begriffliche Trennung zwischen Modell, Simulation, Visualisierung und Animation. Zusammen mit der Beschreibung von grundlegenden Simulationsarten konnte die Basis für den Versuch einer allgemeingültigen Definition für den Begriff „Simulation“ geschaffen werden. Die von den Autoren vorgeschlagene Definition er-

weist sich als eine allgemeingültige Formulierung, die auf jede Fragestellung angewandt werden kann. Bei dieser Definition ist es unerheblich, ob ein dynamischer Prozess wie das Erstellen einer Bauleistung durch eine diskret-ereignisorientierte Simulation, das Risikopotenzial des Bauprojektes mithilfe der Monte-Carlo-Simulation oder die Planung der Baustelleneinrichtung durch manuelles Probieren untersucht wird. Diese allgemeine Definition deckt somit die verschiedenen Sichten der Simulation ab.

## Literatur

- Banks, J.; Carson, J. S.; Nelson, B. and Nicol, M. (2010): Discrete-event system simulation.* 5. Auflage, Pearson Prentice Hall Verlag, Upper Saddle River, NJ, München, 2010.
- Bever, J. und Teichmann, H. (2002): Weitergehende Abwasserreinigung.* 4. Auflage, Oldenbourg Verlag, München, Wien, 2002.
- Böhret, C.; Wordelmann, P.; Grün, M. K. und Frankenbach, W. (1997): Lernmodell Virtuelle Zukunft.* Deutsches Forschungsinstitut für öffentliche Verwaltung Speyer, 1997.
- Bossel, H. (2004): Systeme, Dynamik, Simulation – Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme.* Books on Demand Verlag, Norderstedt, 2004.
- Brockhaus (2003): Der große Brockhaus in einem Band.* F. A. Brockhaus GmbH, Leipzig, 2003.
- Buziek, G.; Dransch, D. und Rase, W.-D. (2000): Dynamische Visualisierung - Grundlagen und Anwendungsbeispiele für kartographische Animationen.* Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2000.
- Dale, N. und Lewis, J. (2010): Computer Science Illuminated.* 4. Auflage, Jones & Bartlett Publishers, Sudbury, Massachusetts, 2010.

*Domschke, W. und Drexel, A.* (2007): Einführung in Operations Research. 7. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.

*Fang, K.; Li, R. und Sudjianto, A.* (2005): Design and modeling for computer experiments. Chapman & Hall CRC Verlag, New York, 2005.

*Forrester, J. W.* (1972): Industrial dynamics. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1972.

*Kahlert, J.* (2004): Simulation technischer Systeme - eine beispielorientierte Einführung. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2004.

*Kühn, W.* (2006): Digitale Fabrik – Fabriksimulation für Produktionsplaner. Hanser Verlag, München, Wien, 2006.

*Schumann, H. und Müller, W.* (2000): Visualisierung – Grundlagen und allgemeine Methoden. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2000.

*Stachowiak, Herbert* (1973): Allgemeine Modelltheorie. Springer Verlag, Wien, 1973.

*VDI 3633 Blatt 1* (2010): Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionsystemen – Grundlagen. Richtlinien-Entwurf des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI), 2010.

Dr.-Ing. Holger Pitsch

## **Simulation von Unikatprozessen — Herausforderung für kommerzielle Simulations- werkzeuge**

Dr.-Ing. Holger Pitsch  
INCONTROL Simulation Solutions  
Gustav-Stresemann-Ring 1, 65189 Wiesbaden

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	13
1 Simulationssoftware für Unikatprozesse .....	13
1.1 Der „Unikatprozess“ aus Sicht eines Softwareherstellers .....	14
1.2 Spezielle Anforderungen an kommerzielle Simulationswerkzeuge.....	16
2 Kommerzielle Simulations-Entwicklungsplattformen .....	18
3 Automatisierung bei der Modellgenerierung.....	24
Literatur .....	27

## Kurzfassung

Kommerzielle Simulationswerkzeuge unterliegen besonderen Anforderungen, wenn sie universell, d. h. nicht branchen- oder gar anwendungsspezifisch eingesetzt werden sollen. Insbesondere bei der Verwendung zur Simulation von Unikatprozessen ergeben sich allein aus den verschiedenen Sichtweisen auf den Begriff „Unikatprozess“ unterschiedliche Anforderungen. Der vorliegende Beitrag schafft daher zunächst mit der Definition von drei unterschiedlichen Interpretationsansätzen für den Begriff „Unikatprozess“ die Grundlage für eine Ableitung von Kernanforderungen an kommerzielle, universell einsetzbare Simulationswerkzeuge. Im Anschluss versucht der Beitrag am Beispiel des Simulationswerkzeugs Enterprise Dynamics einen groben Überblick über den Stand der Technik hinsichtlich der bezüglich der formulierten Anforderungen softwareseitig zur Verfügung gestellten Anwenderunterstützung zu geben, um abschließend einen kleinen Einblick in derzeit verfügbare und in der Entwicklung befindliche Lösungen für eine der größten aktuellen Herausforderungen für kommerzielle Simulationswerkzeuge, nämlich die automatische Modellgenerierung, zu liefern.

## 1 Simulationssoftware für Unikatprozesse

Im Bereich der Materialfluss- und Logistiksimulation, oder etwas allgemeiner im Bereich der Ablaufsimulation, werden zahlreiche verschiedene Simulationswerkzeuge eingesetzt. Ausgehend von „Spezialsimulatoren“ für spezifische Prozesse oder Maschinen bzw. Anlagen über branchenspezifische Lösungen bis hin zu universell einsetzbaren Simulations-Entwicklungsplattformen sind weit mehr als 50 nennenswerte, kommerziell verfügbare Simulationswerkzeuge von nahezu ebenso vielen verschiedenen Anbietern bekannt.

Während die Anforderungen hinsichtlich Funktionalität und abzubildender technischer Spezifikationen an Spezial- und branchenspezifische Simulatoren in den meisten Fällen weitgehend eindeutig definiert werden können, ist dies für die universell einsetzbaren Simulations-Entwicklungsplattformen weitaus schwieriger und oftmals nur unvollständig durchführbar. Resultieren die Anforderungen doch aus

den Prozessen, Systemen und Randbedingungen unterschiedlicher Branchen, vielfältigster Anwendungsbereiche und verschiedenster Einsatzzwecke. Die Hersteller der Simulationswerkzeuge sind daher gezwungen, bei der Entwicklung ihrer Werkzeuge zwischen detaillierter Funktionalität und universellem Einsatz abzuwählen. Tatsächlich universell einsetzbare Simulationswerkzeuge sind entsprechend nur wenige am Markt erhältlich.

Insbesondere die Simulation von Unikatprozessen, wie beispielsweise im Bauwesen, stellt dabei eine besondere Herausforderung für die Simulationswerkzeuge und deren Entwicklung dar. Diese ist zudem durch verschiedene Interpretationsmöglichkeiten des Begriffes „Unikatprozess“ besonders gekennzeichnet, woraus sich spezielle Anforderungen an universell einsetzbare, kommerzielle Simulationswerkzeuge ergeben.

### 1.1 Der „Unikatprozess“ aus Sicht eines Softwareherstellers

Zur Beurteilung der Eignung sowie zur Definition der Anforderungen im Rahmen der (Weiter-)Entwicklung eines Werkzeuges hinsichtlich der Simulation von Unikatprozessen im Allgemeinen oder in bestimmten Bereichen oder Branchen ist zunächst die Klärung der Bedeutung des Begriffes „Unikatprozess“ erforderlich. Je nach Bedeutung können unterschiedliche Funktionalitäten und/oder Eigenschaften eines Simulationswerkzeuges für die Simulation von Unikatprozessen erforderlich oder sinnvoll sein. Bild 1.1 stellt hierzu anhand eines beliebigen Fertigungsprozesses 3 Interpretationsansätze dar, bei denen das Ergebnisobjekt Z jeweils ein Unikat ist:

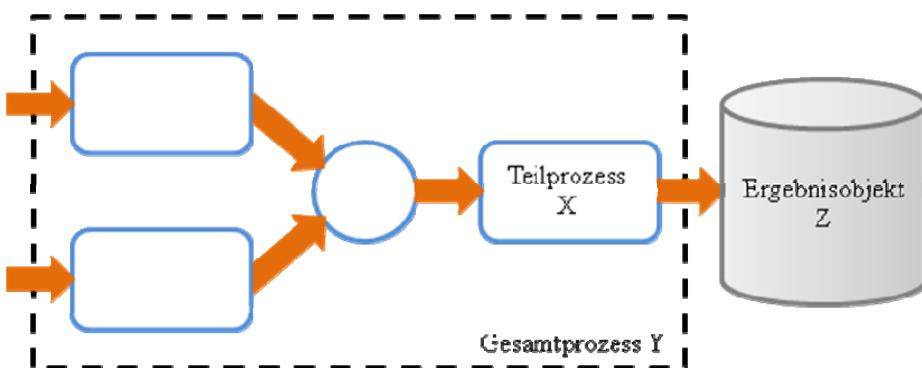


Bild 1.1: Beispiel für Interpretationsansätze zum Begriff „Unikatprozess“

**Bedeutung A:**

Ein individueller Prozess X bzw. Teilprozess X — beispielsweise im Rahmen der Fertigung eines Ergebnisobjektes Z — stellt ein Unikat dar.

Ein geeignetes Simulationswerkzeug muss entweder über ein spezifisches Simulationsobjekt zur Abbildung exakt des Teilprozesses X verfügen oder aber die Möglichkeit aufweisen, dass der Anwender selbst in der Lage ist, die charakteristischen Eigenschaften und Abläufe des Teilprozesses X in einem Simulationsmodell zu hinterlegen, was üblicherweise programmiertechnisch erfolgen muss. Im Falle eines bereits vorhandenen, spezifischen Simulationsobjektes entstammt dies meist einer individuell angepassten, anwendungs- oder branchenspezifischen Bausteinbibliothek, die dem Anwender herstellerseitig als Ergänzung zur Simulationsplattform meist als gemeinsame Entwicklung bereitgestellt wurde und überwiegend nicht universell einsetzbar ist.

**Bedeutung B:**

Der Gesamtprozess Y — beispielsweise im Rahmen der Fertigung eines Ergebnisobjektes Z — stellt ein Unikat dar.

Wie im Falle der Bedeutung A muss auch hier das Simulationswerkzeug entweder über ein bereits vordefiniertes Simulationsobjekt zur Abbildung des Gesamtprozesses Y verfügen oder dem Anwender die Möglichkeit bieten, die Eigenschaften und Abläufe des Gesamtprozesses Y, etwa durch Programmierung eines Simulationsobjektes, zu modellieren. Zur Abbildung durch einen vorhandenen Simulationsbaustein könnte beispielsweise wiederum eine individuell angepasste, anwendungs- oder branchenspezifische Bausteinbibliothek, die etwa gemeinsam mit dem Softwarehersteller entwickelt wurde, genutzt werden. Aufgrund der häufig deutlich geringeren Detailtiefe bei der Simulation eines Gesamtprozesses kann jedoch auch die Möglichkeit bestehen, einen Baustein aus einer allgemeinen, meist universell einsetzbaren Bibliothek einzusetzen und diesen durch eine entsprechende Parametrisierung den Eigenschaften des Gesamtprozesses Y anpassen zu können.

**Bedeutung C:**

Nur das Ergebnisobjekt Z stellt ein Unikat dar. Der Gesamtprozess Y sowie alle integrierten Teilprozesse X<sub>i</sub> können Standardprozesse sein, deren individuelle Anordnung oder individuellen Parameter jedoch zu einem Unikat führen.

Das Simulationswerkzeug muss zumindest über eine anwendungs- oder branchenspezifische Bausteinbibliothek verfügen, die vom Hersteller zusammen mit der Simulationsplattform oder als Ergänzung angeboten wird. Die einzelnen Simulationsbausteine müssen jedoch vom Anwender individuell parametrisiert werden können.

## 1.2 Spezielle Anforderungen an kommerzielle Simulationswerkzeuge

Der Begriff „Unikat“ steht grundsätzlich für Individualität oder Einzigartigkeit. Demzufolge bezeichnet ein „Unikatprozess“ unter Berücksichtigung der Bedeutungen A - C aus Kapitel 1.1 einen individuellen oder einzigartigen Teil- oder Gesamtprozess bzw. das Ergebnis einer individuellen oder einzigartigen Anordnung und Parametrisierung von Prozessen.

Bei der (Weiter-)Entwicklung von kommerziellen Simulationswerkzeugen steht genau diese Einzigartigkeit im Gegensatz zu einer universellen Verwendbarkeit der Software, wie sie von vielen Anwendern gefordert wird. So möchten etwa unabhängige Planungsingenieure die einmal erworbene Softwarelizenz selbstverständlich für verschiedene Kundenaufträge, also vielfach auch für grundlegend unterschiedliche Aufgabenstellungen, einsetzen. Aber auch Simulationsingenieure, die etwa hausinterne Produktionsabläufe simulieren, möchten eine Software weiterhin einsetzen können, wenn sich Produkte, Maschinen und Prozesse verändern.

Vielfach werden aber auch Forderungen in Richtung einer Standardisierung für Simulationsobjekte und -bibliotheken, mindestens aber für Parameter, Datenschnittstellen, Graphikformate und -darstellungsformen etc. genannt, während andererseits ein Höchstmaß an Flexibilität der Softwaresysteme und der angebote-

nen Simulationsbaustein-Bibliotheken für einen universellen Einsatz unbedingt notwendig ist.

Darüber hinaus steht den Anwendern der Simulationswerkzeuge meist nur ein sehr begrenzter Zeitraum zur Modellierung und Validierung zur Verfügung. Der Hauptteil eines Simulationsprojektes ist der eigentlichen Simulation und Analyse gegebenenfalls mehrerer Szenarien und eventuell weiterer Iterationsschritte im Rahmen einer simulationsgestützten Optimierung vorbehalten. Aus diesem Grund werden neben einer hohen Flexibilität der Werkzeuge auch eine einfache, möglichst intuitive Bedienung sowie eine Unterstützung durch das Simulationswerkzeug in allen Projektphasen, ausgehend von einer möglichen Bausteinanpassung, über die Modellierung, die Simulation und Analyse bis hin zur Visualisierung gefordert.

Die hier dargestellten Forderungen der Anwender sowie die unterschiedlichen Bedeutungen des Begriffes „Unikatprozess“ stellen die Herausforderung für kommerzielle, universell einsetzbare Simulationswerkzeuge dar und bilden die Grundlage der nachfolgend aufgeführten Kernanforderungen an diese Systeme für die Simulation von Unikatprozessen:

- umfangreiche, möglichst universelle, mindestens aber branchen- oder anwendungsspezifische Standard-Bibliotheken mit vordefinierten Simulationsbausteinen für Grundprozesse und Standardsysteme,
- vom Anwender flexibel modifizier- und erweiterbare Bausteine und Bibliotheken,
- intuitive Bedienschnittstellen,
- umfassende Simulations- bzw. Programmiersprache,
- Möglichkeit zur Programmierung von Logiken und Steuerungsbausteinen zur Koordination von Abläufen und Ressourcen,
- Schnittstellen für Datenim- und -export gemäß aktuellem Industriestandard, etwa zum Einlesen modellspezifischer Parameter für die Simulationsbausteine sowie zum Speichern / Bereitstellen von Simulationsergebnissen für die externe Auswertung oder Weiterverarbeitung,
- Graphikschnittstellen gemäß aktuellem Standard,

- Anwender-Unterstützungsfunktionen für die Modellierung, die Simulation, die Analyse und die Visualisierung,
- ....

Diese Kernanforderungen können je nach Anwendungsgebiet oder Branche, in der die Simulation zum Einsatz kommt, unterschiedlich ausgeprägt sein bzw. durch spezifische Anforderungen ergänzt werden. Spieckermann et. al. (2010) führt beispielsweise anhand von typischen Aufgabenstellungen und Merkmalen der Bauindustrie konkrete Anforderungen an die Elemente einer Bausteinbibliothek für die Simulation von Montage- und Logistikprozessen im Bauwesen an.

## 2 Kommerzielle Simulations-Entwicklungsplattformen

Die derzeit am Markt führenden, kommerziellen Simulations-Entwicklungsplattformen erfüllen bereits einen Großteil der im vorhergehenden Kapitel aufgeführten Kernanforderungen für die Simulation von Unikatprozessen und unterscheiden sich vielfach nur in der — allerdings teilweise sehr bedeutenden — Ausprägung einzelner Merkmale wie etwa dem Umfang der Standard-Bausteinbibliotheken, der Modifizierbarkeit der Bausteine oder der (im Standard) verfügbaren Zusatzfunktionen für die Unterstützung der Anwender.

Am Beispiel der Simulations-Entwicklungsplattform „Enterprise Dynamics“ (nachfolgend auch „ED“), die von unserem eigenen Haus, der Firma INCONTROL Simulation Solutions, hergestellt, vertrieben sowie in Kundenprojekten eingesetzt wird, sollen nachfolgend einige Eigenschaften und Funktionalitäten der aktuell führenden Systeme im Hinblick auf die zuvor genannten Anforderungen dargestellt werden.

### Simulationsbaustein-Bibliotheken

Möglichst umfangreiche Standard-Bibliotheken beinhalten Simulationsbausteine zur Simulation der Standardprozesse und -systeme in verschiedenen Anwendungsgebieten.

Bild 2.1 zeigt exemplarisch die ED LOGISTICS-Bibliothek, welche die Bausteine zur Simulation von Materialfluss- und Logistikprozessen, u. a. kategorisiert nach Funktionsgruppen, enthält.

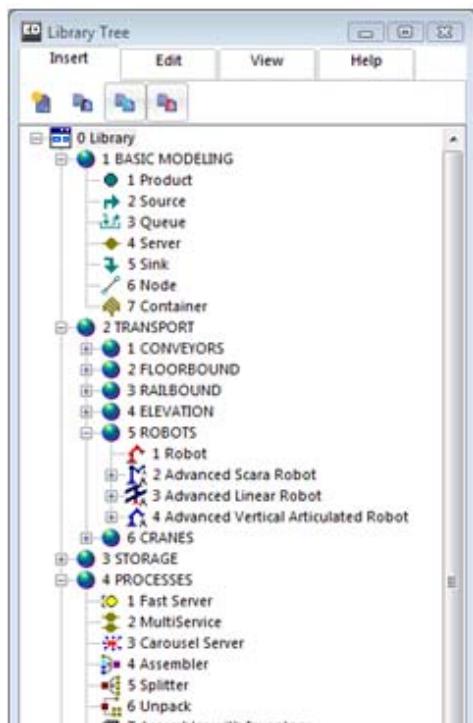


Bild 2.1: ED LOGISTICS-Simulationsbaustein-Bibliothek (Ausschnitt)

In der ED LOGISTICS-Bibliothek stehen dem Anwender mehr als 120 vordefinierte Simulationsbausteine — in ED auch als „Atome“ bezeichnet — zur Modellierung zur Verfügung, die z. B. per drag-&-drop aus der Bibliothek gezogen und direkt im Modell platziert werden können, vgl. Bild 2.2.

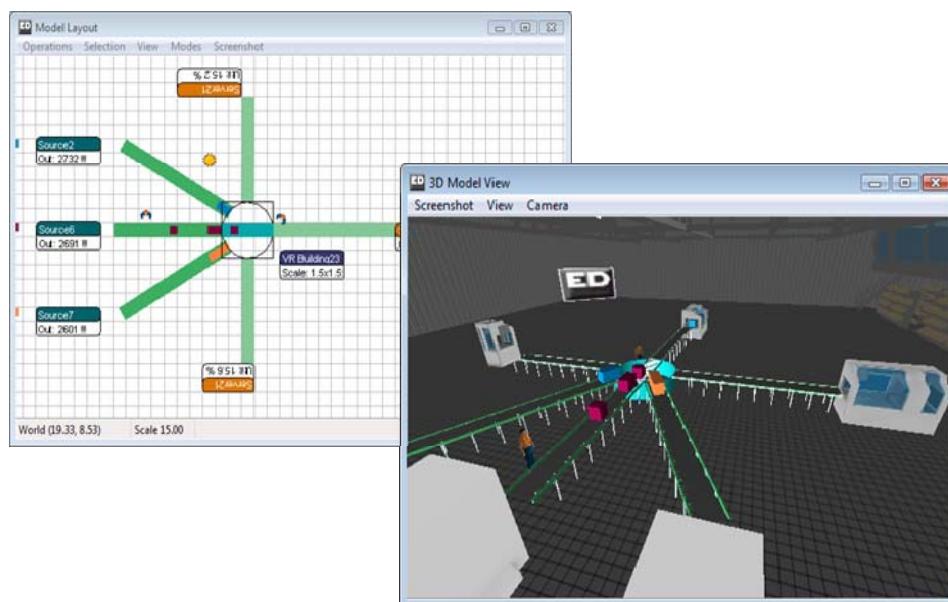


Bild 2.2: 2D-Modelllayout und 3D-Standard-Visualisierung in Enterprise Dynamics

## Simulationsbausteine

Die Bausteine ermöglichen unterschiedliche Detaillierungen bei der Modellierung. So eignet sich der Baustein „Server“ etwa sowohl zur Simulation eines Teilprozesses als auch zur Simulation eines Gesamtprozesses. Nur wenige Parameter wie die Prozessdauer (auch „Bearbeitungszeit“ oder „Cycletime“) oder eine mögliche Vorbereitungsdauer (auch „Rüstzeit“ oder „Setup-Time“) charakterisieren hier den zugrunde liegenden Prozess, vgl. linke Seite in Bild 2.3. Einen weitaus höheren Detailierungsgrad bietet hingegen der Baustein „Advanced Vertical Articulated Robot“. Über eine Vielzahl an Parametern bis hin zur Definition komplexer Bewegungsroutinen lässt sich dieser Baustein genauestens entsprechend einem realen Vorbild einstellen und ermöglicht so die Simulation eines detailliert spezifizierten Prozesses; vgl. Mitte und rechte Seite in Bild 2.3.

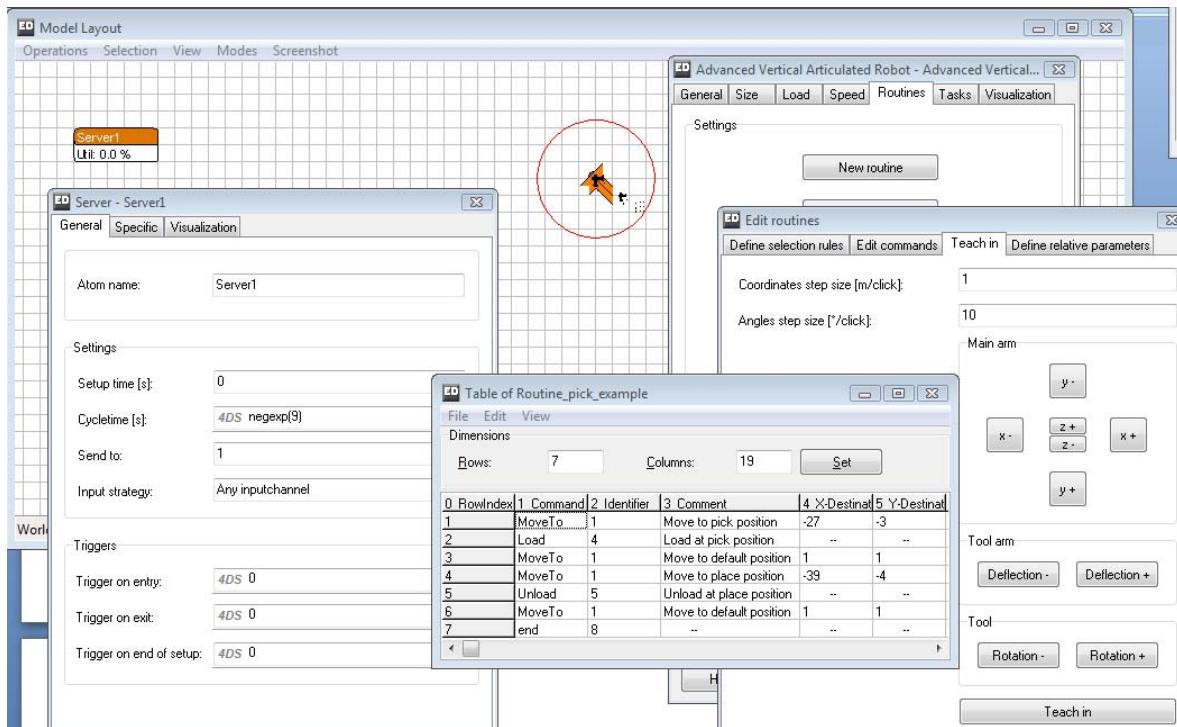


Bild 2.3: Beispiele für Simulationsbausteine mit niedrigem (links) und hohem (rechts) Detaillierungsgrad in ED anhand der entsprechenden Parameter-Eingabefenster

## Baustein-Editor

Die führenden Simulationswerkzeuge erlauben — ggf. in Abhängigkeit des eingesetzten Lizenztyps — dem Anwender die Modifikation der herstellerseitig bereitgestellten Simulationsbausteine und/oder die eigene Entwicklung neuer Simulations-

objekte. In Enterprise Dynamics liefert der so genannte „Atom-Editor“, vgl. Bild 2.4, diese Möglichkeiten.

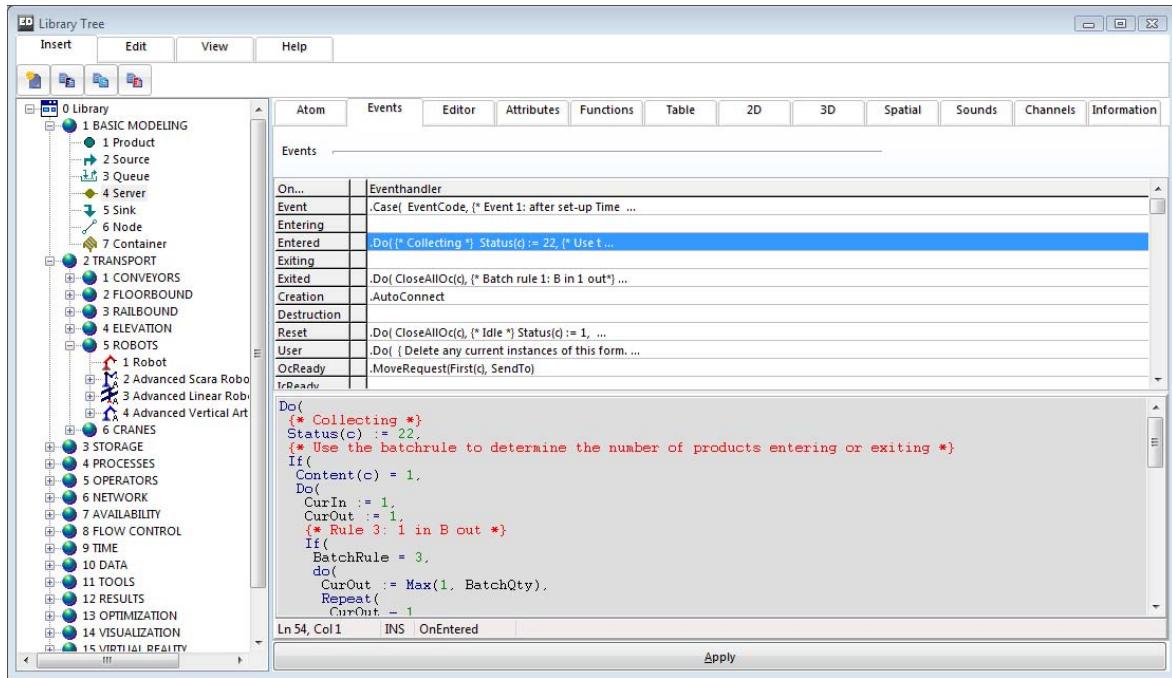


Bild 2.4: Enterprise Dynamics „Atom-Editor“

Das charakteristische Verhalten eines Simulationsbausteins wird bei ereignissteuerten Simulationswerkzeugen zu einem Großteil von den „Eventhandlern“ des Bausteins bestimmt. Der hier abgelegte Programmcode wird beim Eintreten der jeweiligen Ereignisse ausgeführt. Der „Atom-Editor“ bietet nun die Möglichkeit, den bereits vorhandenen Programmcode der vordefinierten Bausteine, etwa aus der ED LOGISTICS-Bausteinbibliothek, zu modifizieren und so dem spezifischen Verhalten des modellierten Systems, z. B. einer Maschine, detailliert anzupassen, sofern das vom Hersteller üblicherweise für allgemeine Objekte eines Typs hinterlegte Verhalten nicht ausreicht. Auf diese Weise lassen sich auch Eventhandler für zusätzliche Ereignisse definieren. Der „Atom-Editor“ bietet darüber hinaus zahlreiche weitere Möglichkeiten zur Modifikation bzw. Entwicklung von Simulationsbausteinen, so z. B. die Angabe von Attributen, die Definition von Funktionen als Erweiterung der dem Tool zugrunde liegenden Simulations- bzw. Programmiersprache, die Definition von bausteininternen Tabellen, die Festlegung der Darstellung des Bausteins in der 2D- und 3D-Visualisierung eines Simulationsmodells.

## GUI-Editor

Bei der Anpassung oder Neuentwicklung von Simulationsbausteinen ist es zudem erforderlich, auch die Eingabemasken (auch „Parameterfenster“ oder „GUIs“ (Graphical User Interfaces)) anpassen bzw. aufbauen zu können, über die der Anwender modell- und/oder szenario-abhängige Einstellungen am Simulationsbaustein vornehmen bzw. Daten eingeben kann. Diese Funktionalitäten stellt beispielsweise in Enterprise Dynamics der „GUI-Editor“ bereit, vgl. Bild 2.5. Mit dieser Werkzeugkomponente kann der Anwender die Baustein-Parameterfenster sowie das gesamte Front-End einer Simulationsapplikation designen sowie die Funktionen der einzelnen Ein- und Ausgabeelemente festlegen bzw. programmieren.

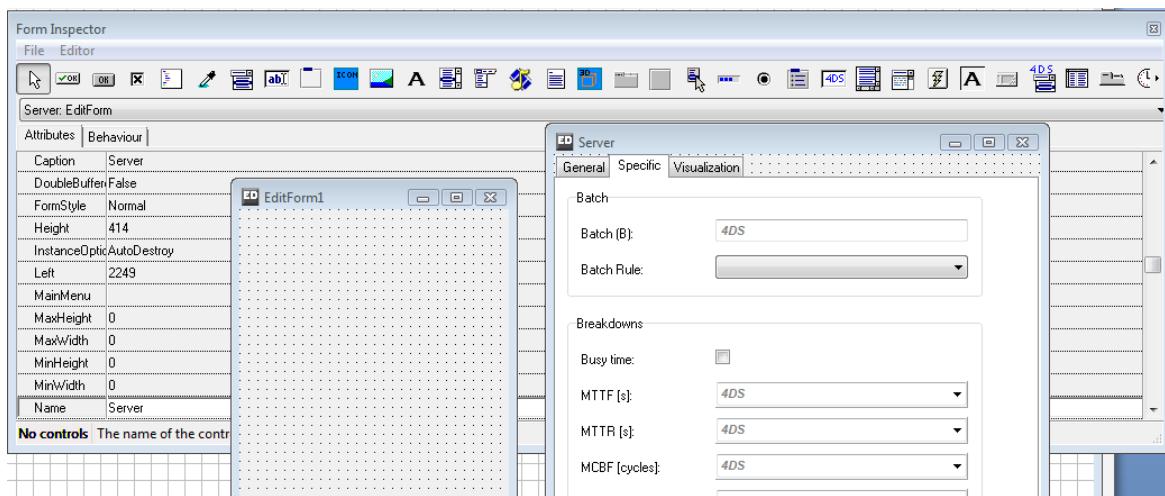


Bild 2.5: GUI Editor-Fenster in Enterprise Dynamics

## Verwaltung und Anpassung von graphischen Objekten

Auch für die visuelle Darstellung der Bausteine bieten heute Simulationswerkzeuge Komponenten, die eine Verwaltung verschiedener graphischer Objekte für die 2D- und 3D-Visualisierung gestatten oder deren Anpassung oder gar Entwicklung ermöglichen. ED beispielsweise bietet einen „Resources-Manager“ für die Verwaltung und Auswahl zuvor importierter 2D- und 3D-Objekte sowie Texturen an, der auch eine Möglichkeit zur Anpassung der Skalierung, Translation und Rotation der Objekte liefert. Ferner sind eine Manipulation der Texturen sowie die Erstellung visueller Effekte für die Darstellung von Materialoberflächen möglich. Dennoch sind diese Funktionalitäten nicht mit den Features von Graphik- oder CAD-Werkzeugen vergleichbar. Der Schwerpunkt liegt hier eindeutig auf der geringfügigen Anpassung, nicht auf der Schaffung von Graphikobjekten.

## Modellierunterstützung

Toolspezifische Eigenschaften und Funktionalitäten bieten dem Anwender weitere Unterstützung bei der Modellierung. Hier gibt es vielfältige Möglichkeiten, angefangen von einer Skalierung im Modellier-/Layoutbereich des Tools, wodurch eine maßstäbliche Modellierung gewährleistet wird, bis hin zu verschiedenen Funktionalitäten, wie sie von CAD-Werkzeugen bekannt sind. Als Beispiel sei hier nur eine Layer-Verwaltung genannt, die es ermöglicht, verschiedene Elemente eines Simulationsmodells auf unterschiedlichen Layern zu platzieren, so dass diese etwa funktional zusammengefasst und/oder teilweise ausgeblendet werden können. Die Nutzung von Layern ist insbesondere bei der Modellierung dreidimensionaler Anlagen bzw. Systeme oder bei der Simulation von Bauprozessen im Hochbau hilfreich.

## Schnittstellen

Von besonderer Bedeutung sind zudem die Schnittstellen, welche ein Simulationswerkzeug zur Verfügung stellt. Neben den bereits angesprochenen Bedien- und Graphikschnittstellen sind dies insbesondere Datenschnittstellen zu Datenbanken und Tabellenprogrammen, die etwa vor einem Simulationslauf den Import von beispielsweise szenario- oder auftragsspezifischen Modellparametern und Eingangsdaten gestatten sowie während und/oder nach einem Simulationslauf das (zusätzliche) Sichern und Bereitstellen von (Zwischen-)Ergebnissen für eine externe Auswertung und Weiterverarbeitung ermöglichen. Nach heutigem Standard verfügen Simulationswerkzeuge mindestens über DDE- und ODBC-Schnittstellen (DDE = Dynamic Data Exchange, ODBC = Open Database Connectivity) für den Datenaustausch. Noch etwas seltener ist die auch bei Enterprise Dynamics verfügbare ADO-Schnittstelle (ADO = ActiveX Data Objects), die einen schnelleren Austausch größerer Datenmengen gestattet.

Neben den reinen Datenschnittstellen verfügen die Simulationswerkzeuge zudem häufig über Schnittstellen, die eine Steuerung von bzw. durch externe System sowie einen Datenaustausch mit diesen ermöglichen. Erwähnenswert sind hier beispielsweise eine TCP/IP-, eine OPC- sowie eine PROFIBUS-Schnittstelle (TCP/IP = Transmission Control Protocol / Internet Protocol, OPC = OLE for Process Control, PROFIBUS = Process Field Bus). Die Verfügbarkeit dieser Schnittstellen spielt insbesondere beim Einsatz der Simulationswerkzeuge in der Emulation eine

Rolle. Hier werden die Simulationswerkzeuge mit realen Steuerungssystemen, z. B. SPS, gekoppelt, um deren Steuerungsprozeduren am Modell, welches die eigentlich zu steuernde Hardware wie etwa automatische Regalsysteme nachbildet, zu testen.

Neben den hier aufgeführten Standard-Schnittstellen kommen sehr häufig anwendungs- und kundenspezifische Schnittstellen zum Einsatz.

### **3 Automatisierung bei der Modellgenerierung**

Unterstützungsfunktionalitäten für die Modellbildung sind heute in verschiedensten Ausprägungen standardmäßig in den Werkzeugen enthalten, zählen doch bereits die toolseitige Bereitstellung von Simulationsbausteinen für komplexe Systeme und Prozesse oder etwa die Möglichkeit zur Definition von wiederholt einsetzbaren Teilmodellen im weitesten Sinne dazu. Eine tatsächliche Unterstützung des Anwenders bei der Modellgenerierung im Hinblick auf eine Aufwandsreduzierung entsteht aber eigentlich erst durch eine automatische Modellerstellung. Verschiedene Ansätze hierzu, z. B. auf Basis von CAD-Dateien, Vorgangsmodellen oder Arbeitsplänen, werden bereits seit Jahren im Umfeld der Digitalen Fabrik entwickelt und vorgestellt. Spieckermann et. al. (2010) verweist hier beispielsweise auf Publikationen von Lange et. al. (2008) oder Lorenz (1995). Dennoch haben diese Ansätze bislang kaum den Weg in kommerzielle, universell einsatzbare Simulationswerkzeuge gefunden, sondern bestehen teils als Insellösungen in spezifischen Anwendungsgebieten. Gründe für den nicht universellen Einsatz sind in erster Linie die Qualität der Daten, auf deren Basis die automatische Modellerstellung erfolgen soll, und die damit verbundenen Schwierigkeiten der werkzeugseitigen Datenaufbereitung sowie der Ableitung und Abbildung der Prozessabhängigkeiten. Eine detaillierte und damit sehr zeitaufwändige Prüfung derart automatisiert erstellter Modelle durch den Anwender ist daher unerlässlich.

Für Enterprise Dynamics existiert bereits seit einigen Jahren eine Zusatzkomponente am Markt, die es ermöglicht, im dxf-Format vorliegende CAD-Layouts automatisch in ein lauffähiges Simulationsmodell zu überführen. Der so genannte „CAD Import Wizard“ analysiert eine dxf-Datei auf eindeutig definierte und benannte Objekte und platziert dann die über zuvor erstellte Konvertierungsroutinen zu-

geordneten Pendants aus einer ED Bausteinbibliothek an die aus der CAD-Datei bekannten Positionen im Modell und verknüpft diese miteinander.

Dieses Verfahren wird im Hause INCONTROL beispielsweise zur Unterstützung bei der Erstellung von Modellen für die Personenstromsimulation eingesetzt. Aus den CAD-Dateien bestehender oder geplanter Gebäude und Infrastrukturen lassen sich so Wege, Aufenthalts- und Funktionsbereiche, aber auch Verbindungs-elemente wie Treppen und Fahrstühle ermitteln und in ein Grundmodell auf Basis der ED PLATO-Bausteinbibliothek überführen (PLATO = Pedestrian Logistics and Analysis Tool), s. Beispiel für ein Modell zur Simulation von Personenströmen in einem Fußballstadion in Bild 2.6. Hinsichtlich Positionierung und Dimensionierung der Elemente entsteht so eine deutliche Aufwandsreduzierung bei der Modellgenerierung. Das Problem beim Einsatz dieses Verfahrens stellen jedoch weiterhin nicht eindeutig oder fehlerhaft definierte Elemente und Verbindungen in einer CAD-Datei dar.



Bild 2.6: Enterprise Dynamics Simulationsmodell für die Simulation von Personenströmen in einem Fußballstadion; links: 3D Visualisierung des Simulationsmodells

Gemeinsam mit der Universität Utrecht in den Niederlanden arbeitet INCONTROL derzeit an der Implementierung eines Verfahrens in ED, welches die automatische Modellgenerierung auch ohne vorhandenes CAD-Layout ermöglicht. Geraerts (2010) stellt das so genannte ECM-Verfahren (ECM = Explicit Corridor Map) vor,

das insbesondere für die Modellerstellung im Bereich der Personenstromsimulation, d. h. beispielsweise für die Infrastrukturplanung und damit auch für das Bauwesen, von großer Bedeutung ist. Ausgehend von einer graphischen Darstellung oder von einem Foto eines zu untersuchenden Gebietes oder Gebäudes (s. a) in Bild 2.7) leitet dieses Verfahren zunächst einen „Abdruck“ ab, der — allgemein formuliert — Hindernisse und prinzipiell begehbarer Bereiche („Korridore“) in dem zu untersuchenden Gebiet beinhaltet bzw. dieses auf diese beiden Gruppen reduziert. In einem weiteren Schritt wird in die Korridore ein Netzwerk aus Pfaden gelegt (s. b) in Bild 2.7), aus denen schließlich der jeweils kürzeste begehbarer Weg, ggf. unter Berücksichtigung weiterer Randbedingungen, zwischen zwei Punkten bestimmt werden kann (s. c) in Bild 2.7).

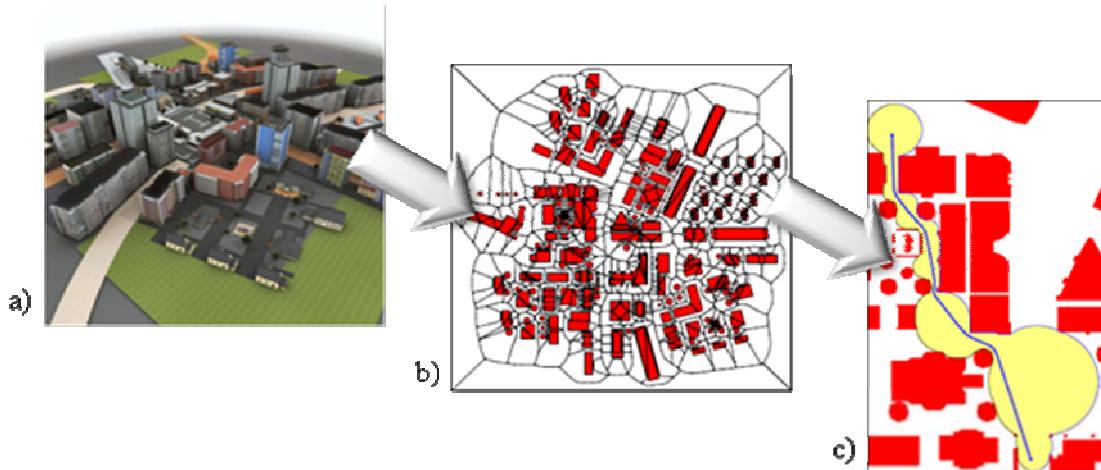


Bild 2.7: Ausschnitte zu den Phasen des ECM-Verfahrens; Quelle der Teilbilder: Geraerts (2010)

Durch die automatisierte Detektion von möglichen begehbareren Pfaden in einem Gebiet oder Gebäude kann abschließend unter Verwendung einer geeigneten Bausteinbibliothek, wie etwa der ED PLATO-Bibliothek im Bereich der Personenstromsimulation, auch automatisch ein Simulationsmodell generiert werden. Der Anwender hat im Anschluss lediglich noch die Parametrisierung sowie die Definition aufgabenspezifischer Logiken vorzunehmen.

## Literatur

- Geraerts, R. (2010): Planning short paths with clearance using explicit corridors.*  
In: IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2010),  
Anchorage, Alaska, Mai 2010, S. 1997 - 2004.
- INCONTROL Simulation Solutions:* [www.IncontrolSim.com](http://www.IncontrolSim.com), Homepage, 2011.
- INCONTROL Simulation Solutions:* Tutorial ED 8. Utrecht, die Niederlande, 2010.
- Lange, J.; Schmidt, K.; Rose, O. (2008): Automated Generation and Parameterization of Throughput Models for Semiconductor Tools.* In: Mason, S.; Hill, R.; Mönch, L.; Rose, O.; Jefferson, T.; Fowler, J. (Hrsg.): Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference. Miami, S. 2335-2340.
- Lorenz, P.; Schulze, T. (1995): Layout Based Model Generation.* In: Alexopolus, C.; Kang, K. (Hrsg.): Proceeding of the 1995 Winter Simulation Conference. ACM Press, New York, S. 728-735.
- Spieckermann, S.; Habenicht, I.; Zeller, G.; Zimmermann, J. (2010): Simulationen zur Prüfung von Montage- und Logistikabläufen.* In: Scherer, R.; Schapke, S.-E. (Hrsg.): MEFISTO: Management - Führung - Information - Simulation im Bauwesen. Tagungsband 1. Mefisto Kongress, Dresden, 21. Oktober 2010, S. 131 - 146.



Prof. Dr.-Ing. Bernd Kochendörfer,  
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Huhnt,  
Dipl.-Ing. Lydia Pabst,  
Dipl.-Ing. Sven Richter

## **Teilprozesse als Grundlage zur Modellierung der Bauplanung**

FG Bauwirtschaft und Baubetrieb  
Prof. Dr.-Ing. Bernd Kochendörfer  
Dipl.-Ing. Lydia Pabst;  
FG Bauinformatik  
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Huhnt  
Dipl.-Ing. Sven Richter  
Technische Universität Berlin  
Institut für Bauingenieurwesen  
Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	31
1 Einführung.....	31
2 Modellierungskonzept .....	33
3 Modellierung von Teilprozessen.....	35
3.1 Dokumente .....	37
3.2 Projektbeteiligte .....	38
3.3 Teilprozesse .....	40
4 Nutzung von Teilprozessen.....	42
5 Zusammenfassung und Ausblick .....	43
Literatur.....	44

## Kurzfassung

Die Frage, wie eine detaillierte Prozessbeschreibung der Bauplanung mit vertretbarem Aufwand so erstellt werden kann, dass der Prozess in seiner Komplexität richtig dargestellt ist, ist eine zentrale Frage im Management umfangreicher Bauprojekte. Es existieren zahlreiche Beschreibungen wie beispielsweise die Prozessbeschreibungen in der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (*HOAI* 2009). Diese Beschreibungen sind jedoch ausgerichtet auf einen Überblick. Entsprechend erfassen sie den individuellen Planungsprozess nicht in der erforderlichen Detaillierung. Der hier vorliegende Beitrag basiert auf der Überlegung, Teilprozesse der Bauplanung zu entwickeln und aus diesen Teilprozessen, die projektunabhängig spezifiziert werden, den individuellen Planungsprozess zusammenzubauen. Hierbei wird von einer Modellierungsmethodik Gebrauch gemacht, die den Vorgang der Spezifikation zweckmäßig unterstützt. Kern der hier vorliegenden Veröffentlichung sind die Teilprozesse der Bauplanung, die fachlich zu entwickeln sind und projektunabhängig Teilaufgaben beschreiben. Im vorliegenden Beitrag wird an Beispielen aufgezeigt, wie derartige Teilprozesse entwickelt werden können und wie sie nach fachlichen Kriterien strukturiert werden können.

## 1 Einführung

Planungsprozesse sind dadurch gekennzeichnet, dass Spezialisten verschiedener Fachrichtungen Planungsunterlagen bearbeiten. Die Bearbeitung der Unterlagen erfolgt dabei in der Regel nicht in einem Schritt, d.h. Inhalte werden teilweise überarbeitet, so dass die Inhalte in Planungsunterlagen im Verlauf der Bearbeitung an Vollständigkeit und Qualität zunehmen. Basierend auf einem abgestimmten Konzept werden – teilweise auch örtlich voneinander getrennt – Lösungen für Teilespekte bearbeitet. Hierbei werden von den einzelnen Planungsbeteiligten auch Annahmen getroffen, so dass in gemeinsamen Abstimmungsprozessen ein gültiger Planungsstand sichergestellt werden muss. Hierbei werden Planungsunterlagen überarbeitet, angepasst und erneut abgestimmt. Es entsteht eine detaillierte Beschreibung des jeweiligen Bauwerks, verteilt auf teilweise mehr als 10.000 Planungsdokumente, wobei Informationen, die in unterschiedlichen Unterlagen abgebildet sind, aufeinander aufbauen und voneinander abhängen.

Das Vordenken, also die Vorgabe, wie ein Planungsprozess durchgeführt werden kann, kann nicht als allumfassendes Modell entwickelt werden. Spezifische Eigenschaften des jeweiligen Planungsprozesses führen dazu, dass diese Prozesse individuell sind. Ungeachtet dieser Herausforderung ist es notwendig, den jeweiligen Prozess so vorzudenken, dass ein koordiniertes und abgestimmtes Arbeiten der Beteiligten möglich ist. Jedem Beteiligten müssen die Informationen in der notwendigen Detaillierung und Qualität vorliegen, die von ihm für die Bearbeitung der jeweiligen Teilaufgabe benötigt werden. Hierbei sind drei Aspekte von zentraler Bedeutung (vgl. Scheifele S. 11 ff 1991):

**Vollständigkeit:** Es muss sichergestellt sein, dass alle notwendigen Aktivitäten, die während eines Planungsprozesses durchgeführt werden müssen, erfasst werden.

**Korrektheit:** Alle Informationen, die für die Durchführung einer Planungsaufgabe erforderlich sind, müssen auch vorliegen.

**Konsistenz:** Die Ergebnisse einer jeden Planungsaufgabe werden in Planungsunterlagen festgehalten. Es muss sichergestellt sein, dass die Vorgaben für die durchzuführenden Planungsaufgaben konsistent sind zu den Vorgaben, was an Planungsunterlagen wann mit welchen Informationen und in welcher Qualität vorzuliegen hat.

In der Praxis werden heute die erforderlichen Vorgaben von erfahrenen Personen erarbeitet. Dies erfolgt dabei auf der Grundlage des Wissens der Beteiligten. Eine methodische Unterstützung, durch deren Nutzung beispielsweise die Vollständigkeit oder die Korrektheit sichergestellt sind, ist heute nicht verfügbar.

Kerngedanke des hier vorliegenden Beitrags ist es, eine methodische Unterstützung dergestalt zu entwickeln, dass Sollvorgaben für Planungsprozesse aus spezifischen Eingangsdaten so abgeleitet werden, dass die Vollständigkeit, die Korrektheit und die Konsistenz sichergestellt sind (Huhnt 2009). Dieses Vorgehen basiert darauf, dass Beschreibungen von Teilprozessen, also den jeweiligen Aufgaben, die zur Bearbeitung eines einzelnen Planungsdokumentes erforderlich sind, vorliegen. Wie derartige Teilprozesse erstellt werden können, unter welchen fachlichen Kriterien sie zu strukturieren sind und welche Detaillierungsstufen erforderlich sind, ist Gegenstand des vorliegenden Beitrags. Zunächst wird ein Mo-

dellierungskonzept in Abschnitt 2 kurz vorgestellt, das den Anforderungen der Bauplanung im Hinblick auf die Entwicklung von Sollvorgaben genügt. In Abschnitt 3 wird die Modellierung von Teilprozessen vorgestellt. Diese Teilprozesse werden als Vorlagen betrachtet, auf deren Grundlage ein Planungsprozess modelliert wird. Die Modellierung eines Planungsprozesses wird in Abschnitt 4 erläutert. In Abschnitt 5 sind Erkenntnisse zusammengefasst. Ein Ausblick auf anstehende Untersuchungen wird gegeben, um die hier vorgestellten Ergebnisse für reale Projekte nutzbar machen zu können.

## 2 Modellierungskonzept

Das Modellierungskonzept beruht darauf, eine Planungsaufgabe durch drei Informationen zu beschreiben: eine Aktivität, die durchzuführen ist, ein Dokument, in dem das Ergebnis der Aktivität festgehalten ist, und ein Zustand, den das Dokument am Ende der Aktivität erreicht haben soll.

Damit liegt dem Modellierungskonzept zu Grunde, dass Dokumente in Planungsprozessen verschiedene Zustände durchlaufen müssen, bis ihr Inhalt die erforderliche Qualität erreicht hat. Die Zustände beschreiben dabei, was an Inhalten und Qualitäten im jeweiligen Dokument vorzuliegen hat.

Auf der Grundlage dieser Modellierung werden auch die Voraussetzungen beschrieben, die für die Durchführung einer Planungsaufgabe erfüllt sein müssen: Für eine Aktivität an einem Dokument, das im Ergebnis dazu führt, dass das Dokument eine bestimmten Zustand angenommen hat, müssen andere Dokumente in bestimmten Zuständen vorliegen. Dies ist in Bild 1 gezeigt.

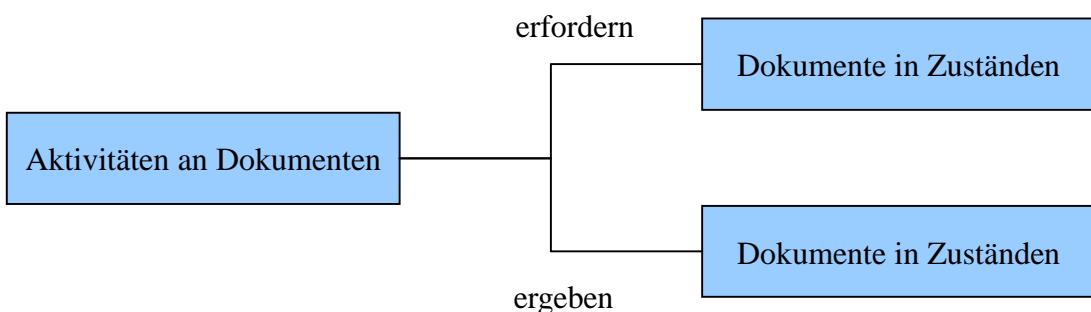


Bild 1: Aktivitäten mit Voraussetzung und Ergebnis

Auf der Grundlage der projektunabhängig spezifizierten Teilprozessvorlagen für Planungsdokumente, in denen der Bearbeitungsprozess für das entsprechende Dokument beschrieben ist, erfordert das Modellierungskonzept für die Erstellung einer Sollvorgabe für einen Planungsprozess einen Ablauf, der in Bild 2 gezeigt ist.

Um Sollvorgaben für den Ablauf einer Bauplanung entwickeln zu können, ist im ersten Schritt eine Gesamtliste aller während des Planungsprozesses benötigten, zu erstellenden oder zu überarbeitenden Dokumente zusammenzustellen. Mit Hilfe der Vorlagenbasis werden allen Dokumenten entsprechende Teilprozessvorlagen zugeordnet. Da in den Teilprozessvorlagen die einzelnen Aktivitäten beschrieben sind, wird die vollständige Liste aller Planungsaktivitäten des Planungsprozesses errechnet.

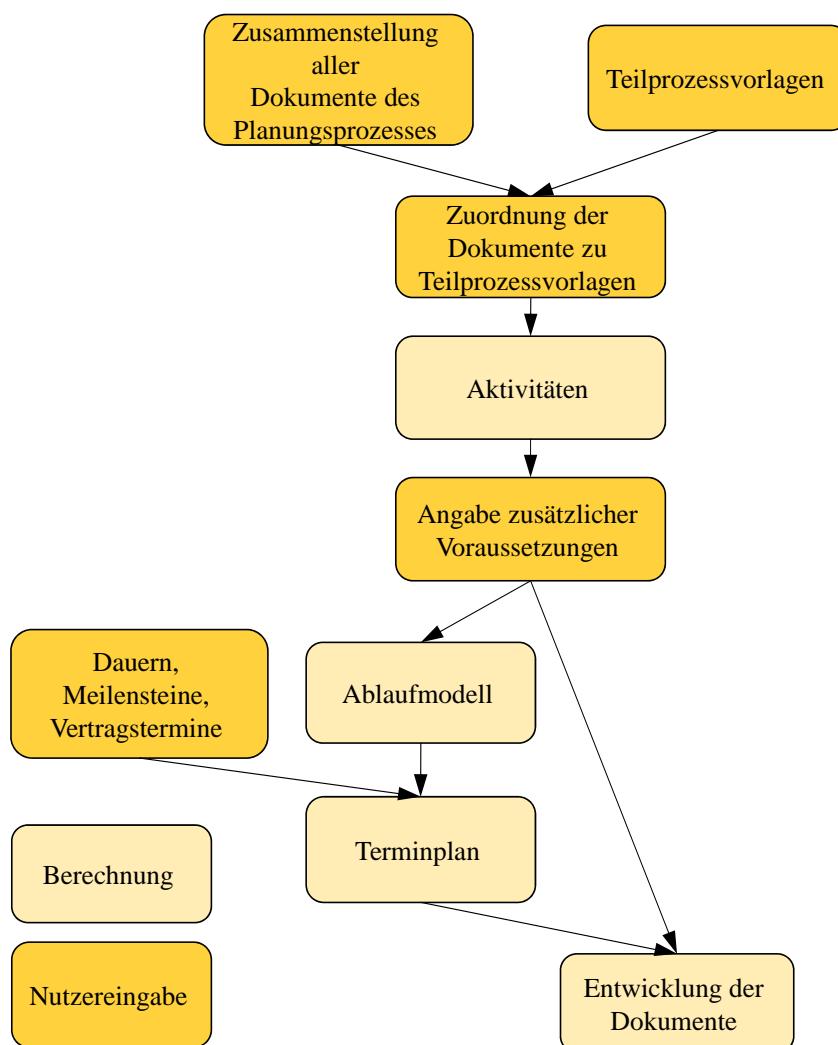


Bild 2: Gesamtbild des Modellierungskonzepts

Sind – wie in Bild 1 gezeigt – für Aktivitäten andere Dokumente in bestimmten Zuständen als Voraussetzung für den Beginn einer Aktivität notwendig, müssen diese als Nutzereingabe vollständig angegeben werden. Aus diesen Angaben wird ein Ablauf für den gesamten Planungsprozess errechnet, in welchem jede Aktivität zum frühest möglichen Zeitpunkt durchgeführt wird.

Mit Hilfe zusätzlicher Angaben, wie Dauern der Aktivitäten, zusätzlicher Abhängigkeiten wie z.B. ressourcenbedingter Einschränkungen und der Angabe von Vertragsterminen kann aus diesem Ablaufmodell ein Terminplan generiert werden. Die Algorithmen, auf deren Grundlage alle Berechnungen erfolgen, sind in (*Huhnt 2009*) zusammengestellt.

Das beschriebene Vorgehen erfordert die Verfügbarkeit von Vorlagen für die Bearbeitung einzelner Planungsdokumente. Wie derartige Vorlagen erarbeitet werden können, wird in Abschnitt 3 behandelt.

### 3 Modellierung von Teilprozessen

In Deutschland erfolgt die Planung bis zur ausführungsreifen Qualität in den Schritten der in der HOAI geregelten Leistungsphasen. Ergebnis jeder Leistungsphase (LP) ist eine entsprechende Dokumentation in Form von Dokumenten wie Plänen, textlichen Beschreibungen, Berechnungen, etc.

In der HOAI werden die meisten Fachbereiche, die üblicherweise an einer Bauprojektplanung mitwirken, mit ihren wesentlichen Planungsaufgaben abgebildet. Die Fachbereiche werden dort unter der Begrifflichkeit „Leistungsbild“ geführt, wie beispielsweise das Leistungsbild Gebäude und raumbildende Ausbauten (Architekt), das Leistungsbild Technische Gebäudeausrüstung (TGA) und das Leistungsbild Tragwerk (vgl. *HOAI 2009*).

Die hier vorgestellte Modellierung verfolgt einen anderen Ansatz, bei dem zunächst die jeweiligen Planungsunterlagen in den Mittelpunkt der Betrachtungen gestellt werden. Ausgehend von diesen Unterlagen werden die Aktivitäten festgelegt, die zur Bearbeitung dieser Unterlagen notwendig sind. Hierbei wird das Ergebnis eines jeden Bearbeitungsschrittes als Zustand beschrieben. Entsprechend folgt auf jede Aktivität ein Zustand. Erst verschiedene Aktivitäten, die zur Bearbeitung einer Planungsunterlage erforderlich sind, und die dabei erreichten Zustände

dieser Planungsunterlage ergeben das, was traditionell als Planungsleistung bezeichnet wird.

In der vorliegenden Modellierungsmethodik wird die Zusammenfassung von Aktivitäten und Zuständen mit der zugehörigen Planungsunterlage als Teilprozess bezeichnet. Diese Teilprozesse können projektunabhängig als Vorlagen modelliert werden. Da ihre Erarbeitung von der jeweiligen Planungsunterlage ausgeht, müssen zunächst diese Unterlagen, die Planungsdokumente, benannt werden. Erst dann werden die Aktivitäten und Zustände benannt, die im letzten Schritt zusammen mit dem Dokument den Teilprozess ergeben.

Für die Modellierung ist es erforderlich, die jeweiligen Informationen so zu strukturieren, dass ihre Erstellung und Verwendung zweckmäßig erfolgen kann. Es ist somit für Dokumente, Aktivitäten und Zustände sowie Teilprozesse eine Struktur zu wählen (siehe Bild 3). Hierbei ist es trotz der andersartigen Herangehensweise zweckmäßig, vorhandene Strukturierungen – soweit möglich – zu nutzen.

Die folgenden Abschnitte sind diesen Fragestellungen gewidmet. Zunächst werden Dokumente und ihre Strukturierungsmöglichkeit betrachtet, dann Aktivitäten und Zustände und im letzten Abschnitt Teilprozesse.

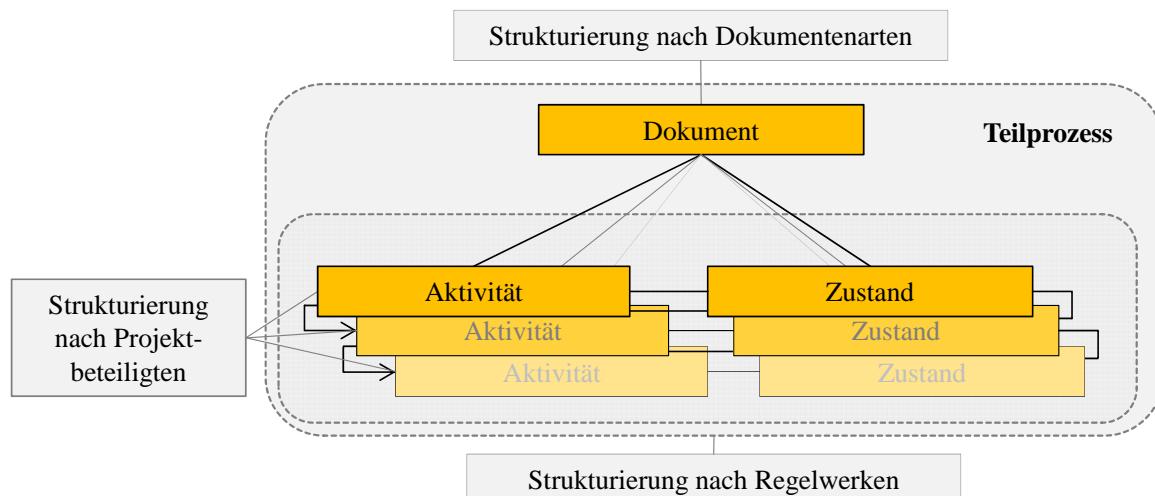


Bild 3: Strukturierung von Teilprozessen und ihren Bestandteilen

### 3.1 Dokumente

In Planungsdokumenten werden die Ergebnisse der jeweiligen Planungsaufgaben dokumentiert. Hierbei werden Planungsdokumente teilweise auch überarbeitet, so dass Planungszustände den entsprechenden Reifegrad eines Dokumentes beschreiben.

Dokumente können in Dokumentarten eingeteilt werden wie Pläne, Berechnungen, Beschreibungen, Leistungsverzeichnisse, Angebote. Bei der Anwendung in Projekten können weitere Strukturierungen wie Lage- oder Bauteilangaben die konkreten Dokumente eines Projektes strukturieren. Im Zusammenhang mit der Modellierung der Vorlagen spielen diese projektspezifischen Strukturierungen jedoch keine Rolle, so dass als projektunabhängige Strukturierung die Dokumentenart gewählt wird.

Es hat sich herausgestellt, dass für die Anwendung eine Dokumentenbetrachtung in Ebenen vorgenommen werden sollte (*vgl. Scheifele 1991 A.52*). Die größte Einteilung ergibt sich aus der Art des jeweiligen Dokumentes. In einer nächst feineren Betrachtung können die jeweiligen Leistungsbilder und -phasen gem. HOAI gewählt werden. Die feinste Detaillierungsstufe enthält weitere inhaltliche Strukturierungskriterien. Dies ist in Bild 4 auszugsweise gezeigt. Auf die Detaillierungsansprüche unterschiedlicher Anwendungsfälle, wie in der Terminplanung bei einem Generalterminplan, Steuerungsterminplan oder Detailterminplan, kann so eingegangen werden (*vgl. Ahrens, Bastian. und Muchowski S.162 ff (2010)*).

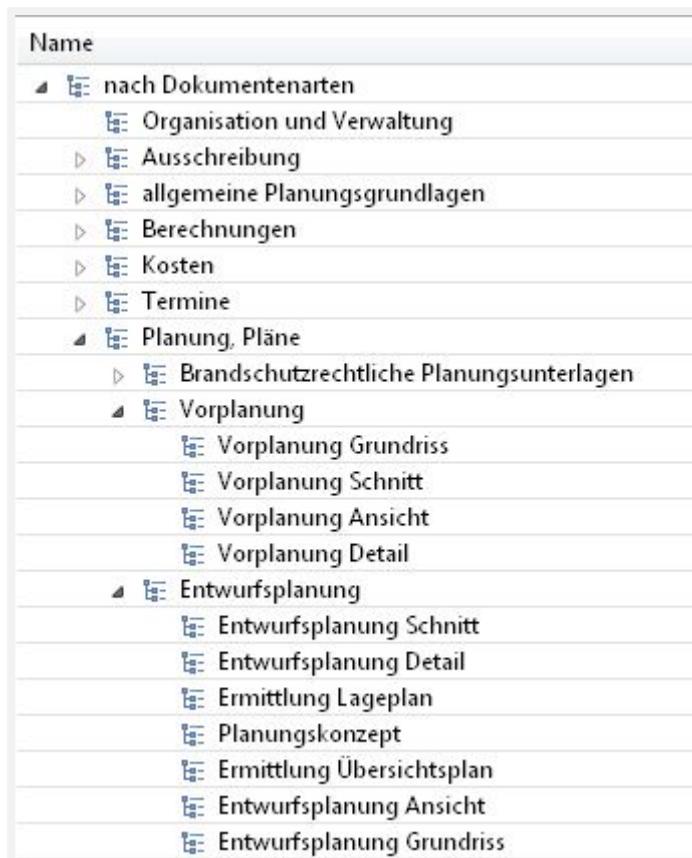


Bild 4: Strukturierung nach Dokumentenarten

### 3.2 Projektbeteiligte

Mit der steigender Komplexität der heutigen Bauprojekte erfährt die koordinierte Zusammenarbeit der Projektbeteiligten unterschiedlicher Fachbereiche, Aufgaben und Zuständigkeiten einen zunehmenden Stellenwert. Die Zahl der Projektbeteiligten, der zu bearbeitenden Aufgaben und die damit steigende Zahl der Prozessschritte erfordern eine klare Benennung der Beteiligten und eine Zuweisung dieser zu allen erforderlichen Bearbeitungsschritten.



Bild 5: Strukturierung nach Projektbeteiligten

Projektbeteiligte werden als Akteure angesehen, die Aktivitäten an Dokumenten ausführen (vgl. *Berkhahn et al. 2007*). Das Ergebnis der Aktivität stellt eine Veränderung des Zustandes des Dokumentes dar. An einem Dokument können dabei verschiedene Projektbeteiligte mit den ihnen zugeordneten Aktivitäten arbeiten. Da jede Aktivität in einem Zustand endet, werden Aktivitäts-Zustandspaare gebildet. Diese werden nach den Projektbeteiligten strukturiert (Bild 5).

Der Personenbezug zu Aktivitäten und Zuständen, beispielhaft in Bild 6 gezeigt, weist die Verantwortlichkeit aus und dient dem strukturierten Zugriff auf Aktivitäten und Zustände.

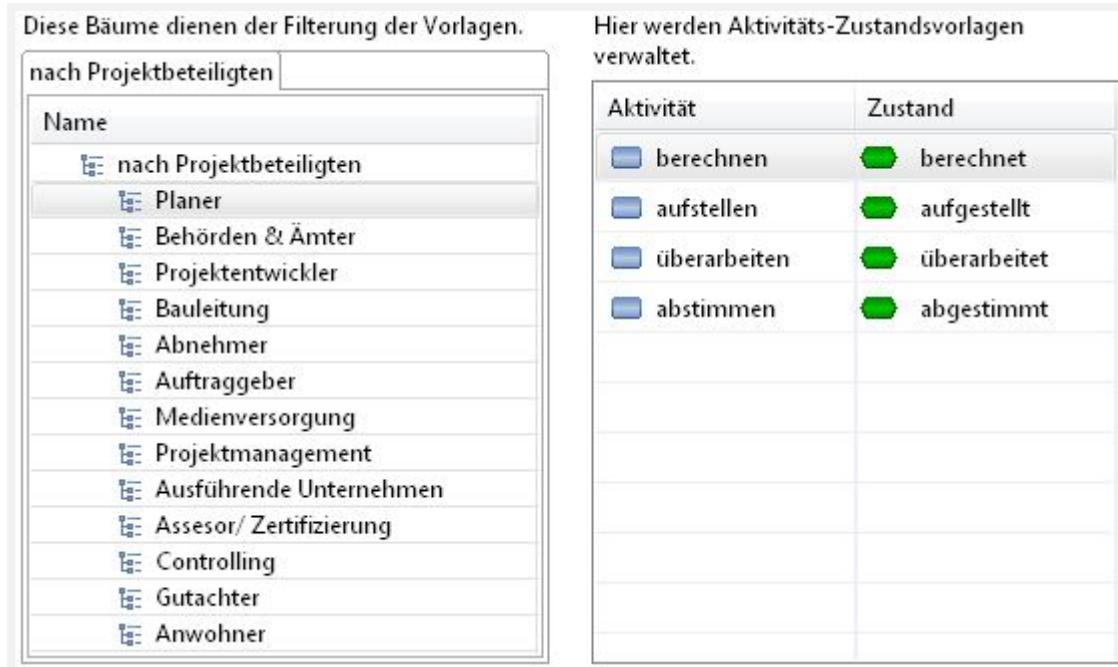


Bild 6: Strukturierte Menge der Aktivitäts- Zustandspaare

### 3.3 Teilprozesse

Die Definition der Leistungsbilder aus der HOAI wird hier zur Strukturierung der Teilprozesse herangezogen. Ergänzt wird die Struktur durch die Anführung der in den Ausarbeitungen der AHO niedergelegten Fachbereiche Projektsteuerung/Projektleitung, Brandschutz, Baufeldfreimachung, Energieeinsparungsverordnung, Sicherheits- und Gesundheitsschutzkoordination (vgl. AHO e.V. 2001-2009). Es ergibt sich eine Strukturierung nach Regelwerken, die auszugsweise in Bild 7 gezeigt ist.

Hierbei werden analog zu den Dokumenten verschiedene Detaillierungsstufen eingeführt. Die detaillierteste Ebene beinhaltet dabei beispielsweise den Teilprozess zum Dokument Grundriss/ Vorplanung/ Gebäudeplanung mit den Aktivitäten und Verantwortlichen „Vorkonzept erstellen (Architekt) – abstimmen mit Fachbereich TGA, weitere Fachbereiche in Parallelaktivität (Architekt) – überarbeiten (Architekt) – prüfen (Bauherr) – freigeben (Bauherr).“



Bild 7: Strukturierung nach Regelwerken

Die nächst höhere Ebene stellt eine Systembildung zum Dokument Pläne/ Vorplanung/ Gebäudeplanung dar. Wahlweise kann der Teilprozess aus Teilprozessen der detailliertesten Ebene oder über einen Teilprozess der nächst höheren Ebene zum Dokument Pläne/ Vorplanung/ Gebäudeplanung mit den Aktivitäten „Vorkonzept erstellen (Architekt) – abstimmen mit Fachbereich TGA, weitere Fachbereiche in Parallelaktivität (Architekt) – überarbeiten (Architekt) – prüfen (Bauherr) – freigeben (Bauherr) abgebildet werden.

Dieses Beispiel zeigt auch, dass Teilprozesse unterschiedlicher Ebenen gleiche Abläufe und Arbeitsschritte aufweisen können und so eine identische Teilprozessvorlage verwendet werden kann.

Die Angabe der Projektbeteiligten an den abgebildeten Aktivitäten informiert über die Akteure, die direkte Veränderungen des Zustandes des Dokumentes hervorrufen. Der Teilprozess „Grundrisserstellung in der Vorplanung“ ist beispielhaft in

Bild 8 gezeigt. Dieser Teilprozess ist nach Regelwerken eingeordnet in die Strukturierung „nach HOAI / Gebäude und raumbildende Ausbauten / Vorplanung“.

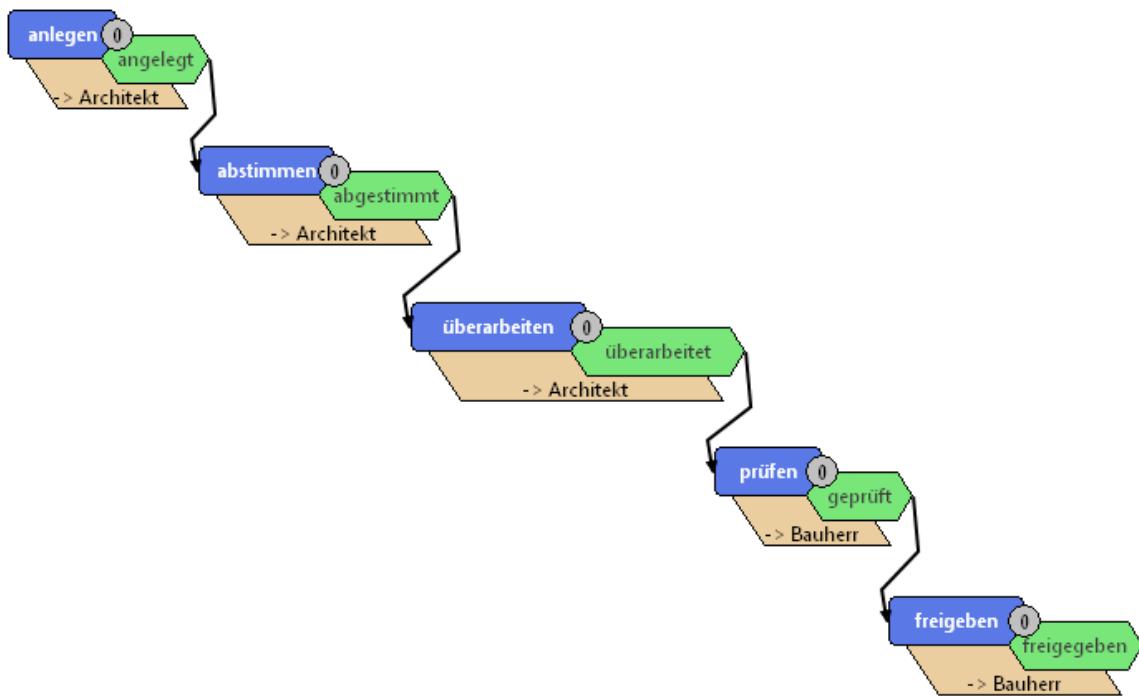


Bild 8: Beispiel einer Teilprozessvorlage

## 4 Nutzung von Teilprozessen

Ziel der Modellierung der Teilprozesse ist es, eine projektunabhängige Beschreibung der Bearbeitung von Planungsunterlagen zur Verfügung stellen zu können. Diese Beschreibung muss im Einzelfall eventuell erweitert werden, sie soll jedoch die Bearbeitungsprozesse der planungsrelevanten Dokumente beinhalten, die unabhängig vom jeweiligen Planungsprozess gültig sind.

Projektspezifisch sind die Teilprozesse entsprechend der im Projekt zu bearbeitenden Dokumente auszuwählen, so dass aus den Vorlagen projektspezifisch zu bearbeitende Aktivitäten werden. Diese Aktivitäten sind bereits so verknüpft, dass die korrekte Bearbeitung des jeweiligen Dokumentes sichergestellt ist. Weitere Eingaben durch den Nutzer sind erforderlich, um die Verknüpfungen zwischen Aktivitäten an verschiedenen Dokumenten anzugeben. Dies erfolgt auf der Grundlage des in Bild 1 gezeigten Konzeptes.

Somit entsteht eine projektspezifische Beschreibung des Planungsprozesses. In dieser Beschreibung ist sichergestellt, dass alle Aktivitäten erfasst sind, da die Liste der Aktivitäten aus den Teilprozessvorlagen heraus abgeleitet wird.

Die Aktivitäten können um die geplanten Dauern ergänzt werden, so dass eine Terminplanung des Gesamtplanungsprozesses möglich wird. Durch die Abbildung der Teilprozesse in Ebenen werden Terminpläne unterschiedlicher Detaillierungsgrade, wie Rahmenterminpläne, Detailterminpläne möglich. Terminierungen von Einzeldokumenten markieren den Leistungsfortschritt und können bei Vertragsterminen Verwendung finden.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die hier vorgestellte Modellierung der Teilprozesse soll dazu beitragen, Sollvorgaben für Planungsprozesse effizienter, vollständiger und verlässlicher als derzeit möglich entwickeln zu können. Ziel ist es, durch die Nutzung der Vorlagen für die Teilprozesse den Prozess methodisch abzuleiten und die erforderlichen Informationen zur Beschreibung des jeweiligen Prozesses konsistent zur Verfügung zu stellen.

Die Vervollständigung der Teilprozesse ist derzeit Gegenstand der Bearbeitung. Teile einer Implementierung, durch deren Nutzung Teilprozesse als Vorlagen zur Verfügung gestellt werden, sind bereits erarbeitet. Die Funktionalitäten der Implementierung werden derzeit erweitert, um aus Teilprozessen den Prozess ableiten zu können.

Die bereits jetzt erzielten Ergebnisse zeigen, dass der Ansatz erfolgversprechend ist. Das einheitliche Verständnis um die Bearbeitung von Planungsunterlagen ist bereits ein Wissen, das einen Wert darstellt. Es zeigt auf detaillierter Ebene, was durch wen im Einzelnen zu tun ist. Heute verfügbare Beschreibungen erfüllen nicht den Anspruch, dieses in der projekterforderlichen Detaillierung leisten zu können. Weitere Entwicklungen werden zeigen, wie der Gesamtprozess aus den Teilprozessen effizient abgeleitet werden kann.

Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „IT für Bauprozesse: IT-gestützte Methoden für die Gestaltung von Planung und Ausführung“ erarbeitet.

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!

## Literatur

*Huhnt W. (2009): Process Modelling in Civil Engineering. Structural Engineering International 1/2009, Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), pp. 91-101, Zurich, Switzerland, 2009.*

*Scheifele, D. (1991): Bauprojektablauf. Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1991.*

*Ahrens, H.; Bastian, K. und Muchowski, L. (2010): Handbuch Projektsteuerung – Baumanagement. IRB Fraunhofer Verlag Stuttgart, 2010.*

HOAI, Honorarordnung für Architekten und Ingenieure. 27. Auflage, Deutscher Taschenbuch Verlag, 2010.

*AHO e.V. (2001-2009): Schriftenreihe der AHO Nr. 9, 15 17, 19 und 23. Bundesanzeiger Verlag Köln, 2001-2009.*

*Berkhahn, V.; Klinger, A.; Hoffmann, F.; König, M.: Relationale Prozessmodellierung in kooperativer Gebäudeplanung. In Uwe Rüppel (Hrsg.) (2007): Vernetzt-koperative Planungsprozesse im Konstruktiven Ingenieurbau. Springer Verlag Berlin Heidelberg, S.31 -51, 2007.*

Prof. Dr.-Ing. Fritz Berner

## **Die Entwicklung projekt- und fertigungs- spezifischer Baulogistikprozesse - Ein Planungsmodell -**

Prof. Dr.-Ing. Fritz Berner  
Universität Stuttgart  
Institut für Baubetriebslehre  
Pfaffenwaldring 7, 70569 Stuttgart

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	47
1 Planungsmodell aus Prozess- und Projektsicht .....	47
2 Transferprozesse der Baulogistik.....	50
3 Baulogistik für die Bauausführung.....	51
4 Ressourcen in der Baulogistik.....	53
5 Versorgungsprofile und Versorgungspakete .....	56
6 Flächenmodell für die Baulogistik.....	59
7 Konfliktlösung.....	61
Literatur.....	62

## Kurzfassung

Das beschriebene Planungsmodell unterstützt die systematische Durchführung einer Planung und Vorbereitung der Baustellenlogistik, da es bei jedem Fertigungsprozess, der in der Ablaufplanung erfasst wird, auch zu einer Berücksichtigung der Logistikprozesse zwingt und dabei sowohl den Bedarf als auch die zur Verfügung stehenden Kapazitäten an Flächen und gemeinsam genutzten Materialflussmitteln berücksichtigt. Mit Hilfe des Planungsmodells lassen sich im Einzelnen die folgenden Ergebnisse erzielen:

- Ablaufplan der Fertigungsprozesse,
- Flächenbelegungspläne,
- Pläne über den Bedarf und die Belegung von Materialflussmitteln und Anlieferstellen,
- Listen von Ressourcengruppen und Versorgungspaketen und
- statistische Auswertungen von projektspezifischen Logistikdaten.

Kernstück des Planungsmodells sind die Fertigungsprozesse, die Ablaufelemente eines Vorgangsknoten-Netzplanes darstellen. Somit kann der Ablaufplan der Fertigung mit den Methoden der Netzplantechnik erstellt und als Vorgangsknoten-Netzplan oder Balkenplan ausgegeben werden. Kapazitätsbedingte Konflikte zwischen Fertigungs- und Logistikprozessen lassen sich auf diese Weise frühzeitig in der Planung und Vorbereitung der Bauausführung aufdecken und durch geeignete Maßnahmen vermeiden oder verringern. Auswahl und Einsatz dieser Maßnahmen erfolgt jedoch nicht automatisch, sondern stets in Interaktion mit einem Anwender des Planungsmodells.

Der Aufsatz ist aus der Schriftenreihe des Instituts für Baubetriebslehre der Universität Stuttgart Band 45 abgeleitet, verfasst von Frau Dr.-Ing. Siri Krauß.

## 1 Planungsmodell aus Prozess- und Projektsicht

Mit Hilfe des am Institut für Baubetriebslehre der Universität Stuttgart entwickelten Planungsmodells sollen einerseits verschiedene Logistikplanungen in ihren Auswirkungen auf den Bauablauf dargestellt werden können, andererseits sollen die

Ergebnisse dieser Logistikplanungen – die projektspezifischen Logistikkonzepte – eine geeignete Grundlage für die Steuerung und Kontrolle der Baulogistik während der Ausführungsphase bilden. Da der Bauablauf ein dynamisches System darstellt, in dem sich in Abhängigkeit von der Zeit verschiedene Systemzustände ergeben, entsteht die Notwendigkeit, die weiteren Betrachtungen an den Abläufen – den Prozessen – innerhalb dieses Systems auszurichten.

Tabelle 1 Gegenstände der Baulogistik

<b>Objekte</b>	<b>Personen</b>	Personen oder Personengruppen, die an der Bauausführung beteiligt sind:			
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auftraggeber (Bauherr)</li> <li>• Planer</li> <li>• Personal der ausführenden Unternehmen</li> <li>• Baustoffhändler, Lieferanten, etc.</li> <li>• Behördenvertreter</li> </ul>			
	<b>Material</b>	Gegenstände, die bei der Bauausführung verbraucht werden, wie z.B.			
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baustoffe</li> <li>• Bauelemente</li> <li>• Bauhilfsstoffe</li> <li>• Betriebsstoffe (Druckluft, Treib- und Schmierstoffe)</li> <li>• Medien (Strom, Wasser)</li> </ul>			
	<b>Information</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• auditiv: Gespräch</li> <li>• visuell: Text, Formular, Diagramm, Zeichnung</li> </ul>			
	<b>Arbeitsmittel</b>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;"><b>Materialflussmittel</b> (Transport von Objekten)</td> <td style="padding: 2px;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Baumaschinen: Hubstapler, LKW, Bagger</li> <li>• Baugeräte: Turmdrehkran, Bauaufzug</li> <li>• Kleingeräte: Sachkarre, Schubkarre, Palettenhubwagen</li> </ul> </td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;"><b>Produktionsmittel</b> (Verarbeitung von Material)</td> <td style="padding: 2px;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Baumaschinen: Bagger, Straßenfertiger</li> <li>• Baugeräte: betonmischanlage</li> <li>• Rüst-, Schal- und Verbaustoffe</li> <li>• Kleingeräte: Kreissäge, Innenrüttler</li> </ul> </td> </tr> </table>	<b>Materialflussmittel</b> (Transport von Objekten)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baumaschinen: Hubstapler, LKW, Bagger</li> <li>• Baugeräte: Turmdrehkran, Bauaufzug</li> <li>• Kleingeräte: Sachkarre, Schubkarre, Palettenhubwagen</li> </ul>	<b>Produktionsmittel</b> (Verarbeitung von Material)
<b>Materialflussmittel</b> (Transport von Objekten)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baumaschinen: Hubstapler, LKW, Bagger</li> <li>• Baugeräte: Turmdrehkran, Bauaufzug</li> <li>• Kleingeräte: Sachkarre, Schubkarre, Palettenhubwagen</li> </ul>				
<b>Produktionsmittel</b> (Verarbeitung von Material)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baumaschinen: Bagger, Straßenfertiger</li> <li>• Baugeräte: betonmischanlage</li> <li>• Rüst-, Schal- und Verbaustoffe</li> <li>• Kleingeräte: Kreissäge, Innenrüttler</li> </ul>				
<b>Informationsflussmittel</b>	Telefon, Telefax, Computer				
<b>Infrastruktur</b>	<b>Gebäude, Flächen, Wege</b>	Baustelleneinrichtung Infrastruktur in der Umgebung der Baustelle			

Für den Gegenstandsbereich der Baulogistik werden in dieser Arbeit die folgenden Festlegungen getroffen:

- Die Prozesse der raum-zeitlichen Transformation der in Tabelle 1 zusammengestellten Gegenstände der Baulogistik bilden den Kernbereich und die erste Ebene der betrachteten Baulogistik. Denn diese Prozesse stellen zum einen den originären Objektbereich der Logistik dar, zum anderen werden sie auch bei der Bauausführung schon seit jeher wahrgenommen.

- Logistische Aufgabenstellungen treten in allen Teilabschnitten einer Wertschöpfungskette auf. Somit bestehen automatisch zahlreiche gegenseitige Abhängigkeiten zu den zunächst nichtlogistischen Aufgabenstellungen. Die Transferprozesse im originären Gegenstandsbereich der Baulogistik strahlen somit nicht nur auf die primär nichtlogistischen Bereiche aus, sondern werden umgekehrt auch von diesen beeinflusst.

DIN EN ISO 9000 versteht unter einem Prozess Tätigkeiten, die Ressourcen verwenden, um Eingaben in Ergebnisse umzuwandeln. Dabei bildet das Ergebnis eines Prozesses oft die direkte Eingabe für einen anderen Prozess.

Prozesse lassen sich durch einen festen Beginn und ein festes Ende abgrenzen. Nachdem der Output eines Prozesses den Input für einen anderen Prozess bilden kann, ist es möglich, Prozesse zu Prozessketten zu verknüpfen. Da Bauvorhaben i. d. R. Projektcharakter haben, stellt die Baulogistik in der schlüsselfertigen Ausführung einerseits eine "Projektlogistik" dar, andererseits kann sie jedoch aus den folgenden Gründen gleichzeitig als Teilprojekt innerhalb eines Bauprojekts gesehen werden:

- Die verschiedenen Aktivitäten der Baulogistik werden zwar bei vielen Projekten gleich oder ähnlich sein, sie werden jedoch in den seltensten Fällen unter genau den gleichen Bedingungen abgewickelt.
- In der objektflussorientierten Sicht bestehen die Ziele der Baulogistik in der Versorgung oder der Entsorgung, um einen planmäßigen Bauablauf zu ermöglichen. Die Aktivitäten der Logistik beziehen sich auf ein konkretes Bauprojekt und somit trifft das Merkmal der Zielvorgabe auf die projektspezifische Baulogistik zu.
- Für jedes Bauprojekt wird ein terminlicher und finanzieller Rahmen vorgegeben, der festlegt, welche Leistungserstellungsprozesse wann und mit welchen Ressourcen auszuführen sind. Implizit liegt damit auch das Projektmerkmal der Ressourcenbegrenzung für die Baulogistik vor.
- Logistikaufgaben werden durch verschiedene an der Bauausführung Beteiligte wahrgenommen. Somit ergibt sich für jedes einzelne Bauprojekt eine spezifische Aufgabenverteilung und Organisation.

Die Gesamtheit der aufbau- und ablauforganisatorischen Festlegungen, wie sie sich infolge der spezifischen Randbedingungen eines Bauprojektes und den Inhalten der bauspezifischen Logistikkonzeption als konkrete Handlungsvorgabe für die Logistik in einem Bauprojekt ergeben, wird als "Logistikkonzept" bezeichnet.

## 2 Transferprozesse der Bau logistik

Während es sich bei den Prozessen des Lagerns, Transportierens und Umschlagns (s. Abbildung 1) um die klassischen Kernprozesse der Logistik handelt, werden die Prozesse des Liefern, des Fertigens und des Entsorgens eingeführt, um die Materialflüsse auf der Baustelle vollständig abbilden und auch die Schnittstellen zu den Aktivitäten der Ver- und Entsorgung außerhalb der Baustelle sowie den Aktivitäten der Fertigung auf der Baustelle berücksichtigen zu können. Sie werden als Ergänzungsprozesse bezeichnet.

Der Prozess des Liefern beschreibt dabei die Schnittstelle zwischen Versorgungs- und Baustellenlogistik. Er umfasst die Aktivitäten des Versorgungstransports zur Baustelle hin sowie die Aktivitäten der Annahme und Eingangskontrolle auf der Baustelle. Der Prozess Entsorgen hingegen bezieht sich auf die Schnittstelle zwischen Baustellen- und Entsorgungslogistik. Er umfasst alle Aktivitäten der Entsorgungstransporte, die von der Baustelle wegführen. Der Prozess des Fertigens verbindet schließlich die unterstützenden Aktivitäten der Transferprozesse mit den eigentlich wertschöpfenden Aktivitäten.

Zusammenfassend lassen sich die verschiedenen Aktivitäten von ihrer Art sowie ihrer zeitlichen Zuordnung bislang in zwei Teilprozesse untergliedern: Einen Teilprozess "Ausführen", der die Durchführung der raum-zeitlichen Transformationsprozesse umfasst, sowie einen Teilprozess "Planen und Vorbereiten", dessen Aktivitäten sich zum einen unmittelbar auf die Planung und Vorbereitung der Durchführung von Transformationsprozessen beziehen und zum anderen der Abstimmung nicht logistischer Planungsaufgaben mit der Planung und Vorbereitung der Transferprozesse dienen. Ergebnis des Teilprozesses "Planen und Vorbereiten" ist ein Modell des Logistiksystems für den betrachteten Anwendungsfall, d. h. für ein bestimmtes schlüsselfertig zu erstellendes Bauwerk.

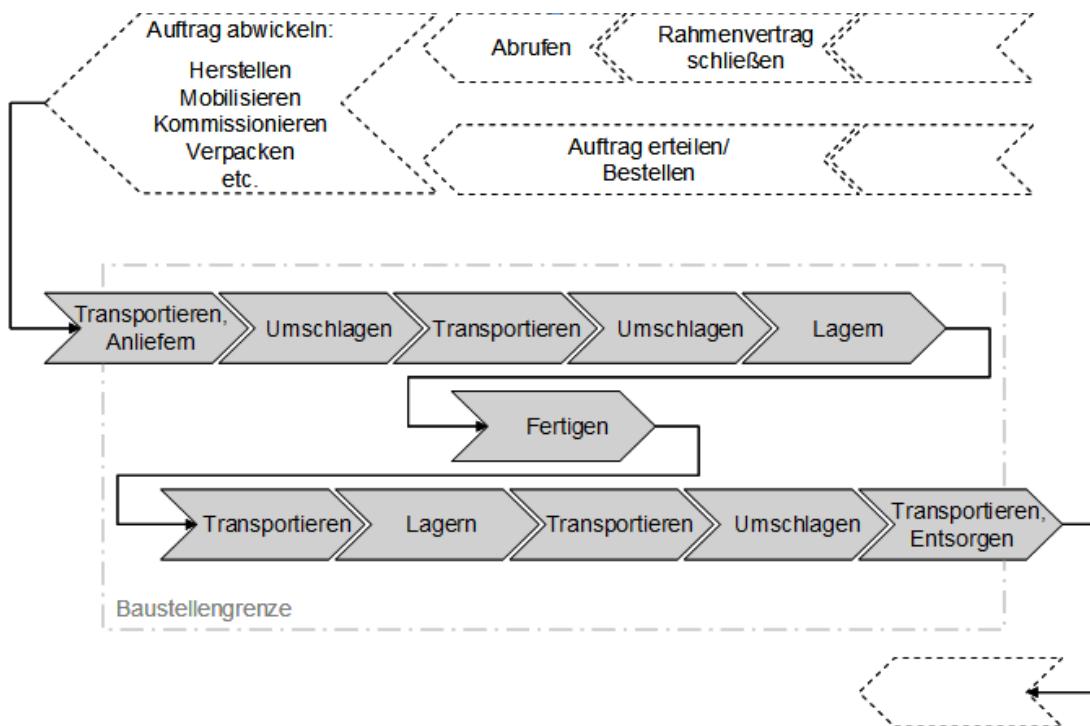


Abbildung 1 Transferprozesse der Baulogistik als idealtypische Prozesskette

Um sicherzustellen, dass sich dieses Logistiksystem auch zielgerichtet entsprechend der Planung verhält, ist es erforderlich, die Teilprozesse "Ausführen" sowie "Planen und Vorbereiten" noch um einen Teilprozess "Steuern" zu ergänzen.

### 3 Baulogistik für die Bauausführung

Um einen Fertigungsprozess auf der Baustelle durchführen zu können, müssen eine Reihe von Voraussetzungen erfüllt sein. Hierzu zählen das Vorliegen der in der Planung und Vorbereitung generierten Informationen, aus denen hervorgeht, wer zu welchem Zeitpunkt an welchem Ort welche Leistung auszuführen hat, die Fertigstellung eventuell erforderlicher Vorleistungen sowie das Vorhandensein der für die Leistungserbringung erforderlichen Ressourcen. Diese Ressourcen entsprechen den in Tabelle 1 zusammengefassten Gegenständen der Logistik. Sie können danach unterschieden werden, ob sie als Verbrauchsressourcen Bestandteil des Bauwerks werden oder in einer sonstigen Weise verbraucht werden, oder ob sie als Gebrauchsressourcen für die Durchführung des Fertigungsprozesses benötigt werden, ohne einem Verbrauch zu unterliegen. Während durch die Objekt- und Fertigungsplanung Zeitpunkt, Menge, Qualität und Ort der Bereitstellung

dieser Ressourcen vorgegeben werden, ist es die Aufgabe der Logistikplanung, für jede Ressource eine möglichst optimale Bereitstellungsvariante zu bestimmen.

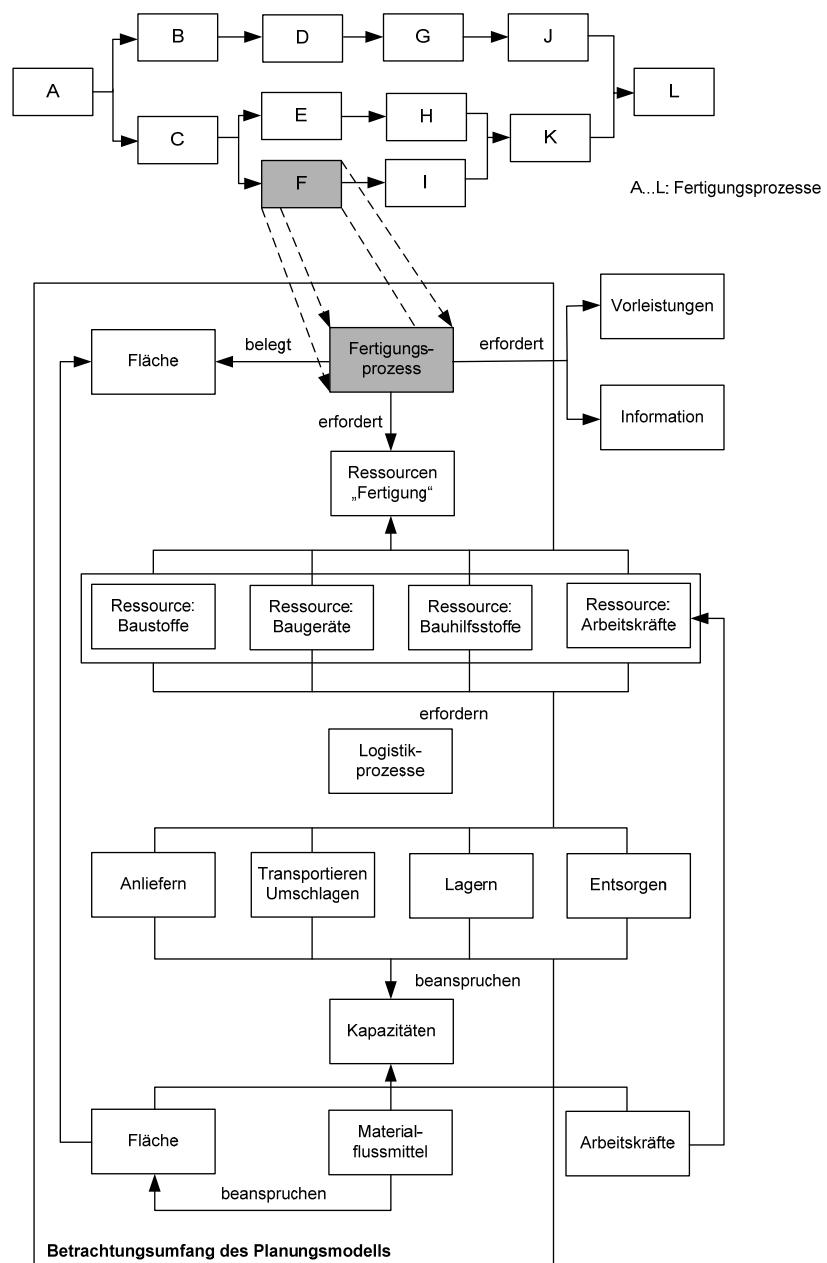


Abbildung 2 Abhängigkeiten von Logistik und Fertigungsprozessen

Zu berücksichtigen ist dabei, dass Fertigungs- und Logistikprozesse eng miteinander verknüpft sind und nicht unabhängig voneinander betrachtet werden können. Dies gilt nicht nur für die Prozessketten, bei denen der eigentliche Fertigungsprozess nur schwer von den Logistikprozessen abgegrenzt werden kann. Die Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Fertigungs- und Logistikprozes-

sen lassen sich grundsätzlich in die Kategorien "zeitlich" und "kapazitätsbedingt" unterteilen (s. Abbildung 2).

Die zeitlichen Abhängigkeiten ergeben sich aus den technisch möglichen und logisch sinnvollen Prozessfolgen. Sie betreffen die Abfolge der Fertigungsprozesse, aber auch die Kombination von Fertigungs- und Logistikprozessen. Nachdem Gebrauchsressourcen als Kapazitäten gelten, wenn neben ihrer Leistungsfähigkeit auch ihre zeitliche Verfügbarkeit für die Durchführung von Aktivitäten betrachtet wird, resultieren die kapazitätsbedingten Abhängigkeiten aus dem gleichzeitigen Zugriff von Fertigungs- oder Logistikprozessen auf Gebrauchsressourcen, die nur in einem begrenzten Umfang zur Verfügung stehen.

Ordnet man die Produktionsmittel gemäß Abbildung 2 unmittelbar den Fertigungsprozessen zu, so kann es sich dabei um Arbeitskräfte, gemeinsam genutzte Materialflussmittel oder um die auf der Baustelle zur Verfügung stehende Fläche handeln, die sich die zu derselben Zeit stattfindenden Fertigungs- und Logistikprozesse teilen müssen. Da sich der Flächenbedarf sowie die zur Verfügung stehenden Flächen aufgrund der Baustellenfertigung im Verlauf der Bauzeit in Abhängigkeit von den Logistik- und Fertigungsprozessen verändern, stellt die Fläche eine besondere Form der Kapazität dar, die auch separat betrachtet werden muss.

## 4 Ressourcen in der Bau logistik

Eine projektübergreifende Planung der Baustellenlogistik muss neben einer optimalen Ausgestaltung der Logistikprozesse vor allem die Vermeidung von Konflikten zwischen Fertigungs- und Logistikprozessen sowie verschiedenen Logistikprozessen ermöglichen. Diese können im Falle von Logistik- und Fertigungsprozessen bei einer gleichzeitigen Beanspruchung derselben Flächen sowie im Falle von verschiedenen Logistikprozessen sowohl bei einer gleichzeitigen Flächenbeanspruchung als auch bei einer gleichzeitigen Beanspruchung derselben Materialflussmittelkapazitäten entstehen. Grundgedanke des entwickelten Planungsmodells ist es deshalb, jedem Fertigungsprozess die für seine Durchführung benötigten spezifischen Ressourcen zuzuordnen und die für deren Bereitstellung geeigneten Logistikprozesse zu bestimmen. Die Logistikprozesse sind dann ausgehend von den Fertigungsprozessen sowohl zeitlich als auch räumlich in Abhängigkeit

von den begrenzt zur Verfügung stehenden Kapazitäten der Flächen und Materialflussmittel, die sich infolge anderer Fertigungs- und Logistikprozesse ergeben, einzuplanen.

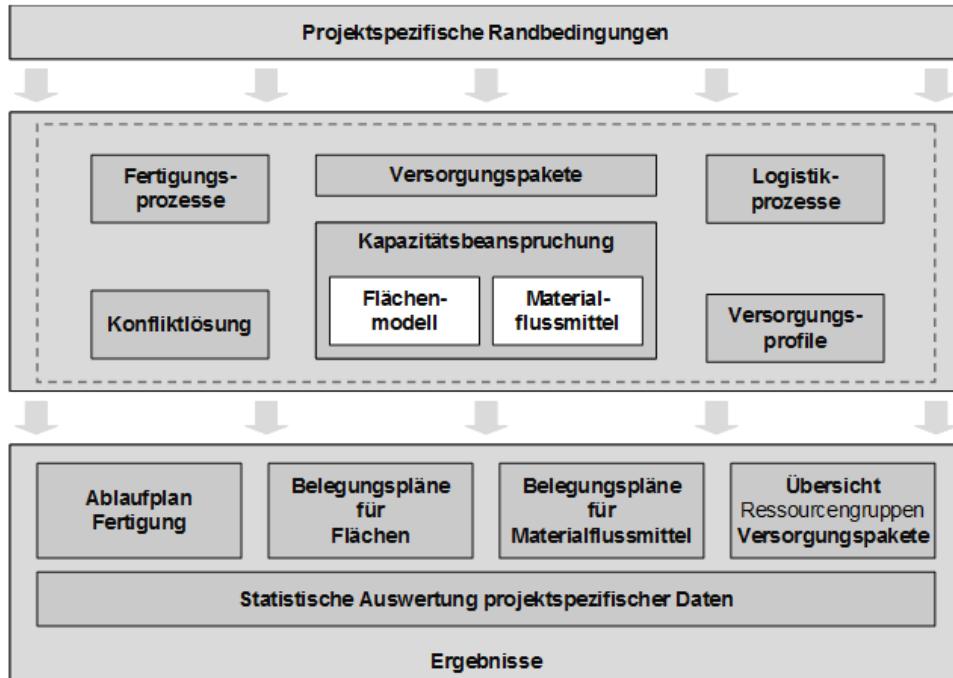


Abbildung 3 Elemente und Ergebnisse des Planungsmodells

Jeder Fertigungsprozess des Planungsmodells kann zunächst als Ablaufelement eines Vorgangsknoten-Netzplanes nach DIN 69900 betrachtet werden. Wie Abbildung 2 zeigt, konkurrieren die Logistikprozesse zusammen mit den Fertigungsprozessen um Kapazitäten. Um kapazitätsbedingte Konflikte zwischen einem Fertigungs- und einem Logistikprozess oder zwei Logistikprozessen vermeiden zu können, ist es erforderlich, die Beanspruchung dieser gemeinsam genutzten Kapazitäten in die Planung und Vorbereitung einzubeziehen.

Die Dauer des Fertigungsprozesses kann dabei mit Hilfe des Aufwandswertes bestimmt werden. Die Beanspruchung von Kapazitäten durch den Fertigungsprozess an sich kann aus den Kennwerten abgeleitet werden, zudem dienen sie als Ausgangspunkt für die Erfassung von Kapazitätsbeanspruchungen durch mögliche und sinnvolle Logistikprozesse. Die Logistikprozesse werden den Fertigungsprozessen nicht von vornherein fest zugewiesen, so dass ihre Auswahl und Ausgestaltung projektspezifisch durchgeführt werden kann.

Betrachtet man Fertigungs- und Logistikprozesse, so handelt es sich bei den gemeinsam genutzten Kapazitäten gemäß dem in Abbildung 2 beschriebenen Planungsmodell um die vorhandene Fläche. Ein gemeinsamer Zugriff auf dieselben Arbeitsmittel erfolgt nicht, da diese gemäß Tabelle 1 in Produktions- und Materialflussmittel unterschieden werden, wobei die Produktionsmittel den Fertigungsprozessen und die Materialflussmittel den Logistikprozessen zugeordnet werden können. Abbildung 4 stellt die möglichen Arten der Flächenbeanspruchung dar.

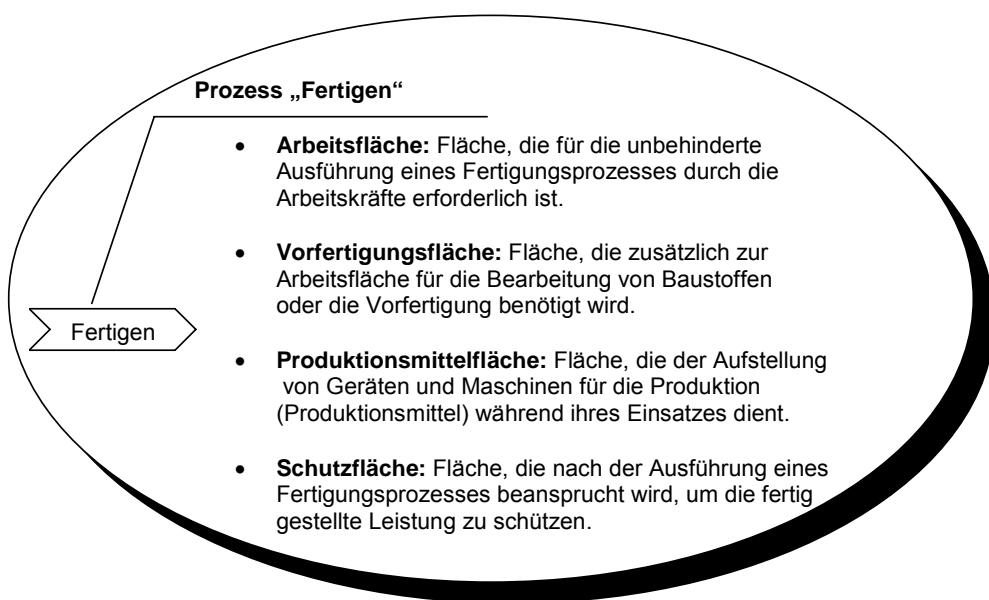


Abbildung 4 Arten der Flächenbeanspruchung durch Fertigungsprozesse

In Abhängigkeit von seiner Art kann somit jedem Fertigungsprozess zunächst eine bestimmte Kombination an beanspruchten Flächen fest zugeordnet werden. So belegt jeder Fertigungsprozess bei seiner Durchführung eine Arbeitsfläche. Vorfertigungs-, Produktionsmittel- und Schutzflächen sind dagegen nur dann zu berücksichtigen, wenn sie auch tatsächlich erforderlich sind. Die einem bestimmten Fertigungsprozess zugeordneten Flächen können dabei dieselbe Teilfläche beanspruchen, wie dies meist bei Arbeits- und Schutzflächen der Fall ist, oder sich auf verschiedene Flächenabschnitte verteilen. Die Belegung von Arbeits-, Produktionsmittel- und Vorfertigungsflächen erfolgt gleichzeitig mit dem jeweiligen Fertigungsprozess und kann somit unmittelbar aus der Ablaufplanung der Fertigungsprozesse entnommen werden.

Für jede Art der Flächenbeanspruchung, die nicht gleichzeitig mit dem betreffenden Fertigungsprozess stattfindet, sind deshalb auch eine zeitliche Anordnungs-

beziehung sowie eine Dauer festzulegen. Eine aussagekräftige Beschreibung der Flächenbeanspruchung durch die Fertigungsprozesse erfordert eine detailliertere Fertigungsplanung als üblich.

Allgemein können die betrachteten Logistikprozesse der Versorgung im Einflussbereich der Baustelle gemäß der in Abbildung 1 vorgenommenen Beschreibung in die Basisprozesse des Anliefern, Umschlagens und Transportierens sowie des Lagerns unterschieden werden.

## 5 Versorgungsprofile und Versorgungspakete

Charakteristische Abfolgen von logistischen Basisprozessen lassen sich durch entsprechende Anordnungsbeziehungen zu Versorgungsprofilen zusammenfassen. Diese Ketten von Logistikprozessen werden dann durch eine Anordnungsbeziehung mit den Fertigungsprozessen verknüpft, so dass ihre Anfangs- und Endtermine ausgehend von denen des ihnen zugeordneten Fertigungsprozesses beschrieben werden können. Nicht jedem Fertigungsprozess, der in der Ablaufplanung separat betrachtet wird, wird eine eigene Kette logistischer Basisprozesse zugeordnet werden können.

Die projektspezifische Logistikplanung umfasst somit nicht nur die Auswahl von geeigneten Regelabläufen der Versorgung, sondern auch die in Abbildung 5 dargestellte Auswahl der fertigungsprozessspezifischen Ressourcen und Ressourcengruppen, die von einer Kette logistischer Basisprozesse zusammen bereit gestellt werden und als **Versorgungspakete** bezeichnet werden sollen. Gegenstand eines Versorgungspakets kann jeweils eine Ressourcengruppe von mehreren Fertigungsprozessen derselben Art sein, es können aber auch verschiedene Ressourcengruppen von gleichartigen Fertigungsprozessen zusammengefasst werden. Ganz allgemein wird die Bildung von Versorgungspaketen von den folgenden Faktoren beeinflusst:

- der Ressourcenintensität eines Fertigungsprozesses,
- der wirtschaftlichen Mindestliefermenge,
- der Lagereignung der Ressourcen sowie
- der auf der Baustelle zur Verfügung stehenden Lagerfläche.

Um die Beanspruchung von Materialflussmitteln und Flächen durch die Logistikprozesse in Abhängigkeit von der Zeit beschreiben zu können, ist es erforderlich, die für die Versorgung mit den zuvor zusammengestellten Versorgungspaketen geeigneten Basisprozesse auszuwählen und den jeweiligen Fertigungsprozessen zuzuordnen und in charakteristischen Regelabläufen zusammenzufassen. Eine auf diese Weise zu einem Regelablauf zusammengesetzte Kette von Basisprozessen der Baulogistik wird in diesem Zusammenhang als **Versorgungsprofil** bezeichnet. Die Versorgungsprofile können in einem Katalog zusammengestellt und den Versorgungspaketen durch eine einfache Auswahl zugeordnet werden.

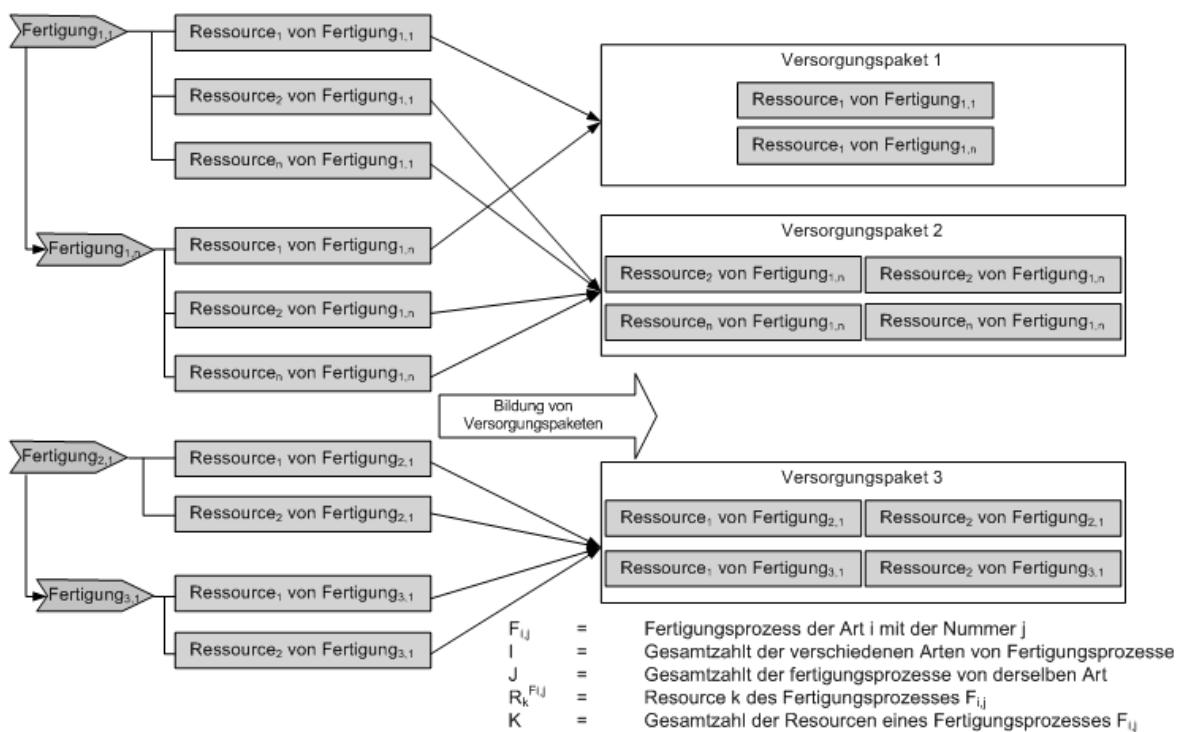


Abbildung 5 Bildung von Versorgungspaketen

Welche Versorgungsprofile bei einem bestimmten Projekt zur Verfügung stehen sollen, ist für jedes Projekt unter Berücksichtigung der Logistikanalyse und der Logistikinfrastruktur festzulegen. Aus der Verknüpfung eines Versorgungsprofils mit den Fertigungsprozessen der Ressourcen und Ressourcengruppen eines Versorgungspakets ergibt sich dann zum einen die Dauer der einzelnen Prozesse in Abhängigkeit von der Ressourcenmenge und zum anderen die zeitliche Einordnung der Logistikprozesse eines Versorgungsprofils in den Gesamtablauf der Bauausführung.

Abbildung 7 zeigt die Versorgungsprofile. Die Logistikprozesse können dabei zunächst in zwei Abschnitte L1 und L2 unterschieden werden. Der Abschnitt L1 fasst die Anlieferung sowie die Transport- und Umschlagvorgänge bis zum Erreichen der Lagerfläche zusammen, der Abschnitt L2 umfasst die Lagerung.

Profil V1 gilt für Verbrauchs- und Gebrauchsressourcen, die aufgrund ihres geringen Bedarfs oder ihrer geringen Abmessungen von den Arbeitskräften mitgeführt werden und außer einem Teil der Arbeitsflächen sowie der Verkehrswege der Arbeitskräfte keine weiteren Kapazitäten beanspruchen. Hierzu zählen z. B. Kleingeräte und Werkzeuge.

Profil V2 beschreibt den für eine Just-in-time-Versorgung charakteristischen Ablauf, bei dem keine Lagerung auf dem Baugelände erfolgt und die Transport- und Umschlagprozesse ab dem Zeitpunkt der Anlieferung zeitlich nicht von den Fertigungsprozessen getrennt werden können oder bei denen sich deren Kopplung aufgrund der besonderen Eigenschaften der Ressourcen und ihres Fertigungsprozesses anbietet, z. B. Betoneinbau.

Profil V3 beschreibt die Versorgung mit einer Ressource, die keine Materialflussmittel beansprucht, jedoch Lager- oder Aufstellflächen benötigt, z. B. Bagger oder Radlader. Die Aufstellfläche wird dabei ggf. einen bestimmten Zeitraum vor sowie während der Ausführung der Fertigungsprozesse benötigt.

Profile V4 und V5 gelten für Verbrauchs- und Gebrauchsressourcen, bei denen die Logistikprozesse der Anlieferung und des Baustellentransports von den Fertigungsprozessen durch Zwischenlagerprozesse entkoppelt sind. Die Menge an Ressourcen, die auf die Baustelle gebracht wird, entspricht dabei der Ressourcenmenge eines Versorgungspakets. Während Profil V4 für Ressourcen gilt, die arbeitsplatznah gelagert werden können, so dass für den Transport und Umschlag von der Lagerfläche zur Einbaustelle keine Materialflussmittel mehr bereit gestellt werden müssen, betrifft Profil V5 die Ressourcen, bei denen auch für diese Prozesse Materialflussmittel benötigt werden. Zusätzlich zu den Logistikprozessen L1 und L2 sind deshalb noch die Logistikprozesse 3.1 bis 3.n zu unterscheiden, die die letzten Abschnitte des Baustellentransports beschreiben.

Was die zeitliche Anordnung der Logistikprozesse zu den Fertigungsprozessen angeht, so beginnt die Lagerung L2 in beiden Fällen mit dem Ende der Transport-

und Umschlagvorgänge des ersten Prozessabschnitts L1 und endet zusammen mit dem letzten Fertigungsprozess Fi, der von den betrachteten Logistikprozessen versorgt wird. Der Beginn von L1 und L2 kann somit durch eine Anordnungsbeziehung zu dem Beginn des ersten Fertigungsprozesses F1 eines Versorgungspakets abgeleitet werden, die angibt, wie lange eine Ressource vor dem Beginn der Fertigungsprozesse auf der Baustelle vorhanden sein soll. Hierbei bietet sich eine Angabe dieses Zeitraums in Arbeitstagen an.

## 6 Flächenmodell für die Baulogistik

Das gewählte Flächenmodell für die räumliche Zuordnung der Prozesse sieht eine Unterteilung der gesamten zur Verfügung stehenden Fläche innerhalb eines Bauwerks in Zonen und Schichten vor, wobei eine Zone die Fläche eines Geschosses darstellt, während eine Schicht einen Teilbereich des Geschosses beschreibt. Eine solche, sich am architektonischen Grundriss des Bauwerks orientierende Unterteilung bietet dabei vor allem den Vorteil, dass eine bestimmte Fläche für die Zuordnung einer Beanspruchung direkt und eindeutig angesprochen werden kann. Zum anderen gestattet sie durch die geringere Detaillierung eine praxisgerechtere Strukturierung der Fertigungsprozesse in der Ablaufplanung.

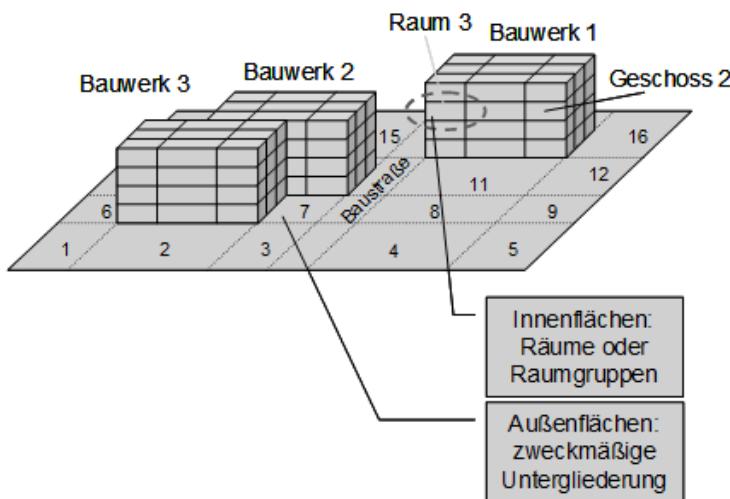


Abbildung 6 Beispiel für eine Flächencodierung

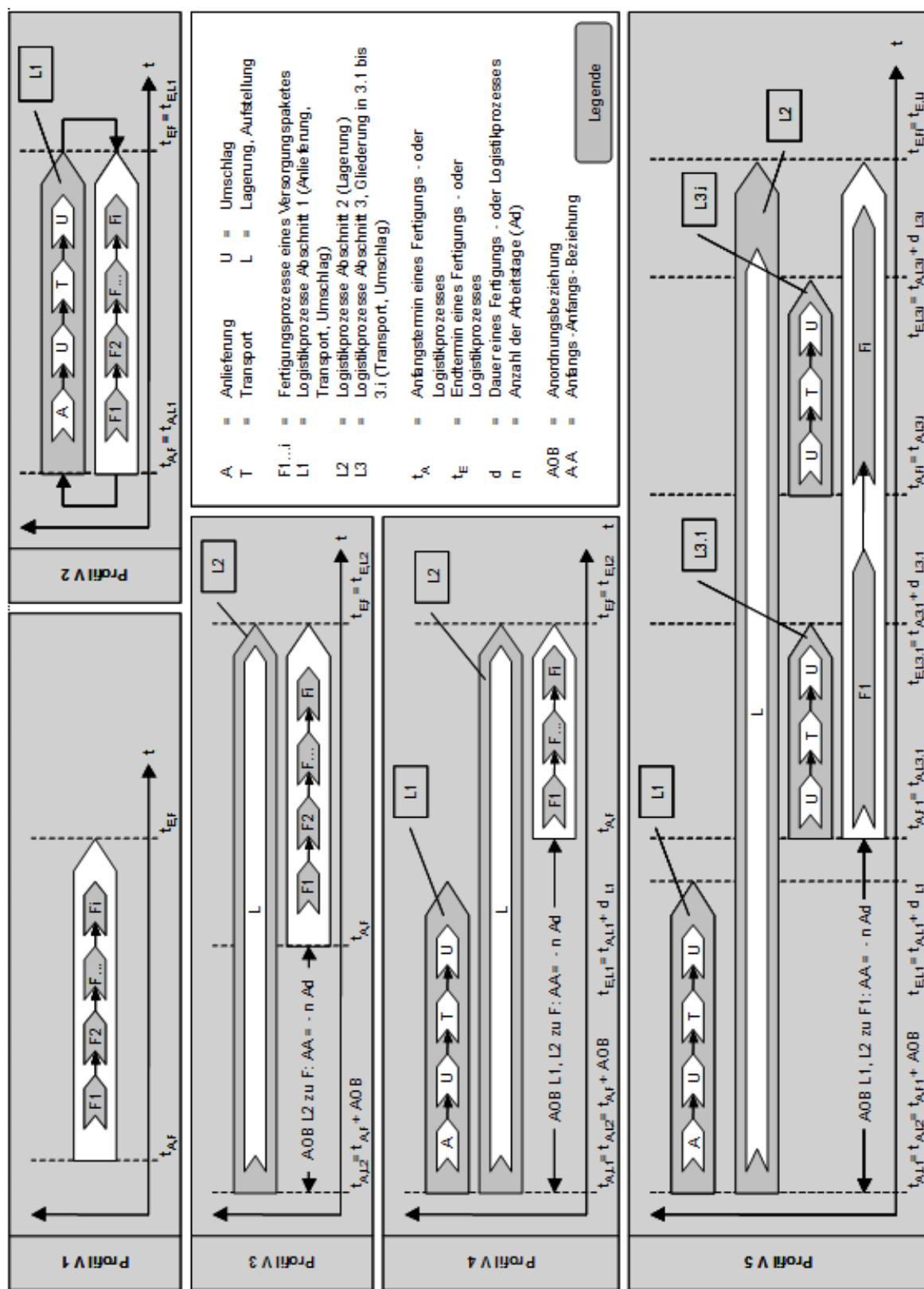


Abbildung 7 Versorgungsprofile für die Logistikplanung

Um auch die Möglichkeit berücksichtigen zu können, dass eine Teilfläche mehreren Fertigungsprozessen oder sowohl Fertigungs- als auch Logistikprozessen zur Verfügung steht, ist es zweckmäßig, den verschiedenen Flächenbeanspruchungsarten ein Anforderungsprofil zuzuordnen, aus dem hervorgeht, wie stark der Prozess die ihm zugeordnete Fläche beansprucht.

Tabelle 2 Anforderungsprofile für Flächenbeanspruchungen

<b>Profil</b>	<b>Charakteristik der Flächenbeanspruchung</b>
A	Beanspruchung der gesamten zugewiesenen Flächen, wie z.B. durch Arbeitsflächen beim Betonieren von Geschossdecken oder beim Verlegen von Estrich
B	Beanspruchung eines Teils der zugewiesenen Flächen, bedeutende Behinderung bei der Belegung durch weitere Prozesse, wie z.B. durch Lagerflächen des Trockenbaus
C	Beanspruchung eines Teils der zugewiesenen Flächen, geringfügige Behinderung bei der Belegung durch weitere Prozesse, wie z.B. durch Arbeitsflächen bei der Feinmontage Elektro

## 7 Konfliktlösung

Bei der Vermeidung von Kapazitätskonflikten, die ausschließlich Fertigungsprozesse betreffen, ist eine konfliktfreie Ausführung nur durch eine Verlängerung der Ausführungszeit zu erreichen. Im Zusammenhang mit Logistikprozessen bieten sich jedoch auch andere Strategien zur Konfliktlösung an.

Da die ungestörte Durchführung der Fertigungsprozesse gemäß der zu Beginn ohne Berücksichtigung der beschränkten Flächen- und Materialflussmittelkapazitäten erstellten Ablaufplanung oberste Priorität besitzt, lässt sich für den Fall auftretender Konflikte die folgende Rangfolge der anzupassenden Prozesse festlegen:

1. Belegung von Flächen durch Fertigungsprozesse auf dem kritischen Weg hat Vorrang vor der Flächenbelegung durch Logistikprozesse.
2. Belegung von Flächen durch Logistikprozesse, die Fertigungsprozesse auf dem kritischen Weg versorgen, hat Vorrang vor der Flächenbelegung durch Fertigungsprozesse mit Pufferzeit.

3. Belegung von Flächen durch Logistikprozesse, die Fertigungsprozesse auf dem kritischen Weg versorgen, hat Vorrang vor dem Flächenbedarf von Logistikprozessen, die Fertigungsvorgänge mit Pufferzeit versorgen.
4. Belegung von reservierten Flächen durch Logistikprozesse hat Vorrang vor der Belegung anderer Flächen durch Logistikprozesse.

Für die Anpassung der Fertigungs- und Logistikprozesse, bei denen es infolge der Belegung von Flächen oder Materialflussmitteln zu Konflikten kommt, bestehen dann die folgenden Konfliktlösungsstrategien:

1. Veränderung der Logistikprozesse (zeitlich, räumlich, Art).
2. Veränderung der Fertigungsprozesse (zeitlich, räumlich, Art).

Kombination aus 1. und 2.

## Literatur

*Krauß, S. (2005): Die Baulogistik in der schlüsselfertigen Ausführung. In Schriftenreihe des Instituts für Baubetriebslehre der Universität Stuttgart (TH), Band 45, Berlin Bauwerk, 2005.*

*Berner, F. (1983): Verlustquellenforschung im Ingenieurbau. Dissertation, Universität Stuttgart, 1983.*

*REFA (Hrsg.) (1985b): Methodenlehre der Planung und Steuerung. Teil 2, 4. Auflage, München: Hanser, 1985.*

*Baumgarten, H.; Wiendahl, H.-P.; Zentes, J. (Hrsg.) (2003): Logistik-Management. 2 Bände, Stand Juli 2003, Berlin, Heidelberg: Springer, 2003.*

*Boenert, L.; Blömeke, M. (2003): Logistikkonzepte im Schlüsselfertigbau zur Erhöhung der Kostenführerschaft. In: Bauingenieur 78 (2003), S. 277-283.*

*Göpfert, I. (2005). Logistik, 2. Aufl., München: Vahlen, 2005.*

Dr.-Ing. Racha Chahrour  
und  
Dr.-Ing. Jan Tulke

**Anbindung der Simulation an eine BIM-Umgebung,  
Chancen und Anforderungen im Vergleich zur  
Terminplanung**

Dr.-Ing. Racha Chahrour  
Dr.-Ing. Jan Tulke  
HOCHTIEF Construction AG  
Consult Bauprozessmanagement  
Alfredstr. 236, 45133 Essen

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	65
1 Einführung .....	65
2 Forschung und Praxis .....	66
3 Modellbasierte Terminplanung .....	67
3.1 Das Forschungsprojekt InPro .....	67
3.2 Problemstellung und Ziele .....	68
3.3 Terminplanungsbezogene Ergebnisse .....	69
4 Modellbasierte Simulation .....	74
5 Fazit .....	77
Literatur .....	78

## Kurzfassung

Sowohl das Building Information Modeling (BIM) als auch die diskrete-orientierte Simulation von Bauprozessen standen in den letzten Jahren im Mittelpunkt zahlreicher Forschungsprojekte und Veröffentlichungen. Auf der einen Seite können mit zunehmender Nutzung eines zentralen Bauwerksinformationsmodells einmal erstellte Daten vielfältig wiederverwendet, Planungsprozesse transparenter gestaltet und Planungsänderungen einfacher visuell erfasst werden. Auf der anderen Seite kann die Anbindung der Netzplantechnik zur Bauablaufplanung und die Anwendung der in der Baupraxis bisher wenig genutzten Bauprozesssimulation eine Ausweitung der gemeinsamen Datennutzung auf die Ausführungsphase, eine transparentere Entscheidungsfindung und eine schnellere und qualifiziertere Reaktion auf Planungsänderungen bewirken. Durch die Nutzung der Potentiale aller drei Planungstechniken innerhalb des Bauprozessmanagements ist letztlich eine effizientere Planung und Ausführung von Bauprojekten zu erwarten.

Der folgende Artikel stellt zunächst die im Rahmen des EU-Forschungsprojektes InPro erzielten Ergebnisse im Bereich der modellbasierten Terminplanung vor und leitet daraus anschließend Anforderungen und Chancen für die weiterführende Integration der drei in der Praxis bisher weitestgehend isoliert betrachteten Fachdisziplinen BIM, Simulation und Terminplanung ab.

## 1 Einführung

In den letzten Jahren hat zunehmend die Simulation von Bauprozessen in größere Forschungsprojekte, die sich mit BIM beschäftigen, Einzug erhalten, z.B. die beiden nationalen Projekte ForBAU und Mefisto. Dies eröffnet der Simulation neue Chancen, stellt jedoch aber Anforderungen, welche dieser Beitrag am Beispiel der Anbindung der Terminplanung an eine BIM-Umgebung thematisieren wird.

Nach einer kurzen Darstellung der heutigen Situation in Forschung und Praxis wird auf die modellbasierte Terminplanung eingegangen. In diesem Zusammenhang präsentiert dieser Beitrag einige umgesetzte Ansätze aus dem europäischen, zuletzt abgeschlossenen InPro-Projekt. Bzgl. der Gesamtergebnisse und Entwicklungsgrundlagen des Forschungsprojektes sei an dieser Stelle auf die

jeweiligen, auf der Projekthomepage ([www.inpro-project.eu](http://www.inpro-project.eu)) veröffentlichten Projektberichte und auf *Tulke 2010a* verwiesen. Die Absicht ist dabei, Parallelitäten, Chancen und Anforderungen für die Anbindung der Simulation an eine BIM-Umgebung zur Diskussion zu stellen.

## 2 Forschung und Praxis

Die Idee einer integrierten Planung geht schon auf Anfang der 90er Jahre zurück. Die Vorteile der Integration von Planungsdaten mit Daten der Kalkulation und der Terminplanung und somit die Kopplung von Produkt- und Prozessmodellen sind seitdem ausführlich analysiert. In Anlehnung an andere Industrien überwiegte danach der Ansatz der Standardisierung, so dass neutrale Standardschnittstellen zum Austausch von Planungsdaten entstanden bzw. weiterentwickelt wurden, wie STEP, IFC, LandXML, OKSTRA usw. Die Forschung weist eine Fülle an Arbeiten auf, welche die Vorteile einer solchen integrierten und um Prozessdaten erweiterten BIM-Umgebung teilweise anhand von Praxisbeispielen aufzeigen (*Satub et al. 1998, Hartmann et al. 2007, Gao and Fischer 2008, Tulke et al. 2008*). Auf der anderen Seite zeigt auch die Praxis bereits einige, wenn auch sehr selektive Anwendungsbeispiele. Dedizierte Initiativen aus der Praxis, wie z.B. die 5D Initiative ([www.5d-initiative.eu](http://www.5d-initiative.eu)) oder die eigens gegründete, spezialisierte Unternehmenseinheiten wie die HOCHTIEF ViCon GmbH ([www.hochtief-vicon.de](http://www.hochtief-vicon.de)), deren Geschäftsmodell ausschließlich auf die Konzipierung, Umsetzung und das Management von BIM auf (Groß-)Projekten ausgerichtet ist, zeigen deutlich die wachsende Bedeutung innerhalb der Bauindustrie.

Die Vorteile der Simulationstechnik für das Bauprozessmanagement sind zumindest in der Forschung ebenfalls seit längerem erkannt und über viele Forschungsarbeiten nachgewiesen. Auch die Kopplung der Simulation an Produktmodelle, um auf diese Weise Eingangsdaten für die Simulation zu gewinnen, wurde in vielen Forschungsarbeiten analysiert und an Praxisbeispielen validiert. (*Franz 1999, AbouRizk and Mather 2000, Chahroud 2007, König et al. 2007, Schorr et al. 2010*). Die Nutzung der Simulation ist bisher jedoch noch eher mit Forschungsprojekten verbunden, so dass Initiativen aus der Praxis kaum zu finden sind.

### 3 Modellbasierte Terminplanung

Die von unterschiedlichen Fachplanern entwickelten 3D Modelle werden heutzutage nur in unzureichendem Maße für die Planung der Ausführung weiterverwendet. Zudem werden 4D Modelle eher im Nachhinein mit dem fertiggestellten Terminplan entwickelt, um diesen anhand von animierten Bildern zu erläutern. Der Grund sind zahlreiche Schwierigkeiten, die eine frühere Nutzung des Gebäudemodells bereits für die Erstellung eines Terminplans verhindern. Im Allgemeinen kann man feststellen, dass die Integration von notwendigen Funktionalitäten in BIM-basierte Projekt Management Tools bisher noch rudimentär ist (*Hartmann et al. 2007*).

Im Folgenden werden die Entwicklungen in diesem Bereich dargestellt, die im Rahmen des kürzlich abgeschlossenen europäischen Forschungsprojekts InPro erzielt wurden.

In Anbetracht der Tatsache, dass sowohl die Terminplanung als auch die Simulation die Planung eines effizienten Bauablaufes im Fokus haben, können Erfahrungen in der BIM-Anbindung der Terminplanung auch für eine analoge Anbindung der Simulation genutzt werden.

#### 3.1 Das Forschungsprojekt InPro

InPro steht für „Open Information Environment for collaborative Processes throughout the lifecycle of a building“. Das Forschungsvorhaben hatte die Etablierung eines modellbasierten und kollaborativen Arbeitens in der frühen Planungsphase unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes zum Ziel. Es hatte eine Projektlaufzeit von 4 Jahren und wurde Ende 2010 abgeschlossen. Mitgewirkt haben 18 europäische Partner und dabei unterschiedliche, sich ergänzende Themen wie Objektplanung, Planungsabläufe, Energie, Terminplanung, Anforderungsmanagement, Kosten usw. bearbeitet. Dabei beschäftigte sich InPro nicht nur mit den technischen Aspekten einer kollaborativen Umgebung, sondern auch mit den organisatorischen Anforderungen des BIM-Ansatzes auf Projekt- und Unternehmensebene. Im Folgenden werden lediglich die technischen Entwicklungen im Bereich der modellbasierten Terminplanung dargestellt, siehe auch *Tulke 2010a*.

### 3.2 Problemstellung und Ziele

Sowohl auf Produktmodellebene als auch auf Prozessmodellebene fehlen etablierte Schnittstellenstandards. Existierende 4D Editoren, in denen die Anbindung der Terminplanung an das BIM-Modell und somit die Entwicklung eines 4D Modells erfolgt, bieten bereits einige Schnittstellen zu CAD Systemen und zu Terminplanungssoftware jedoch mit nur sehr begrenzten Möglichkeiten und Qualitäten. Dem Terminplaner ist es in der Regel nicht möglich, Daten wie Mengen oder Kosten in diese 4D Editoren einzulesen bzw. sie aus einer interaktiven Definition von Bauabschnitten aus dem Modell zu gewinnen. Daraus resultiert, dass der Terminplaner ständig zwischen unterschiedlichen Medien wechseln muss. Dieses gilt beispielsweise für die Bauzeitermittlung auf Basis einzelnen Bauabschnitten zugeordneter Mengen.

Ein weiteres wesentliches Problem ist das zeitaufwändige Verknüpfen von Produktdaten, also Bauelementen mit Prozessdaten, also Terminplanvorgängen sowie die Aktualisierung dieser Verknüpfungen bei jeglichen Modell- oder Terminplanänderungen. Aufgrund der von 4D Editoren in der Regel verwendeten proprietären Datenformate ist zudem der Austausch eines fertiggestellten 4D Modells mit anderen Projektbeteiligten für die weitere Bearbeitung nicht möglich.

Unter Berücksichtigung der oben adressierten Probleme können die Entwicklungsziele für die modellbasierte Terminplanung extrahiert werden. Das erste Ziel ist die **Etablierung eines einheitlichen, standardisierten Datenformats** zur Integration, Kommunikation und Wiederverwendung aller in diesem Planungsprozess relevanten Daten. Nach eingehender Untersuchung konnte festgestellt werden, dass die Industry Foundation Classes (IFC) diesem Anspruch in der Version 2x3 und 2x4 gerecht werden, siehe hierzu auch Weise et al 2009a/b. 4D Editoren sind dahingehend zu entwickeln, dass sie von den Potentialen dieses Datenformats voll profitieren können. Mittels IFC ist es möglich, alle für die Terminplanung relevanten Daten wie Mengen, Kosten, Termine und 4D Verknüpfungen zu verarbeiten.

Ein weiteres Ziel ist die **Erweiterung der Funktionalitäten von 4D Editoren**, um Medienbrüche und den entstehenden Zusatzaufwand zu minimieren. Dazu gehören die Verbesserung der Möglichkeiten zum Verknüpfen von Produkt- und Prozessdaten, die interaktive Definition von Bauabschnitten sowie die Visualisierung

von Ausbauvorgängen im Inneren des Bauwerks. Zum einfachen Datenaustausch innerhalb eines Projektes ist zudem die Anbindung an einen zentralen Modellserver erforderlich.

### 3.3 Terminplanungsbezogene Ergebnisse

Um die relevanten InPro Ergebnisse im Bereich der modellbasierten Terminplanung zu demonstrieren, wurden drei Rollen betrachtet. *Abbildung 1* zeigt die sich dabei ergebenden Prozesse.

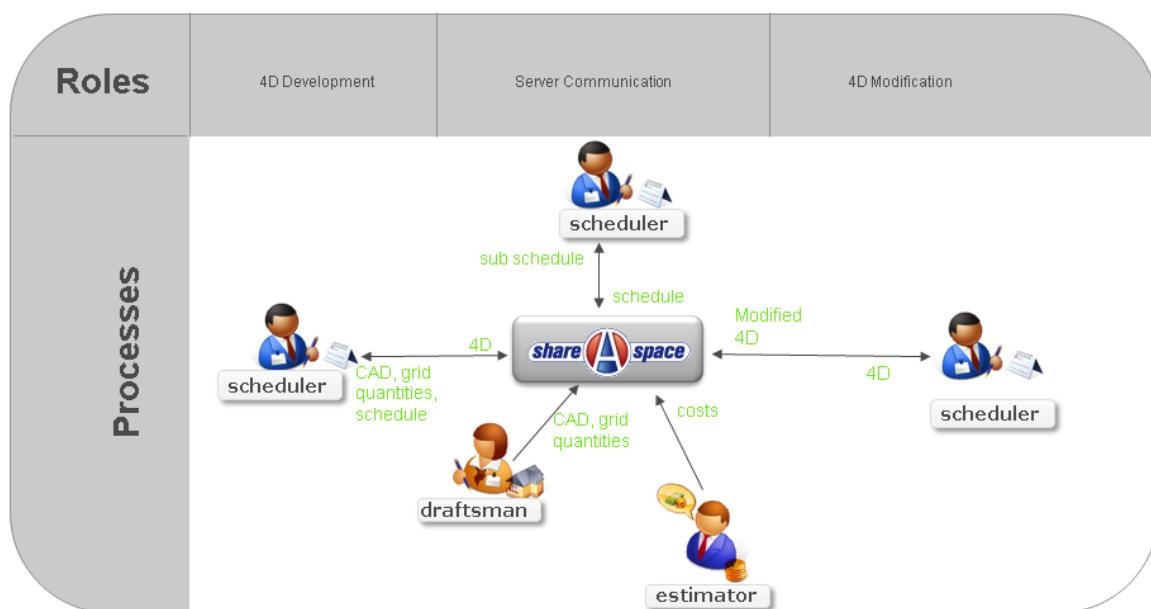


Abbildung 1: Rollen eines Terminplaners in einer BIM-Umgebung

Die erste Rolle des Terminplaners ist die Entwicklung und die Bereitstellung eines initialen 4D Modells. Der Terminplaner erhält über maßgeschneiderte Softwarefunktionalitäten Zugriff auf IFC basierte BIM-Daten wie Geometrie, Mengen, Kosten usw. Die zweite Rolle umfasst den Austausch des erstellten 4D Modells bzw. erforderlicher Ausgangsdaten innerhalb des Projektes über einen BIM-Server. Andere Projektbeteiligte können mittels entsprechender Funktionalitäten des Servers erforderliche Teilinformation bzw. Versionen des Terminplanes bzw. 4D Modells laden und nach ihrer Bearbeitung als neue Version veröffentlichen. Die Weiterverarbeitung des 4D Modells in einer anderen als der Quellsoftware repräsentiert die dritte Rolle des Terminplaners.

Für die Abbildung des dargestellten Prozesses wurde, wo verfügbar, kommerzielle Software genutzt bzw. diese erweitert. Für die Realisierung weiterführender Funktionalitäten wurden in Zusammenarbeit mit Universitäten eigene, umfangreiche Prototypen erstellt.

Folgende kommerzielle Software kam zum Einsatz:

- MS Project,
- Synchro mit folgenden im Rahmen von InPro entwickelten Zusatzfunktionalitäten: erweiterte IFC-Schnittstelle, Objektteilung für die Aufteilung in Bauabschnitte, Automatching für vereinfachte Verknüpfungserstellung.

Die entwickelten Prototypen sind:

- TNO Plug-In, das eine IFC Schnittstelle für MS-Project installiert,
- HOCHTIEF Scheduling Assistant, Prototyp eines 4D Editors basierend auf Werkzeugen der [www.openifctools.org](http://www.openifctools.org) mit integriertem Kosten-Editor für die IFC-basierte Definition der Kosten und Verarbeitung von Basismengen sowie erweiterten Visualisierungsfunktionalitäten (*Tulke 2010a*),
- Duration-Calc. Plug-In für MS-Project, entwickelt durch HOCHTIEF Consult Bauprozessmanagement, für die Bauzeitermittlung basierend auf BIM-Mengen und Aufwandswerten aus einer firmeneigenen Datenbank.

Die wesentlichen Ergebnisse wurden an einem Beispiel demonstriert. Hierbei handelt es sich um ein 23-stöckiges Gebäude im Zentrum von Hamburg. Das bestehende Gebäude soll restauriert und um 2 Etagen erweitert werden. Zudem soll die denkmalgeschützte Fassade ausgetauscht werden. Die Dokumentationen der Demonstrationen sind unter [www.inpro-project.eu](http://www.inpro-project.eu) veröffentlicht.

*Abbildung 2* zeigt die verwendeten Softwarepakete, Funktionalitäten und ausgetauschten Daten innerhalb des Demonstrationsszenarios. Der Abschnitt I behandelt die Entwicklung des 4D Modells innerhalb des kommerziellen 4D Editors Synchro. Zudem ist auch das MS-Project Plug-in von TNO für den Export der ersten Version des Terminplans als IFC Datei einbezogen.

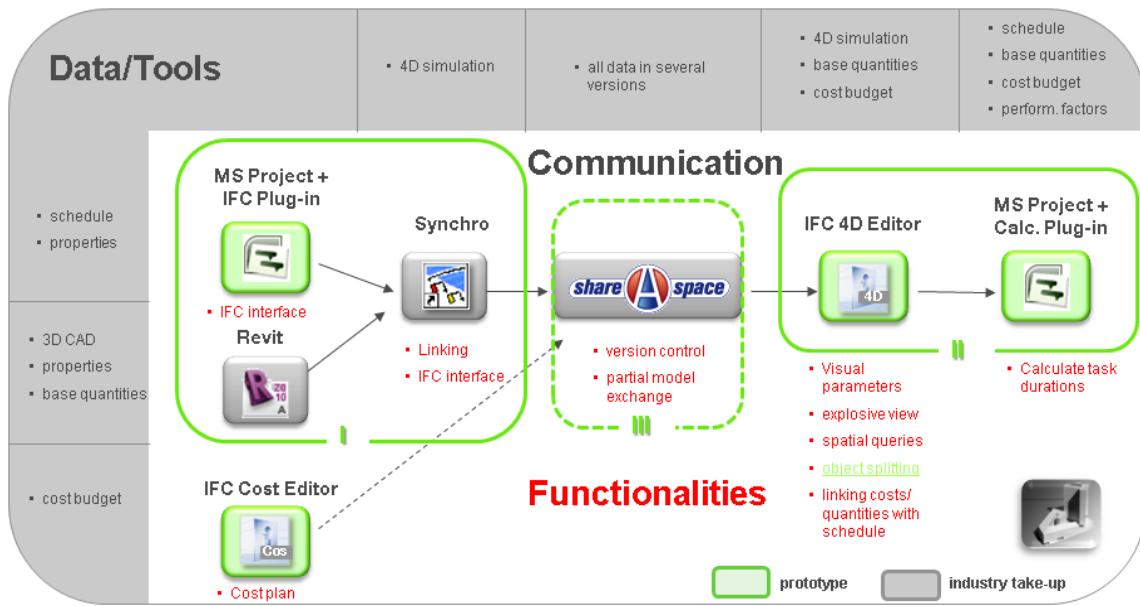


Abbildung 2: Überblick über Software, Funktionalitäten und Daten im Demonstrator

Diese Datei inklusive aller Vorgangsparameter wird zusammen mit dem BIM-Modell in Synchro eingelesen. Die Auto-matching Funktionalität vereinfacht das Verknüpfen der Vorgänge mit den entsprechenden Modellelementen anhand von (Wenn-Dann)-Regeln, die sich auf relevante Vorgangs- und Modellparameter beziehen, siehe Abbildung 3. Das resultierende 4D Modell kann dann mit der IFC Datei synchronisiert werden, um Vorgänge und Verknüpfungen zu ergänzen.

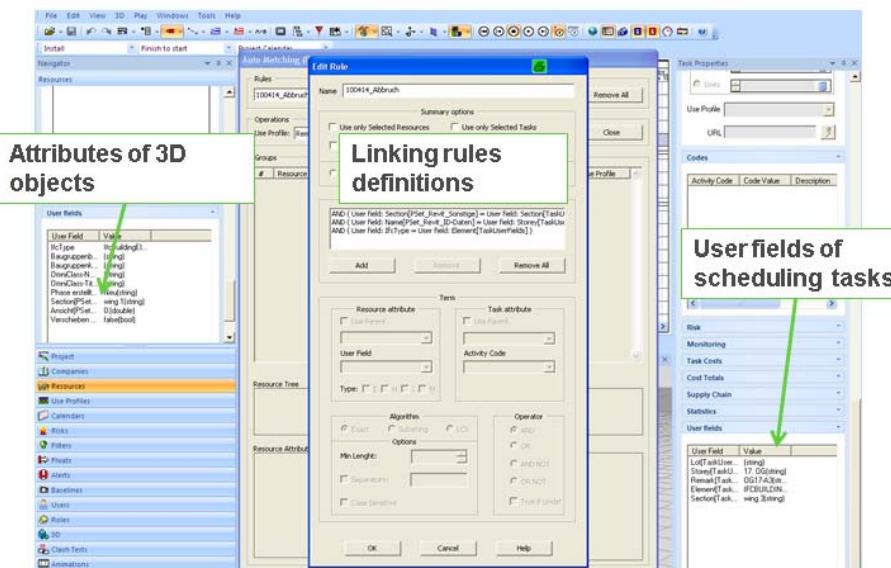


Abbildung 3: Auto matching Funktionalität in Synchro

Der Abschnitt II beschäftigt sich mit dem Bearbeiten und Ändern eines 4D Modells. Dieses wurde mit dem HOCHTIEF Prototyp „Scheduling Assistant“ umgesetzt, in dem das in Synchro entwickelte 4D Modell mittels IFC importiert wird. Hier sind weitere Funktionalitäten entwickelt, die den Terminplaner bei seiner Arbeit unterstützen (Tulke 2008), wie:

- Etagenverschiebung, welche die Betrachtung des Ablaufes innerhalb der einzelnen Etagen ermöglicht und besonders bei Ausbauarbeiten von großem Nutzen ist,
- Definition von Zonen, welche die Festlegung neuer Bauabschnitte ermöglicht,
- Räumliche Auswahl mittels Zonen und Achsen,
- Mengenzusammenstellung, welche einer spezifischen Auswahl von Objekten entsprechende Mengenzusammenstellung wiedergibt. Diese Mengen können dann über die COM-Schnittstelle in MS-Project übertragen werden.

Die Abbildung 4 zeigt eine weitere Funktionalität, die in dem Prototyp entwickelt und später auch in Synchro integriert wurde. Diese Funktionalität hilft dem Terminplaner CAD-Objekte innerhalb des 4D Editors gemäß geplanter Bauabschnitte zu teilen, ohne dafür in ein CAD-System wechseln zu müssen.

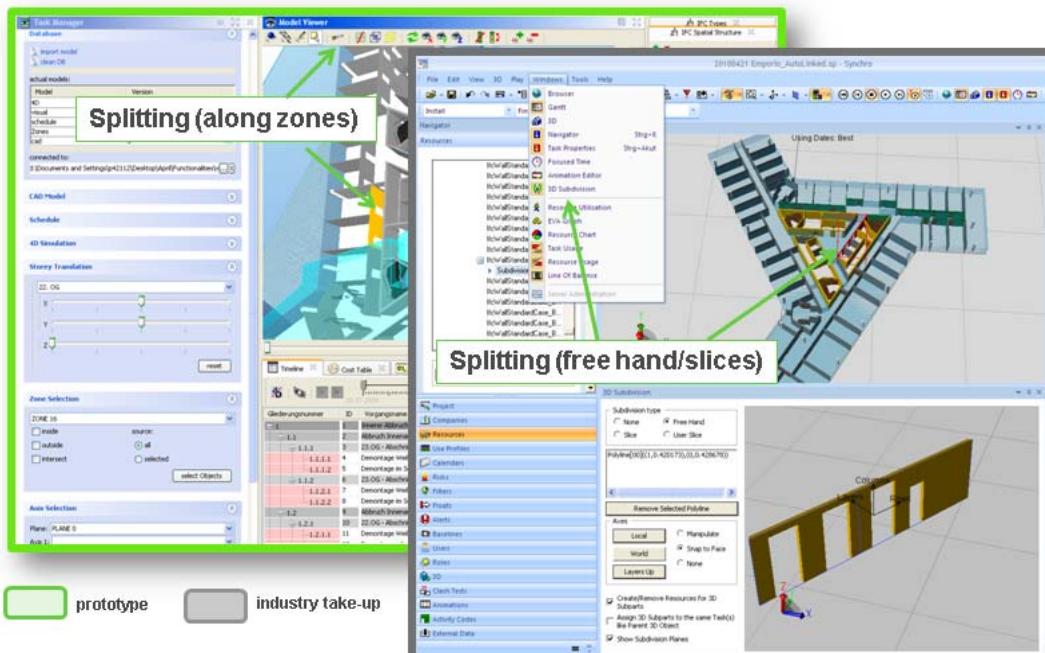


Abbildung 4: Objektteilung in „Scheduling Assistant“ und Synchro

Der Abschnitt III geht auf die Zusammenarbeit via Modelserver (Produktnamen Share-A-Space der Firma EUROSTEP) ein. Der Terminplaner kann sich hier einloggen und einen Teil des Terminplans anzeigen oder bearbeiten. Die Abbildung 5 zeigt den Terminplan für eine einzige Etage, wobei hier nur ein grobes Modell geladen ist.

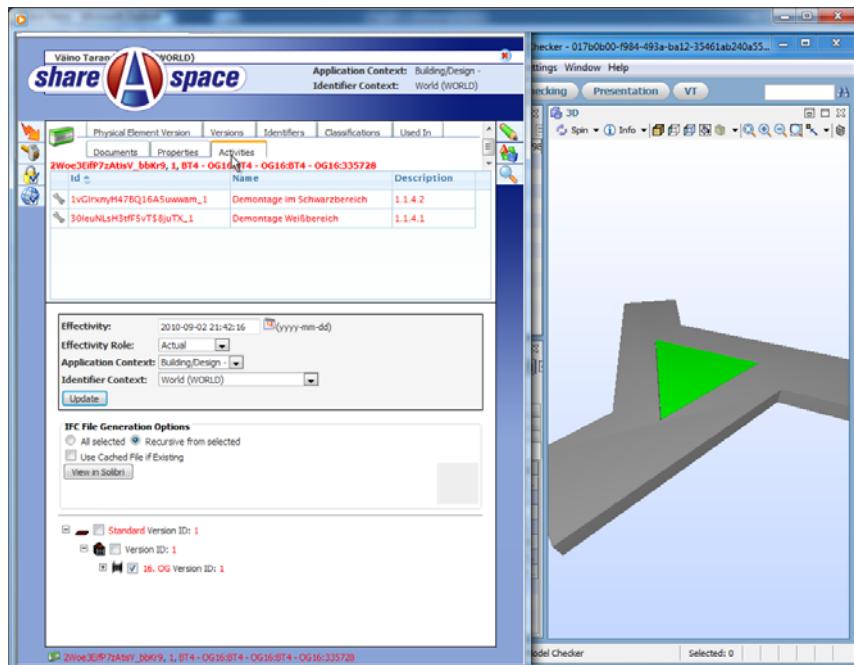


Abbildung 5: Ausgewählter Terminplananteil ist geladen (hier die 16. Etage)

Wenn der Terminplaner beispielsweise die Dauer für einige Vorgänge ändert und das Modell auf dem Server ablegt, werden diese Vorgänge als eine neue Version deklariert, siehe Abbildung 6.

A dialog box is displayed, showing a table of activities with four columns: Name, DateStart, and DateEnd. There are two rows of data:

	Name	DateStart	DateEnd
7BQ16A5uwam_2	Demontage im Schwarzbereich	2009-08-19 10:00:00	2009-08-21 19:00:00
HF5vTs8uTX_2	Demontage Weißbereich	2009-08-10 10:00:00	2009-08-17 19:00:00
7BQ16A5uwam_1	Demontage im Schwarzbereich	2009-08-19 10:00:00	2009-08-21 19:00:00
HF5vTs8uTX_1	Demontage Weißbereich	2009-08-10 10:00:00	2009-08-14 19:00:00

At the bottom right of the dialog box is a 'Close' button.

Abbildung 6: Zwei Versionen von Vorgängen

Die wesentlichen Beiträge dieses Teils der Forschungsarbeit sind:

- Integration des Terminplanungsprozesses in das heterogene Projektnetzwerk durch **Weiterentwicklung** der IFC Schnittstelle und somit die **IFC-basierte Kommunikation**. Dies steigert die Effizienz der Terminplanung insofern, dass Daten weiterverwendet werden können.
- **Verbesserung von 4D Editoren**, um die Anforderungen der Terminplanung **hinsichtlich weiterer Funktionalitäten** und Schnittstellen zu erfüllen.
- Weiterleitung der Forschungsergebnisse an Industriepartner um eine **kommerzielle Implementierung** zu veranlassen.

## 4 Modellbasierte Simulation

Um eine detailliertere Analyse und breitere Betrachtung von Varianten im Rahmen der Bauprozessplanung zu ermöglichen, sollen die beiden Planungstechniken Terminplanung und Simulation gleichermaßen an eine aktuell immer mehr Verbreitung erlangende BIM-Umgebung angebunden werden, siehe Abbildung 7.

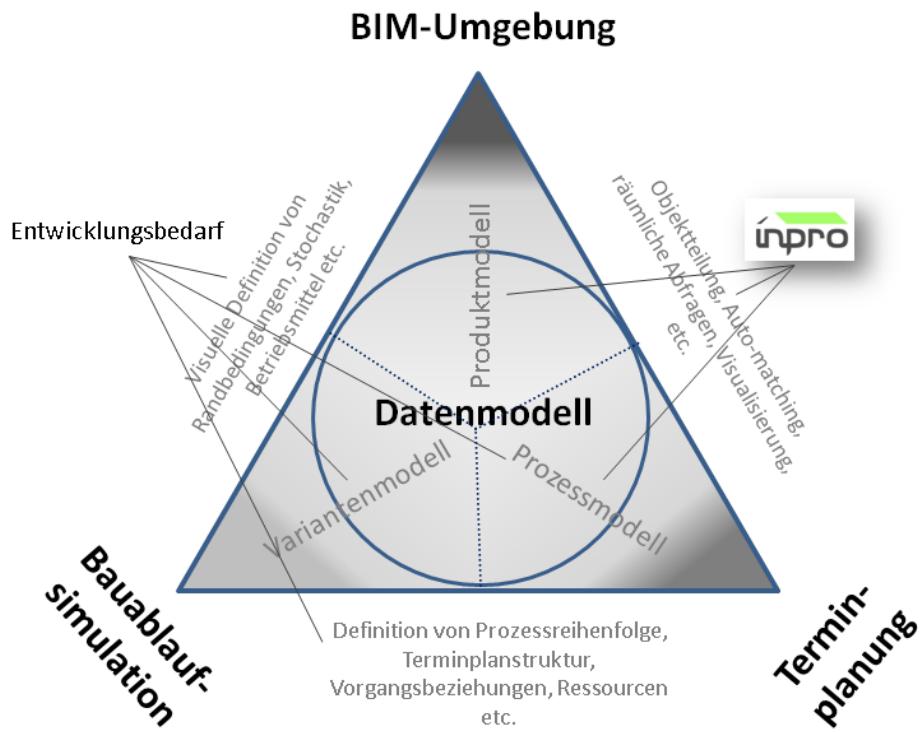


Abbildung 7: Erweiterte Anbindung der baubetrieblichen Planungstechniken an BIM-Umgebung

Diese Anbindung kann analog zu den im Forschungsprojekt InPro gemachten Erfahrungen auf zweierlei Weisen vorangetrieben werden:

- Weiterentwicklung und Implementierung von standardisierten Schnittstellen (neutrales Datenmodell) für einen reibungslosen Datenaustausch und eine erleichterte Kommunikation innerhalb des Projektteams.
- Entwicklung von speziellen Softwarefunktionalitäten für eine effiziente, BIM-orientierte Arbeitsweise zwecks Reduzierung des Aufwands und Ermöglichung der Wiederverwendung von in anderen Fachdisziplinen bereits erstellten Daten.

Auf der Planungsseite werden Hochbau-, Ingenieurbau und Infrastrukturprojekte mit unterschiedlichen Softwareprodukten und Datenmodellen bearbeitet. Diese Unterschiede sind durch die anders geartete Geometrie, Materialien und Ausdehnung der Baustelle usw. gegeben. Auf der baubetrieblichen Seite werden die Projekte jedoch trotz Unterschieden in den eingesetzten Betriebsmitteln, Bauprozessen und Randbedingungen mit den gleichen Planungstools analysiert. Auch die Simulation eignet sich für die unterschiedlichsten Fragestellungen aus dem Hoch- und Ingenieurbau im gleichen Maße, wie viele Veröffentlichungen zeigen. Die Kopplung von Prozessmodellen mit unterschiedlichen Produktmodellen ist zudem Gegenstand jüngster Veröffentlichungen und Forschungsprojekte, die sich mit Simulation beschäftigen. Dabei ist hier der Trend zur Nutzung von standardisierten Schnittstellen erkennbar (ForBAU und Mefisto).

Die Erfahrungen aus dem InPro Projekt im Bereich der modellbasierten Terminplanung zeigen, dass die relevanten Daten bereits weitestgehend im Datenmodell (hier IFC2x3, IFC2x4) abgebildet werden können. Die Einschränkungen der Planungstools (Terminplanungssoftware bzw. 4D Editoren) hinsichtlich einer IFC Schnittstelle bzw. des Zugangs zu erforderlichen Daten konnten mit vertretbarem Implementierungsaufwand aufgehoben werden. Eine enge Zusammenarbeit mit den Softwareentwicklern ist jedoch notwendig, um die Datenqualität sowohl auf Produktmodell- als auch auf Prozessmodellseite sicherzustellen. Die Bereitstellung von zusätzlichen Funktionalitäten wie beispielsweise die Objektteilung, regelbasierte Erstellung von Verknüpfungen, räumliche Anfragen usw. führte, wie oben erläutert, zu einer deutlich effektiveren Bearbeitung der BIM-Daten innerhalb der Planungstools.

Sowohl die Simulation als auch die Terminplanung haben die Analyse und Planung der Bauprozesse unter Berücksichtigung projektspezifischer Randbedingungen zum Ziel. Daher sind die zugrundeliegenden Daten beider Methoden im Prozessmodell abzubilden. Dafür muss zum Einen das üblicherweise verwendete **Prozessmodell um die Belange der Simulation erweitert werden**. Zum Anderen liegen die Vorteile der Simulation gegenüber der Terminplanung in der dynamischen und stochastischen Analyse sowie Variantenuntersuchung und realitätsnäherer Betrachtung der Betriebsmittel, was an sich die **Erweiterung des Datenmodells um ein Variantenmodell** erfordert, siehe Abbildung 8. Dies kann nur durch eine enge Zusammenarbeit mit den entsprechenden Organisationen (Arbeitskreis Simulation, buildingSMART oder ähnliche) entwickelt werden. Wobei die Diskussion dieser Technik und ihrer Vorteile in den entsprechenden Gremien zugleich zum Bekanntheitsgrad der Simulation von Bauprozessen beiträgt. Damit die Simulation den Zugang zu einer BIM-Umgebung und dadurch eine breitere Anwendung in der Praxis findet, ist es wichtig, dass sie sich an der Terminplanung, die auch als praxisetabliert gilt, orientiert. Die Abbildung 7 zeigt daher als Entwicklungsszenario eine Erweiterung ausgehend von in der Praxis bereits verwendeten Produkt- und Prozessmodellen.

Hinsichtlich der **erforderlichen Funktionalitäten** ist prinzipiell die Erstellung eines projektspezifischen Simulationsmodells zur Abbildung der Bauablaufprozesse und die Extraktion von entsprechenden Eingangsdaten und Randbedingungen aus

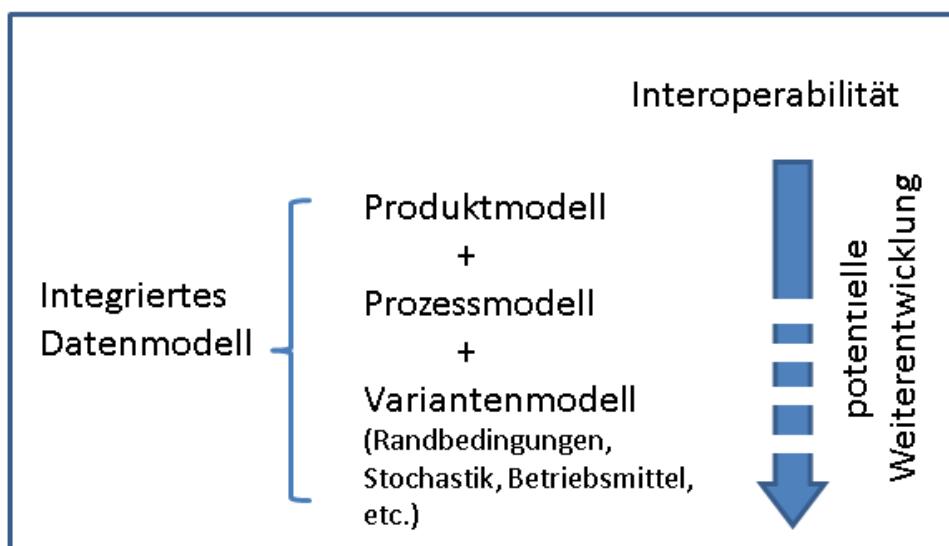


Abbildung 8: Erweiterung des Datenmodells

dem BIM-Modell zu vereinfachen. Im Zusammenhang mit einer BIM-basierten Umgebung stellt zudem die praxisgerechte Entwicklung von Funktionalitäten zur Generierung und Bearbeitung von Varianten (*Tauscher et. al. 2009*) der Durchführung von Experimenten und der Integration von Stochastik in Verbindung mit einer speziellen für den Bauablaufplaner zugeschnittenen visuellen Oberfläche (erweiterter 4D Editor) mit Anbindung entsprechender Simulatoren eine weitere Herausforderung für die Forschung dar.

Ebenso sind erforderliche Funktionalitäten zum Einbeziehen von in der Terminplanung definierten Prozessreihenfolgen, Vorgangsbeziehungen, Ressourcen, usw. innerhalb der Simulationsumgebung zu entwickeln. Die Erfahrungen aus InPro zeigen zudem, dass die **Entwicklung neuer Werkzeuge grundsätzlich anhand von konkreten Anwendungsfällen**, welche die Beziehung zwischen BIM-, Terminplanungs- und Simulationstechniken verdeutlichen, erfolgen sollte. Beispielhafte Anwendungsfälle der Simulation können sein:

- vorhandene Terminpläne durch weitere Variantenanalysen verbessern,
- vorhandene Terminpläne validieren,
- entsprechende Terminpläne generieren.

Für die definierten Anwendungsfälle sind dann die Rollen eines die Simulation ausführenden Planers, seine Eingangs- und Ausgangsdaten (auch im Zusammenhang mit der Terminplanung) zu spezifizieren. Bzgl. einer prinzipiellen Systematik bei der Entwicklung und Etablierung neuer Arbeitsweisen wie der Simulation von Bauprozessen wird auf *Tulke 2010b* verwiesen.

## 5 Fazit

Der Beitrag zeigt, dass die Anbindung der Terminplanung an eine BIM-Umgebung ein schon weit beschrittener Entwicklungsprozess ist. Das an sich ebnet den Weg für die zusätzliche Integration der Simulation. Anforderungen an Datenmodelle und Softwarewerkzeuge wurden im Zusammenhang mit der Terminplanung erörtert. Aus der Sicht der baubetrieblichen Praxis sind folgende Schritte sinnvoll:

- die Integration aller drei Techniken, also Terminplanung, Simulation und BIM, auf Basis konkreter praxisrelevanter Anwendungsfälle,
- eine den Anforderungen dieser drei Techniken entsprechende Erweiterung eines einheitlichen, standardisierten Datenmodells,
- die Definition und Umsetzung erforderlicher Funktionalitäten zur Datenbearbeitung,
- die Entwicklung einer einheitlichen Benutzeroberfläche für den Bauablaufplaner.

Auf Basis dieser Entwicklungen wird für die Simulation ein Platz innerhalb des künftigen Projektnetzwerks definiert und ein Zugang dieser Technik zur Praxis geschaffen.

## Literatur

*AbouRizk, S.; Mather, K. (2000): Simplifying simulation modeling through integration with 3D CAD. Journal of Construction Engineering and Management, Jg. 126, H. 6, p. 375-483.*

*Chahrour, R. (2007): Integration von CAD und Simulation auf Basis von Produktmodellen im Erdbau. Dissertation, Universität Kassel.*

*Franz, V. (1999): Simulation von Bauprozessen mit Hilfe von Petri-Netzen. 13. Symposium in Weimar. ASIM Fortschritte in der Simulationstechnik, Weimar.*

*Gao, J.; Fischer, M. (2008): Framework & case studies comparing implementations & impacts of 3D/4D modeling across projects. CIFE technical report #TR172, Stanford university.*

*Hartmann, T.; Neuberg, F.; Fischer, M. (2007): Integrating three-dimentional product models into engineering and construction project information platforms. Proceedings of Bringing ITC Knowledge to Work, 2007.*

*König, M.; Beißert, U.; Bargstädt, H.-J. (2007): Visual Simulation - An Appropriate Approach to Support Execution Planning in Building Engineering. Proc. Of the 7<sup>th</sup> International Conference of Construction Applications of Virtual Reality ConVr, 2007.*

*Schorr, M.; Borrmann, A.; Klaubert, C.; Ji, Y.; Günthner, W.; Rank, E. (2010): A Product Lifecycle Management Approach for Civil Engineering Projects. Proc. of the 27th CIB-W78 Conference. Cairo, Egypt, November 2010.*

*Staub, S.; Fischer, M.; Spradlin, M (1998): Industrial case study of design, cost and schedule integration. Working paper No. 48 Center for Integrated Facility Engineering, Stanford university, 1998.*

*Tauscher, E.; Mikulakova, E.; König, M.; Beucke, K. (2009): Automated Generation of Construction Schedules based on the IFC Object Model. ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering, Austin, Texas, U.S..*

*Tulke, J.; Nour, M.; Beucke, K. (2008): A Dynamic Framework for Construction Scheduling based on BIM using IFC. Creating and Renewing Urban Structures-Tall Building, Bridges and Infrastructure, 17th Congress Report of IABSE-Chicago, 2008.*

*Tulke, J. (2010a): Kollaborative Terminplanung auf Basis von Bauwerksinformationsmodellen. Dissertation Universität Weimar, 2010.*

*Tulke, J. (2010b): Die Einführung der modellbasierten Arbeitsweise im Bauprozessmanagement-BPM goes BIM. Festschrift Professor Hirschfeld „Innovationen im Konstruktiven Ingenieurbau-Methoden-Materialien-Bauwerk, Ruhr Universität Bochum, Bauhaus-Universität Weimar, HOCHTIEF.*

*Weise, M.; Liebich, T.; Tulke, J.; Bonsma, P. (2009a): CIB w78 Istanbul. IFC support for model-based scheduling.*

*Weise, M.; Liebich, T.; Tulke, J.; Bonsma, P. (2009b): Discussion Paper: IFC support for model-based scheduling, <http://www.inpro-project.eu/publications.asp>.*



Dipl.-Ing. Basel Kordi,  
Dipl.-Ing. Martin Kugler,  
Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz

## **Entwicklung eines Prozessmodells für die Simulation der Ablaufplanung für Roh- und Ausbauarbeiten**

Dipl.-Ing. Basel Kordi  
Dipl.-Ing. Martin Kugler  
Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz  
Universität Kassel, Institut für Bauwirtschaft  
Fachgebiet Bauorganisation und Bauverfahren  
Mönchebergstraße 7, 34125 Kassel

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	83
1 Einleitung .....	83
2 Prozessmodellierung in der Literatur.....	84
3 Entwicklung eines Modellierungsansatzes für Rohbauarbeiten .....	86
4 Erweiterung des Prozessmodells für den Ausbau.....	89
5 Ausblick.....	91
Literatur.....	91

## Kurzfassung

Viele Forschungsprojekte im Bereich des Baubetriebs befassen sich mit der Simulation des Bauablaufplans. Bei jedem Simulationssystem wird zunächst der Bauprozess in einem Prozessmodell abgebildet. Das Prozessmodell soll die relevanten Daten des Bauprozesses erfassen, damit die Simulation brauchbare Ergebnisse liefert. In diesem Beitrag wird ein Prozessmodell für die Simulation der Bauablaufplanung für Rohbauarbeiten entwickelt. Das Prozessmodell wird in einem weiteren Schritt modifiziert, damit die Besonderheiten der Ausbauarbeiten berücksichtigen werden können. Neben der Simulation werden die zwei Prozessmodelle auch für die CAD-basierte und automatische Generierung von Terminplänen verwendet.

## 1 Einleitung

Ein Projekt ist nach der DIN-Definition ein Vorhaben, „*das im Wesentlichen durch die Einmaligkeit der Bedingungen in ihrer Gesamtheit gekennzeichnet ist*“ (DIN 69901-5). Zusätzlich zu diesen Besonderheiten eines Projektes sind Bauprojekte vor allem durch den Unikatcharakter gekennzeichnet. Ein Bauprojekt ist also in der Regel durch seine Neuartigkeit, Einmaligkeit, Komplexität und die Vielzahl an Beteiligten gekennzeichnet, d. h., dass z. B. die Randbedingung oder die Gebäudegrundrisse bei jedem Bauprojekt anders sind. Diese Besonderheiten des Bauprojektes erschweren die Planung und ihre Optimierung, so dass der Planungsprozess nur beschränkt standardisiert werden kann. Im Gegensatz zu der stationären Industrie kann ein „Muster-Vorgehen“ bei der Planung der einzelnen Prozesse bei Bauprojekten nur bedingt angewendet werden. Zur Unterstützung des Planungsprozesses von Bauprojekten kommt die Simulation des Bauablaufes zum Einsatz. Mehrere Forschungsvorhaben national sowie international beschäftigen sich mit der Simulation von Prozessen im Hoch- sowie im Tiefbau. Anhand der Simulation können mehrere Ablaufvarianten untersucht werden, um den geeigneten Bauablauf zu bestimmen. Dadurch sollen unter anderem kürzere Bauzeiten sowie eine verbesserte Termin- und Ressourcenplanung erreicht werden. Die Simulation von Bauprozessen soll zusätzlich die Identifizierung von Schnittstellen zwischen den Gewerken verbessern und so zu besserer Kommunikation zwischen den Beteiligten führen.

ten führen. Allerdings konnte sich die Simulation in der Baupraxis bisher nur beschränkt durchsetzen, da der Aufwand bei der Vorbereitung der Simulation bei den meisten verfügbaren Simulationssystemen sehr groß ist. Hinzu kommt, dass eine große Zahl an Parametern zu erfassen ist, die in die Simulation einfließen sollen.

Einer der ersten Schritte bei der Entwicklung eines Simulationssystems besteht darin ein Prozessmodell zu entwickeln. Mit einem Prozessmodell werden die Systemprozesse – hier der Bauablauf – abgebildet. Ein Prozessmodell muss zwar nicht alle Attribute des originalen Systemablaufs erfassen, soll aber alle wichtigen Details des Originals enthalten, so dass realitätsnahe Simulationsläufe verwendbare Ergebnisse liefern.

## 2 Prozessmodellierung in der Literatur

Viele Forschungsprojekte im Bereich des Baubetriebs beschäftigten sich mit der Modellierung von Bauprozessen, um den Bauprozess zu untersuchen oder um anhand des erstellten Modells den Bauablauf zu simulieren.

Die Modellierung mit Petri-Netzen zählt zu den ältesten Modellierungsmethoden von Prozessen. Ein Petri-Netz ist ein gerichteter Graph, der aus zwei Knoten (Stellen und Transitionen) besteht. Die Modellierung von Bauprozessen mit Petri-Netzen wurde von *Franz (1989)* erprobt. Damit die Besonderheiten von Bauprozessen berücksichtigt werden konnten, wurden Modifizierungen durchgeführt. Diese Modellierungsmethode wurde später auch von anderen Forschern eingesetzt. Beispielsweise hat *Chahrour (2007)* für die Simulation von Erdbauarbeiten bei Straßenbauprojekten eine Petri-Netz-basierte Modellierung verwendet. Dabei konnte die Verwendung von einfachen Petri-Netzen die Anforderung nicht erfüllen, deshalb wurden high-level Petri-Netze (die Prädikat-Transitions-Netze; PrT-Netze) eingesetzt.

Die Verwendung von Produktmodellen ist ein weiterer Ansatz bei der Modellierung von Bauprozessen. Das Bauprojekt wird bei diesem Ansatz als Produkt betrachtet. Alle Daten des Produktes werden strukturiert gespeichert und verknüpft. Beispiele für diese Daten bei Bauprojekten sind die geometrischen Daten aus den CAD-Dateien, die Mengen, die Ressourcen und die Kosten. Verwendet wurde dieser

Modellierungsansatz bei Bauprojekten von *Kuhne et al.* (2000). Sie entwickelten ein einheitliches Produktionsmodell, das aus einem Produktmodell und einem Prozessmodell besteht. Mit dem Produktmodell werden das Bauwerk, die Bauteile und die Relationen zwischen den Bauteilen beschrieben. Das Prozessmodell beschreibt die Vorgänge, Ablaufstruktur, Herstellungsverfahren und die benötigten Ressourcen. Bild 1 verdeutlicht die Zusammensetzung des Produktionsmodells.

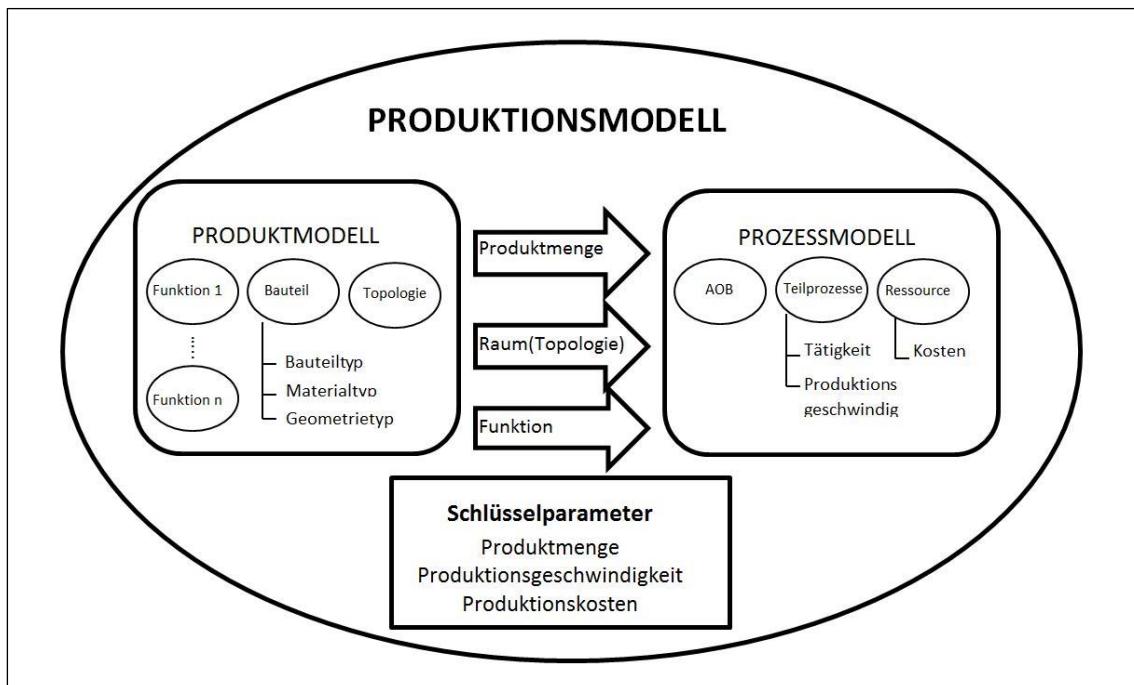


Bild 1: Produktionsmodell (Kuhne et al. 2000)

Ein weiterer Modellierungsansatz für Bauprozesse wurde an der technischen Universität Berlin von *Huhnt* (2007) entwickelt. Dabei steht die Beschreibung des Bauwerkes im Mittelpunkt. Das Bauwerk wird in Bauteile zerlegt. Ein Bauteil ist z. B. eine Wand oder Decke. Für jedes Bauteil werden Zustände angegeben, die das Bauteil im Laufe des Projektes annimmt. Die Reihenfolge dieser Zustände ist auch anzugeben. Dann werden die Bauteile Gruppen (Bauteiltypen) zugeordnet. Zu einer Gruppe (Bauteiltyp) gehören die Bauteile, die die gleichen Zustände in der gleichen Reihenfolge annehmen. Aus dieser Beschreibung des Bauwerkes ergeben sich die Vorgänge, so dass ein Vorgang den Prozess beschreibt, den das Bauteil von einem Zustand in den nächsten versetzt. Damit werden die Voraussetzungen für jeden Vorgang definiert, siehe hierzu Bild 2.

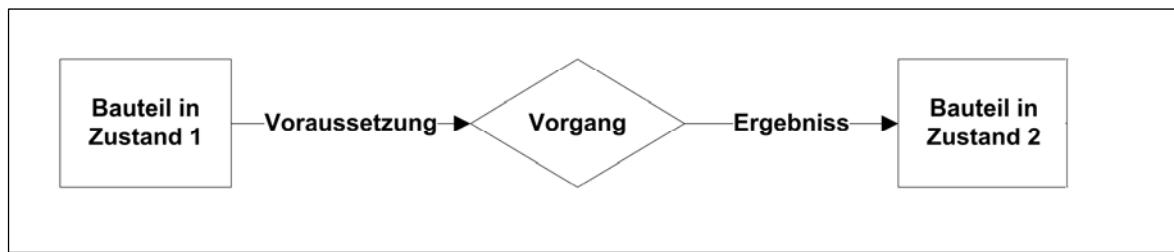


Bild 2: Definition der Vorgänge und ihre Voraussetzung (Huhnt 2007)

Anhand dieses Prozessmodellierungsansatzes lässt sich ein Ablaufplan erstellen, der Vorgänge und ihre Abhängigkeiten enthält. Dieser Ablaufplan beschreibt zwar die Logik des Ablaufes, berücksichtigt aber den Projektstrukturplan nicht. Bei der Nacharbeitung des Ablaufplans sollen die Dauern der Vorgänge berechnet werden.

### 3 Entwicklung eines Modellierungsansatzes für Rohbauarbeiten

Im Rahmen eines von der DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) geförderten Forschungsprojektes wurde am Institut für Bauwirtschaft an der Universität Kassel ein eigener Prozessmodellierungsansatz für den Hochbau entwickelt. Das entwickelte Prozessmodell bildet einen Teil von einem Gesamtsystem ab, das für die Simulation des Bauablaufes entwickelt wurde. Dabei wird das Gebäudemodell mit einem Prozessmodell verknüpft. Der Vorteil dieser Verknüpfung besteht darin, dass die im CAD-Modell enthaltenen Daten weiterverwendet werden können. Beispiele für diese Daten sind die geometrischen Daten (Koordinaten von Bauteilen), Dimensionen von Bauteilen und Mengen.

Die Integration von Prozess- und Gebäudemodell ist bereits bei mehreren Forschungsprojekten erfolgt, siehe hierzu *Fischer und Aalami (1996)*, *Weber (2006)* und *Chahrou (2007)*.

Bei dem entwickelten Prozessmodell werden die Vorgänge in Anlehnung an den Prozessmodellierungsansatz von *Huhnt und Enge (2007)* abgeleitet. Das Bauwerk wird in Bauteile zerlegt, was bei einem Gebäudemodell der Fall ist. Danach werden Bauteiltypen festgelegt und für diese Bauteiltypen Zustände definiert. Die Vorgänge lassen sich dann aus der Definition der Zustände ableiten. Zusätzlich wird das Prozessmodell noch um Bauverfahren, Teilverfahren und Bauteileigen-

schaften erweitert. Das Modell ermöglicht die Definition von Verfahren, die den Bauteiltypen zugeordnet werden können (siehe Bild 3). Mit dem Verfahren wird der Produktionsprozess eines Bauteiltypen beschrieben. Ein Verfahren besteht aus einer beliebigen Zahl an Vorgängen. Jeder Vorgang darf von nur einem bestimmten Gewerk ausgeführt werden. Das Modell erlaubt die Zuordnung von Voraussetzungen zwischen den Vorgängen. Die Voraussetzungen lassen sich durch geometrische und zeitliche Relationen zu den Ergebnissen anderer Vorgänge definieren. Unter zeitlichen Relationen werden die üblichen Anordnungsbeziehungen (Ende-Anfang, Ende-Ende, Anfang-Anfang und Anfang-Ende) verstanden. Die geometrischen Relationen beziehen sich auf die Geschosse, Abschnitte, Räume und Bauteile, wobei es nicht zulässig ist, einen direkten Bezug auf ein bestimmtes Bauteil zu definieren. Das hat den Vorteil, dass sich die Voraussetzungen für alle Bauteile eines Bauteiltyps allgemeingültig definieren lassen. Jedem Vorgang soll mindestens eine Voraussetzung zugeordnet werden. Jeder Vorgang besteht wiederum aus mindestens einem Teilvergange. Die Teilvergänge eines Vorganges sind die letzte Ebene bei der Betrachtung dieses Modells. Die Teilvergänge eines Vorganges dürfen nur nacheinander ausgeführt werden und dürfen keine Verknüpfungen zu anderen Vorgängen und Teilvergängen haben. Die Ressourcen (Material und Betriebsmittel) werden erst auf dieser Ebene vergeben und den Teilvergängen zugeordnet.

Die Dauer eines Vorganges setzt sich aus der Summe der Dauern der Teilvergänge dieses Vorganges zusammen, deshalb werden die Zeitaufwandswerte mit den Teilvergängen verknüpft.

*„Ob ein Vorgang an einem Bauteil tatsächlich ausgeführt wird, kann von selbstdefinierbaren Bauteileigenschaften abhängig gemacht werden. Dadurch lässt sich eine größere Menge von Bauteilen (z. B. das komplette Außenmauerwerk) zu einem Bauteiltyp zusammenfassen. Nur wenn eine Eigenschaft auf ein Bauteil eines Bauteiltyps zutrifft, wird der mit der Eigenschaft verknüpfte Vorgang auch tatsächlich ausgeführt“ (Kugler 2009, S. 36).*

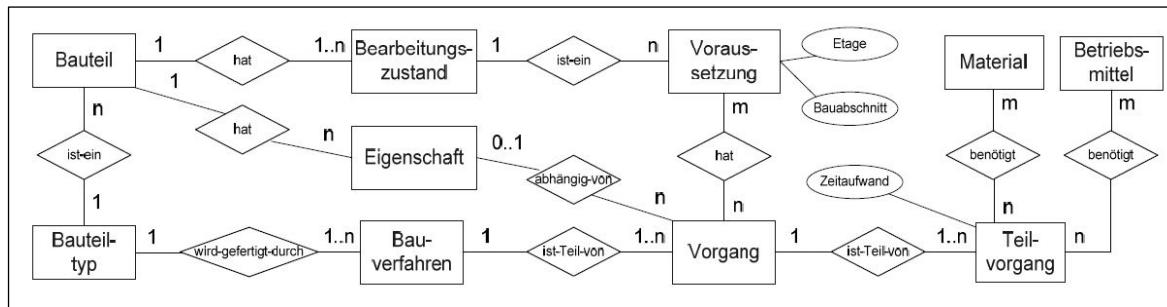


Bild 3: Entity-Relationship-Modell der prozessrelevanten Daten (Kugler 2009)

Im Folgenden wird anhand eines Beispiels die Verwendung des Prozessmodells veranschaulicht:

Ein Bauwerk hat drei Decken (Dicke: 30 cm), die mit Trägerschalung vor Ort betoniert werden sollen.

- Die drei Decken (Bauteile) gehören zum **Bauteiltyp**: Decke 30 cm.
- **Verfahren**: Decke herstellen mit Trägerschalung.
- Dem Bauteiltyp (Decke 30 cm) wird das oben genannte Verfahren zugeordnet.
- Das Verfahren hat vier **Vorgänge**: Einschalen, Bewehren, Betonieren und Ausschalen.
- Der Vorgang Einschalen besteht aus zwei **Teilvorgängen** (Decke mit Systemelementen schalen, Passteile herstellen und einschalen). Die Reihenfolge der Teilvorgänge wird bestimmt. Zeitaufwandswerte werden für die Teilvorgänge angegeben. Den Teilvorgängen werden Material und Betriebsmittel zugeordnet.
- **Voraussetzungen**: Es wird beispielsweise die in Tabelle 1 dargestellte Voraussetzung für den Vorgang „Bewehren“ eingefügt.

Tabelle 1: Eine Voraussetzung des Vorgangs "Bewehren"

Vorgang	Voraussetzung	Geometrische Relation	Zeitliche Relation
Bewehren	Einschalen	In diesem Geschoss und in diesem Bauabschnitt	Ende-Anfang-Beziehung

## 4 Erweiterung des Prozessmodells für den Ausbau

Bei dem entwickelten Modellierungsansatz für Rohbauarbeiten werden die Verfahren den Bauteiltypen bzw. den Bauteilen zugeordnet, deshalb kann dieser Modellierungsansatz als „bauteilorientiert“ bezeichnet werden. Diese bauteilorientierte Betrachtung eignet sich für Rohbauarbeiten gut, da auf der Baustelle die meisten in dieser Bauphase auszuführenden Arbeiten die Herstellung von Bauteilen betreffen, weshalb diese Verfahren mit den Bauteilen in eine direkte Verbindung gebracht werden können.

Bei den Ausbauarbeiten kann diese bauteilorientierte Modellierung nur beschränkt eingesetzt werden, da bei dieser Bauphase Arbeiten vorkommen, die keinem bestimmten Bauteiltyp bzw. keinem bestimmten Bauteil zugeordnet werden können. Bei den Ausbauarbeiten lassen sich aber alle Verfahren mit Räumen, Bauabschnitten oder Geschossen verknüpfen, deshalb steht bei der Modellierung von Ausbauarbeiten der Raum und der Großraum (Bauabschnitt oder Geschoss) im Mittelpunkt. Ein Raum besteht aus mehreren Wänden, einem Boden und einer Decke. Ein Bauabschnitt oder ein Geschoss wird als Großraum (GRaum) bezeichnet.

Bei dieser Prozessmodellierung soll die Verknüpfung mit dem Gebäudemodell weiterhin bestehen, deshalb wird auf das für die Rohbauarbeiten entwickelte Prozessmodell nicht verzichtet, sondern es erfolgt eine Modifizierung und Erweiterung des Prozessmodells. Das Bauwerk wird ebenfalls in Bauteile zerlegt und diese werden Bauteiltypen zugeordnet. Bei der Definition der Verfahren wird zwischen Verfahren für den Rohbau und Verfahren für den Ausbau unterschieden. Den Bauteiltypen werden Verfahren zugeordnet. Es werden bei diesem Schritt nur die Verfahren zugeordnet, die für alle Bauteile eines Bauteiltyps – ohne Ausnahmen – gelten. Danach werden die Räume definiert. Alle Verfahren von allen Bauteilen, die einem Raum angehören, werden dem entsprechenden Raum übergeben. Dem Raum werden zusätzliche Ausbauverfahren zugeordnet, die mit den Wänden oder dem Boden oder der Decke in Verbindung gebracht werden, oder die dem Raum direkt zugeordnet werden. Den Großräumen (Geschosse und Bauabschnitte) werden auch Ausbauverfahren zugeordnet. Die Ausbauverfahren bestehen ebenfalls aus Vorgängen, die wiederum aus Teilvorgängen bestehen. Den Teilvorgängen werden Materialien und Betriebsmittel zugewiesen. Für die Berechnung der Dau-

ern von Teiltätigkeiten werden Arbeitszeitrichtwerte und Mengen benötigt. Die Mengen lassen sich dann je nach der Art des Ausbauverfahrens (Verfahren die den Bauteilen, dem Raum oder dem GRaum zugeordnet sind) ermitteln.

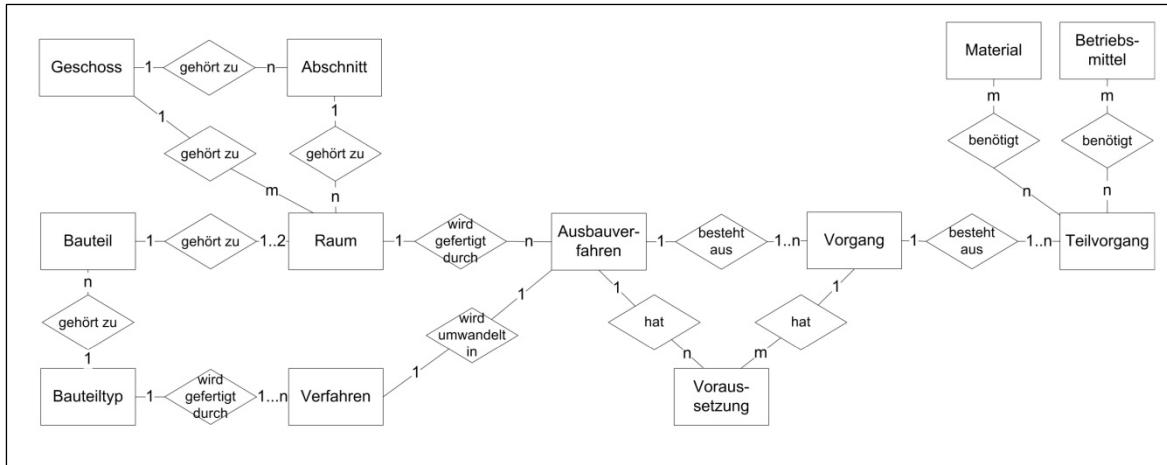


Bild 4: Entity-Relationship-Modell für Ausbauarbeiten

Das Prinzip der Voraussetzungen bei diesem Modellierungsansatz lässt sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Es kann zwischen zwei Arten der Voraussetzungen unterschieden werden. Die erste Art erlaubt die Verknüpfung zwischen den Ausbauverfahren. Voraussetzungen dieser Art haben nur einen zeitlichen Bezug, d. h. dass die Art der Abhängigkeitsbeziehung (E-A, E-E, A-E, AA) und der Zeitabstand definiert werden müssen. Mit der zweiten Art der Voraussetzungen werden die Abhängigkeiten zwischen den Vorgängen definiert. Diese Voraussetzungsart kann zwischen Vorgängen im gleichen Raum, Bauabschnitt oder Geschoss verwendet werden. Es besteht nicht die Möglichkeit, Ausbauverfahren oder Vorgänge von verschiedenen Geschossen zu verknüpfen.
- Wenn keine Voraussetzung zwischen zwei Verfahren im gleichen Bauabschnitt oder Geschoss vorhanden ist, dann dürfen die zwei Verfahren parallel ausgeführt werden. Dies ist in einem Raum aber nicht erlaubt, d. h. in einem Raum können zwei Verfahren nicht parallel ausgeführt werden, auch wenn keine Abhängigkeitsbeziehung zwischen den Verfahren vorhanden ist.

Bild 5 verdeutlicht das Prinzip der Voraussetzungen bei den Ausbauarbeiten.

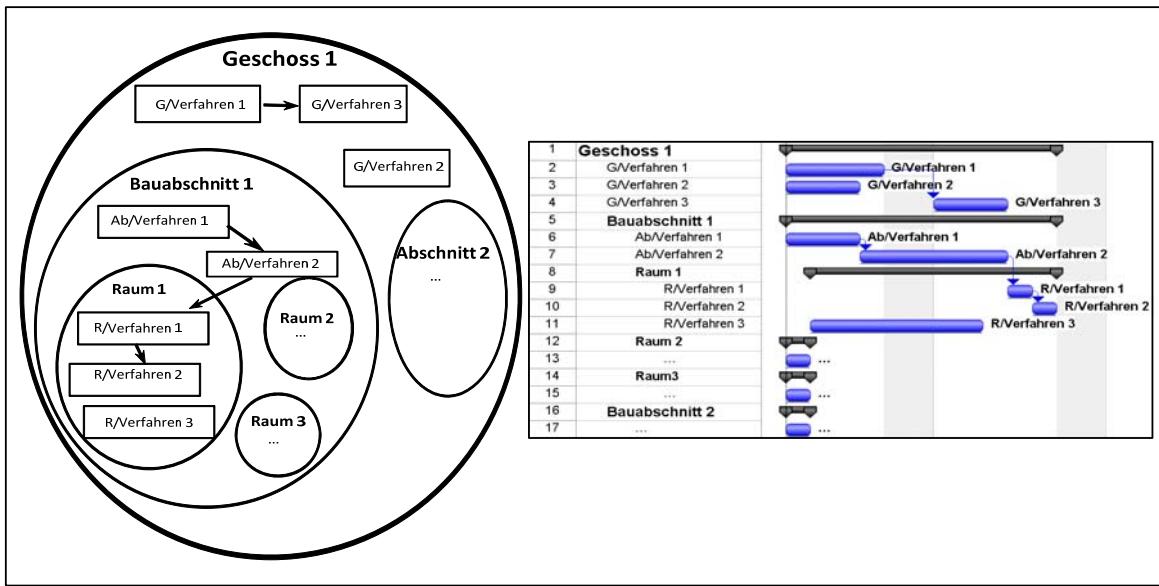


Bild 5: Das Prinzip der Voraussetzungen

## 5 Ausblick

Die zwei vorgestellten Modellierungsansätze haben zum einen den Vorteil, die Integration von Gebäude- und Prozessmodell umzusetzen. Zum anderen werden die Besonderheiten von Roh- und Ausbauarbeiten optimal berücksichtigt. Eine prototypische Implementierung ist am Fachgebiet Bauorganisation und Bauverfahren an der Universität Kassel bereits erfolgt. Dabei wurde das System CiSmo als Plug-In für die CAD-Anwendung AutoCAD Architecture programmiert. CiSmo ermöglicht eine Simulation des Bauablaufes sowie die automatische Erstellung von Terminplänen.

Bei den vorgestellten Modellierungsansätzen werden noch keine zweckmäßigen Abhängigkeiten modelliert. Diese Art der Abhängigkeiten werden als zwingende Abhängigkeiten behandelt. Die Berücksichtigung dieser Abhängigkeiten ist Gegenstand von zukünftigen Forschungsprojekten.

## Literatur

*Chahrou, R. (2007): Integration von CAD und Simulation auf Basis von Produktmodellen im Erdbau. Schriftenreihe Bauwirtschaft, Institut für Bauwirtschaft (Hrsg.), kassel university press GmbH, Kassel.*

*DIN 69901 (2009).* Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.

*Fischer, M. und Aalami, F. (1996): Scheduling with Computer-Interpretable Construction Method Models.* In: *Journal of Construction Engineering and Management.* ASCE 122 (1996) 4.

*Franz, V. (1989): Planung und Steuerung komplexer Bauprozesse durch die Simulation mit modifizierten höheren Petri-Netzen.* Dissertation, Gh Kassel.

*Huhnt, W. (2007): Technologische Abhängigkeiten zwischen Ausführungsvorgängen.* In: Liebchen, J.; Viering, M.; Zanner, C., Kochendörfer (Hrsg.): *Baumanagement und Bauökonomie.* Teubner Verlag, Wiesbaden, 2007.

*Huhnt, W. und Enge, F (2007): Simulationsmodelle für die Ausführung von Bauleistung.* In: Franz, V. (Hrsg.): *Tagungsband des 1. IBW-Workshop Simulation in der Bauwirtschaft.* September 2007, kassel university press, Kassel.

*Kugler, M. (2009): Prozessdatenmodell für die Simulation im Hochbau.* In: *Tagungsband des 20. Assistententreffens der Bereiche Bauwirtschaft, Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik.* Schriftenreihe Bauwirtschaft, Institut für Bauwirtschaft, kassel university press, Kassel.

*Kuhne, C. und Ripberger, A. und Aalami, F. und Fischer, M. und Schub, A. (2000): Neue Ansätze zur Projektplanung und Baustellensteuerung.* In: *Bauingenieur* (2000) 1, S 15-20.

*Weber J. (2006): Simulation von Logistikkonzepten auf Baustellen.* In: *Tagungsband der 12. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik.* Universität Kassel, September 2006, S. 571-580.

Dr. sc. techn. Peter Wotschke

und

Dipl.-Wirt.-Ing. Gregor Kindermann

## **Die Simulation des (un)gestörten Bauablaufs als Beweismittel in einem Streitfall**

Dr. sc. techn. Peter Wotschke

Dipl.-Wirt.-Ing. Gregor Kindermann

BMC – Baumanagement & Controlling AG

Parkstraße 23, 13187 Berlin

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	95
1 Motivation.....	95
1.1 Allgemein.....	95
1.2 Beispiel Wohn- und Geschäftshaus.....	96
2 Darstellung des ungestörten Bauablaufs .....	98
2.1 Allgemein.....	98
2.2 Beispiel Wohn- und Geschäftshaus.....	99
3 Darstellung des gestörten Bauablaufs .....	101
3.1 Allgemein.....	101
3.2 Beispiel Wohn- und Geschäftshaus.....	102
4 Fazit und Ausblick .....	107
Literatur .....	107

## Kurzfassung

Die störungsbedingte Überschreitung von ursprünglich vereinbarten Kosten- und Terminrahmen ist bei Großbaustellen sehr häufig anzutreffen. Dem Auftragnehmer kommt dabei die Aufgabe zu, darzulegen und zu beweisen, dass er Störungen im Bauablauf nicht zu vertreten und einen Anspruch auf damit verbundene finanzielle Forderungen hat. Ein derartiger Vortrag muss in der Regel für jede Einzelstörung bauablaufbezogen erfolgen.

Damit ein solcher Vortrag überhaupt gelingen kann, bedarf es einer belastbaren Grundlage, nämlich der Darstellung des ungestörten Bauablaufs. Der Auftragnehmer muss also zeigen, wie der Verlauf gewesen wäre, wenn der Auftraggeber ihn nicht gestört hätte. Ein solcher Bauablauf stellt eine rein hypothetische Be trachtung dar und wird in Streitfällen regelmäßig von der Auftraggeberseite in Frage gestellt. Das weitere Bestreiten der Wirkung von Störungen ist dann eine nahezu logische Folge daraus.

Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit kam der Simulation zum einen die Aufgabe zu, eine anschauliche und damit überzeugende Darstellung des ungestörten Bauablaufs vorzunehmen, um zwischen den Parteien Einvernehmen darüber herzustellen, dass der ursprünglich geplante Bauablauf grundsätzlich „baubar“ gewesen wäre.

Zum anderen sollte gezeigt werden, welche Auswirkungen konkrete Einzelstörungssachverhalte auf den geplanten Bauablauf haben mussten und welcher Bauzeitverlängerungsanspruch damit dem Auftragnehmer entstanden ist.

## 1 Motivation

### 1.1 Allgemein

Kaum ein großes Bauvorhaben wird derzeit im ursprünglich vereinbarten Kosten- und Terminrahmen fertiggestellt – prominente Beispiele dafür sind Flughafen Berlin-Brandenburg International (BBI) oder der Neubau der Zentrale des Bundesnachrichtendienstes (BMVBS, 2008).

Die Ursachen dafür können vielfältig sein und in unterschiedlichen Verantwortungsbereichen liegen. Sie können im Verantwortungsbereich des Auftraggebers liegen, wie beispielsweise im Falle von fehlenden Entscheidungen oder Änderungsanordnungen. Sie können aber auch im Verantwortungsbereich des Auftragnehmers liegen, wie beispielsweise im Falle von fehlender Leistungsbereitschaft oder Fehlkalkulation. Zudem gibt es Störungen, die von keiner der beteiligten Parteien zu vertreten sind, wie etwa Höhere Gewalt, Streik oder kriegerische Auseinandersetzungen.

Neben dem Problem der Verantwortlichkeit wird die Darstellung durch die zeitliche Überlagerung von Störungen und die Überlagerung von Fremd- und Eigenstörungen erschwert. Hinzu kommen die Eingriffe des Auftragnehmers, wie Ablaufumstellungen, Beschleunigungen, bereichsweise Unterbrechungen und Wiederaufnahmen der Arbeiten, die er vornimmt, um die Auswirkungen der Störungen zu kompensieren, oder zumindest zu mindern (vgl. Schadensminderungspflicht gem. §6 Abs. 3 VOB/B).

Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit wurde ein Lösungsansatz entwickelt, um einem Auftragnehmer die erforderliche Darstellung zu ermöglichen.

## 1.2 Beispiel Wohn- und Geschäftshaus

Bei dem vorliegenden Bauvorhaben handelt es sich um eine Baulückenschließung. Die Bebauung umfasst den Neubau eines Wohn-/ Geschäftshauses mit Tiefgarage, Erdgeschoß, 6 Obergeschossen und Dachgeschoß. Das Gebäude hat 2 getrennte Erschließungen (Aufgang A, Aufgang B), bestehend aus Treppenhaus und Aufzugsanlage.

Die Tiefgarage erstreckt sich über die gesamte Grundstücksfläche. Über der Tiefgaragendecke entsteht eine teilweise begrünte Hoffläche mit Kinderspieleinrichtungen. Das Bauvorhaben war vertragsgemäß in einer Bauzeit von 7 Monaten zu realisieren. Im Zuge der Projektabwicklung kam es zu Störungen des Bauablaufs, wodurch die Bauzeit sich gravierend verlängerte.

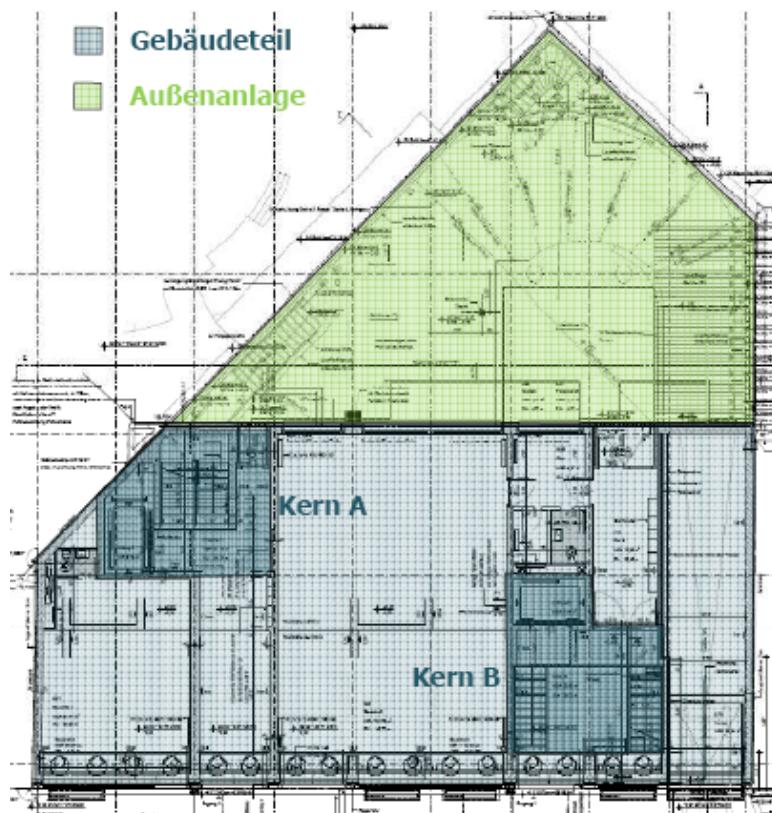


Bild 1.1: Auszug Grundriss EG mit Hervorhebung Gebäudeteil, Kerne A und B

Aufgabe war die Ermittlung des Bauzeitverlängerungsanspruchs des Auftragnehmers, der sich aus den Störungen, die der Auftraggeber zu vertreten hat, ergibt. Zudem musste dargestellt werden, dass der geplante Bauablauf überhaupt baubar gewesen wäre.

Dazu wurde zunächst untersucht und dargestellt, welche Leistungen der Auftragnehmer geschuldet hat und unter welchen Randbedingungen dieser seine Leistung zu planen hatte.

Das Untersuchungsergebnis wurde in einem 4-D-Modell und einem damit korrespondierendem Bauablaufplan in MS Project® abgebildet. Anschließend wurden die Störungssachverhalte ausgewertet und analysiert, welche Auswirkungen diese auf den Bauablauf erwarten lassen. Das Modell wurde in zeitlichen Abschnitten von je etwa 1 Monat mit der Baustellendokumentation abgeglichen und ggf. korrigiert.

## 2 Darstellung des ungestörten Bauablaufs

### 2.1 Allgemein

Damit ein Vortrag zum gestörten Bauablauf überhaupt gelingen kann, bedarf es einer belastbaren Grundlage, nämlich der Darstellung des ungestörten Bauablaufs. Der Auftragnehmer muss also zeigen, wie der Verlauf gewesen wäre, wenn der Auftraggeber ihn nicht gestört hätte. Ein solcher Bauablauf stellt eine rein hypothetische Betrachtung dar und wird in Streitfällen regelmäßig von der Auftraggeberseite in Frage gestellt.

Wie ein Bauablaufplan im Detail auszusehen hat, ist nicht gesetzlich geregelt und nicht normiert. Auch wird der Begriff Bauablaufplan nicht einheitlich verwendet (*Bielefeld & Feuerabend, 2007*). Das liegt sicher nicht zuletzt daran, dass die Anforderungen an einen solchen Plan mit der Projektphase, dem Umfang des Bauvorhabens und der Komplexität der Aufgabe variieren und folglich kaum zu standardisieren sind.

Nach *Schubert (2008)* muss ein Bauablaufplan, der als Grundlage für eine Störungsbetrachtung herangezogen werden soll, folgende fünf Bedingungen erfüllen:

1. Er muss **glaublich** sein, d.h. er muss in seiner technischen und zeitlichen Abwicklung realisierbar sein.
2. Er muss **aussagefähig** sein, d.h. er muss nachvollziehbar in Arbeitsabschnitte und -folgen gegliedert sein und wichtige Voraussetzungen für die Arbeiten enthalten.
3. Er muss **vollständig** sein, d.h. er muss die gesamte beauftragte Leistung des Auftragnehmers abbilden sowie die dafür erforderlichen baulichen und planerischen Voraussetzungen.
4. Er muss **rechenbar** sein, d.h. er muss bspw. mit der Netzplantechnik hergestellt sein, um Änderungen leicht und sachlich richtig nachvollziehen zu können.
5. Er muss **verbindlich** sein, d.h. er muss von den Vertragspartnern vereinbart sein.

Aus gutachterlicher Erfahrung heraus lässt sich feststellen, dass in den meisten Fällen die vereinbarten Bauablaufpläne diese Bedingungen nicht hinreichend er-

füllen. Folglich muss in der Regel die Bauablaufplanung nachträglich aufbereitet werden, um die geforderte Bauablaufdarstellung zu erreichen (vgl. auch *Viering 2010*).

## 2.2 Beispiel Wohn- und Geschäftshaus

Die Analyse der Vertragsunterlagen ergab, dass die Ausführung am 02.01.2008 beginnen und nach etwa 7 Monaten, spätestens jedoch am 31.08.2008 fertiggestellt sein sollte. Die Arbeiten ließen für jede Ebene einen regelmäßigen, wiederkehrenden Ablauf erkennen, welcher folgende Vorgänge enthält:

Außenwände

- Innenwände
- Aufzugsschacht
- Decke

Diese Vorgänge wurden um weitere Detaillierungen ergänzt, wie z. B.

- die Unterscheidung in die Kerne A und B,
- die Untergliederung in Schalen, Bewehren und Betonieren oder
- die Berücksichtigung geplanter Planlieferungen.

Der geplante Bauablauf wurde daraufhin mithilfe einer datenbankgestützten Softwarelösung neu berechnet und visualisiert. Konzeption und Aufbau der Modellbildung war nicht Gegenstand dieser Arbeit, sondern gründete auf früheren Arbeiten (vgl. u.a. *Richter/Huhnt/Wotschke 2009*).

Die Software unterstützt die Erstellung und Verknüpfung von Terminplanvorgängen, indem alle bekannten technologischen Zusammenhänge innerhalb des Fertigungsprozesses eines Bauteils als Datenbankelemente definiert werden (vgl. Bild 2.1). Damit wird sichergestellt, dass der so entwickelte Bauablaufplan die abgebildeten Fertigungsprozesse definitionsgemäß wiedergibt.

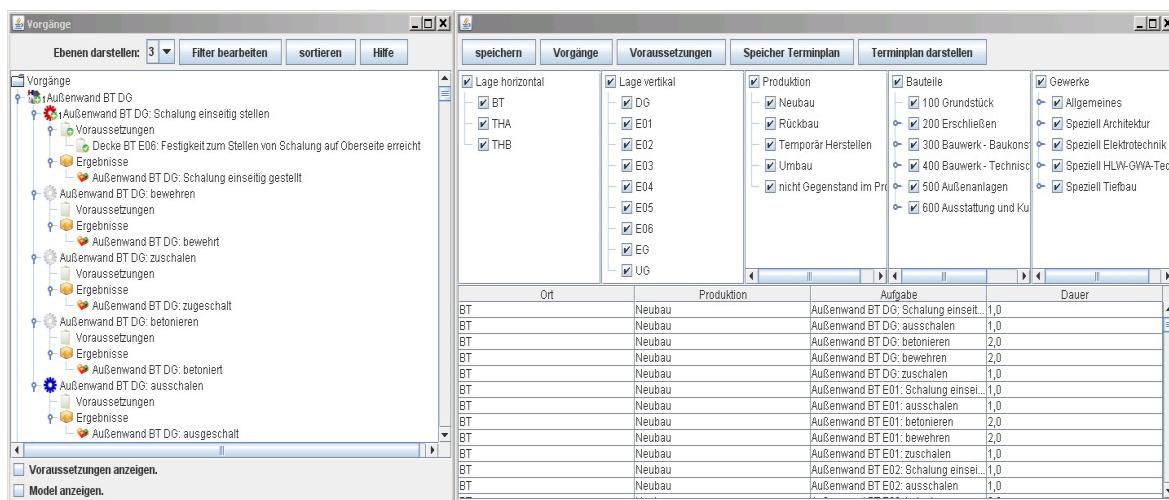


Bild 2.1: Auszug aus der datenbankgestützten Terminplanentwicklung

In weiterer Folge ermöglicht die Software, räumlich und zeitlich bestimmte Vorgänge im Terminplan in einer 4D-Darstellung zu visualisieren. Im Ergebnis können damit die Bauzustände, welche am Ende eines jeden Monats erreicht werden sollten, grafisch abgebildet werden und geben dem Terminplan damit eine räumliche Dimension (vgl. Bild 2.2).

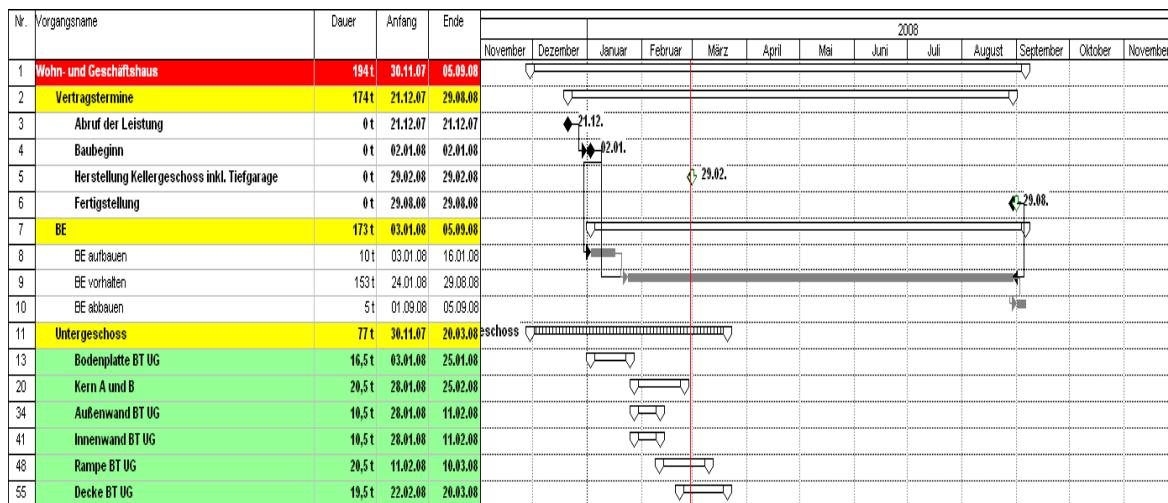


Bild 2.2: Gegenüberstellung von Terminplan und 4-D-Simulation im ungestörten Zustand, Status Ende Februar 2008

Das Bild 2.2 zeigt, dass vorgesehen war, mit den Arbeiten am 02.01.2008 zu beginnen. Der Beginntermin wurde ausdrücklich als Vertragfrist vereinbart. Die ersten Handlungen sollten demnach die Einrichtung der Baustelle, so wie das Stellen der Randschalung für die Bodenplatte sein.

Bis Ende Februar 2008 sollte das Untergeschoss mit den aufgehenden Bauteilen fertig betoniert sein. Vereinbarungsgemäß war vom Vertragstermin „Herstellung Kellergeschoß inkl. Tiefgarage“ die Decke über dem Untergeschoß nicht umfasst.

Im Rahmen der vorgestellten Arbeit wurden Darstellungen analog zu Bild 2.2 für jedes Monatsende innerhalb der geplanten Bauzeit erstellt, um zu verdeutlichen, welchen Bautenstand die Baustelle haben sollte. Nachfolgend ist exemplatisch mit Bild 2.3 der Zustand Ende April 2008 dargestellt.

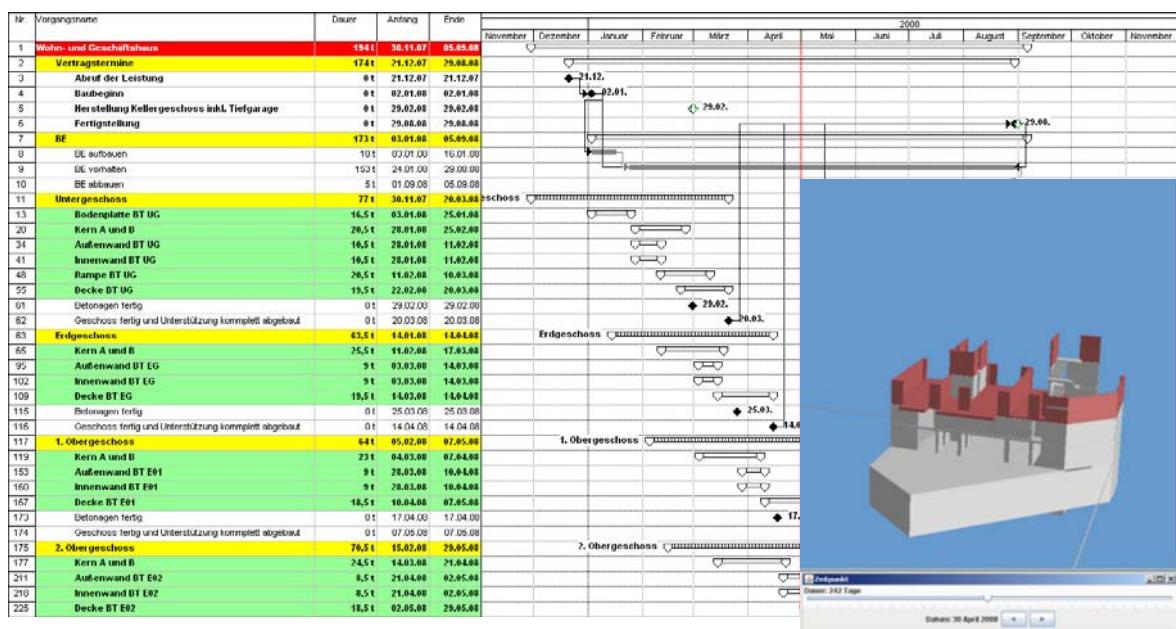


Bild 2.3: Gegenüberstellung von Terminplan und 4-D-Simulation im ungestörten Zustand, Status Ende April 2008

Das Bild 2.3 zeigt, dass zum 30.04.2008 (markiert mittels roter Linie) die Decke über dem 1. OG (Vorgang 167), ebenso wie die Wände im 2. OG (Vorgänge 211 und 218) in Schalung stehen und fertig betoniert sein sollen. Die Treppenhausekerne sollen schon im 3.OG in Arbeit sein (vgl. rot dargestellte Bauteile im obigen Bild).

### 3 Darstellung des gestörten Bauablaufs

#### 3.1 Allgemein

In der Praxis wird der vereinbarte Bauablauf, wie in Kapitel 2 beschrieben, nur in Ausnahmefällen von einer Einzelstörung beeinflusst. Vielmehr ist es eine Vielzahl

gleichzeitig wirkender Störungen, die von unterschiedlichen Beteiligten zu vertreten sind und unterschiedliche Ansprüche zur Folge haben (*Eschenbruch & von Rintelen, 2010*).

Unabhängig von der Anspruchsgrundlage obliegt dem Auftragnehmer die Darstellung der haftungsbegründenden Kausalität, dem so genannten Vollbeweis nach § 286 ZPO. Dort heißt es: „*Das Gericht hat unter Berücksichtigung des gesamten Inhalts der Verhandlungen und des Ergebnisses einer etwaigen Beweisaufnahme nach freier Überzeugung zu entscheiden, ob eine tatsächliche Behauptung für wahr oder für nicht wahr zu erachten sei.*“

Das Gericht muss also anhand der seitens der Parteien vorgelegten Unterlagen und nach einer eventuellen Beweisaufnahme klären, ob die Klage gerechtfertigt ist. Damit muss der Auftragnehmer bei der Ausarbeitung eines störungsmodifizierten Bauablaufs

- jede Störung konkret darlegen,
- den Nachweis führen, dass die Störung im Risikobereich des Auftraggebers liegt, und
- den Ursachenzusammenhang zwischen der Störung und den Auswirkungen auf den Bauablauf herstellen.

Dabei hat der Auftragnehmer die Wahrung des „Wirklichkeitsprinzips“ zu beachten. Er darf nämlich seine Darlegungs- und Nachweisführung nicht ausschließlich auf den hypothetisch ermittelten Bauablauf stützen. Vielmehr muss er die Entwicklung des Bauvorhabens bis zur betrachteten Störung hin ebenso wie die Bewertung der Störungsauswirkungen in seinem Terminplan zutreffend abbilden.

### **3.2 Beispiel Wohn- und Geschäftshaus**

Im Rahmen der Analyse der Störungssachverhalte, welche die Ausführung der Rohbauleistungen verzögert haben, wurden der behinderungsrelevante Schriftverkehr, störungsrelevante Eintragungen im Bautagebuch, die dokumentierten witterungsbedingten Störungen und die erfolgten Planlieferungen ausgewertet. Daraus ergaben sich insgesamt 238 Einzelstörungssachverhalte. Durch Einarbeiten dieser

Störungssachverhalte in den ungestörten Terminplan entstand ein neuer, sogenannter störungsmodifizierter Terminplan.

Wesentliche Störungssachverhalte waren der verspätete Abruf der Leistung, eine verspätete Übergabe des Baugrunds aufgrund von Mängeln in der AG-seitig zu übergebenen Baugrubensohle, eine mangelhafte Ausführungsplanung, welche dazu führte, dass die Werk- und Montageplanung nicht ordnungsgemäß angefertigt werden konnte (Bild 3.1).

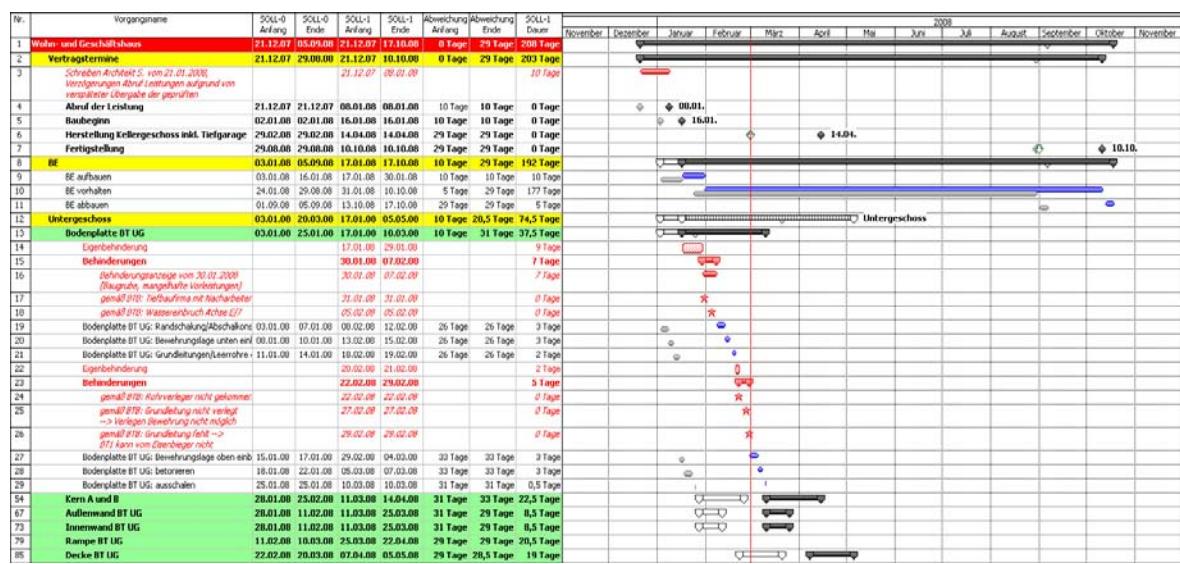


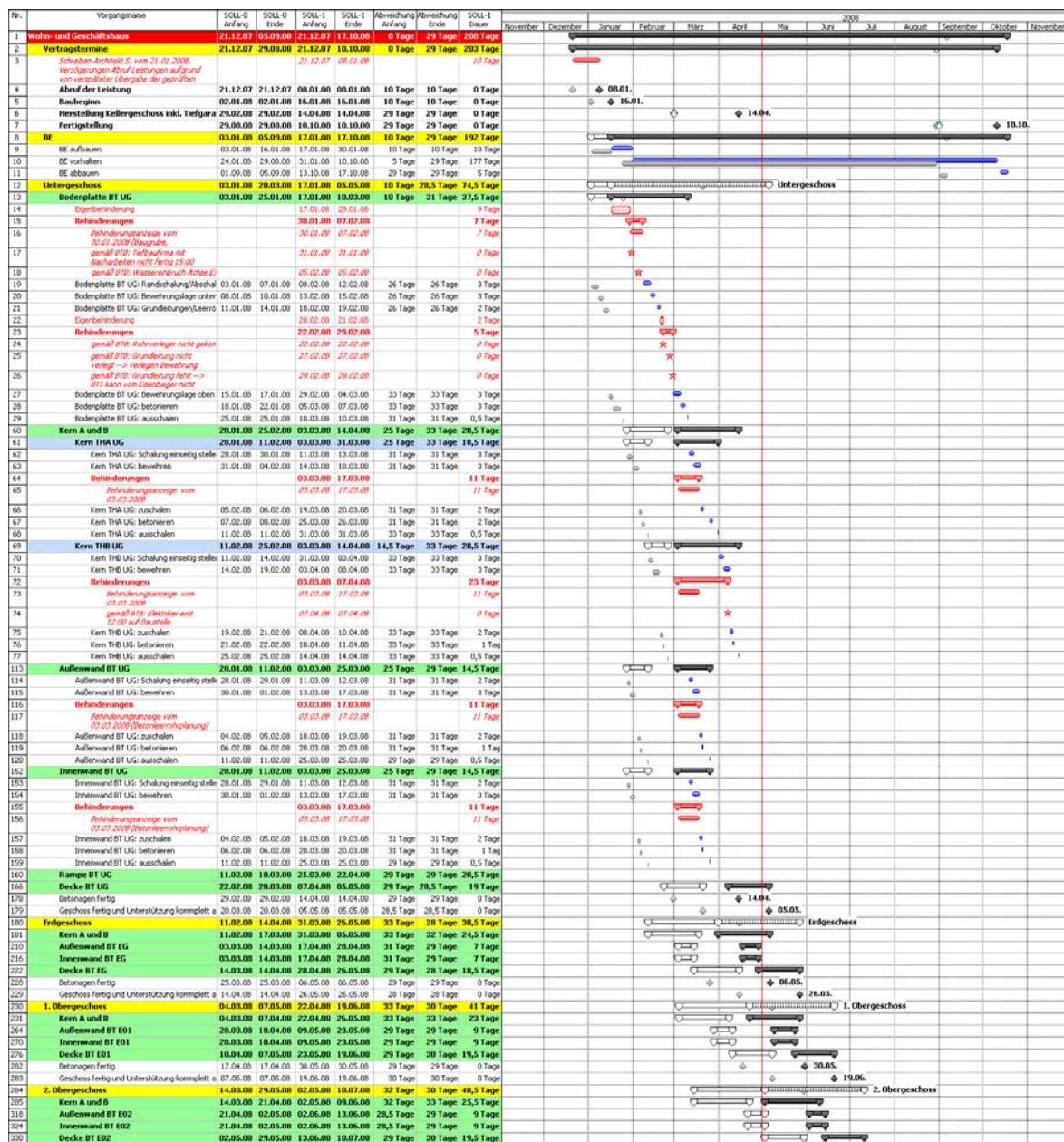
Bild 3.1: Terminplanvergleich ungestörter und gestörter Zustand, Status Ende Februar 2008

Die Darstellung zeigt indes auch, dass die störungsmodifizierte Fortschreibung nicht ausschließlich die Störungen berücksichtigt, die vom Auftraggeber zu vertreten sind. Vielmehr werden auch die Sachverhalte gewürdigt, die als „Eigenbehinderung“ im Bild 3.1. in den Zeilen 14 und 22 zu erkennen sind.

Diese Vorgänge verdeutlichen Zeiträume, in denen keine auftraggeberseitig zu vertretenden Störungen dokumentiert sind und in denen der Auftragnehmer dennoch nicht gearbeitet hat. Bei der abschließenden Bewertung des Bauzeitverlängerungsanspruchs ist das Verhältnis dieser Eigenbehinderungen zu Fremdbehindernungen zu würdigen.

Wesentlich für die eingetretene Bauzeitverzögerung waren ausstehende planerische Entscheidungen hinsichtlich der Fassade im Bereich von Treppenhaus B und hinsichtlich der Brüstungselemente in beiden Treppenhäusern.

Dadurch konnten die restlichen Treppenläufe und Podeste nicht montiert und die Decke über dem Treppenhaus B nicht geschlossen werden, woran über lange Zeit die Gesamtfertigstellung des Gebäudes scheiterte. Zudem war die Ausführung verzögert, da die Treppenhäuser nicht begangen werden konnten und sämtliche Anlieferungen über die Fassadengerüste erfolgen mussten (Bild 3.2).



Zum Zeitpunkt des geplanten Bauendes im August 2008 stellt sich die Verzögerung noch deutlicher dar (Bild 3.3). Das Bauzeitende stellt sich hier zum 09.01.2009 ein, die Bauzeitverlängerung beträgt damit bereits 265 Arbeitstage.

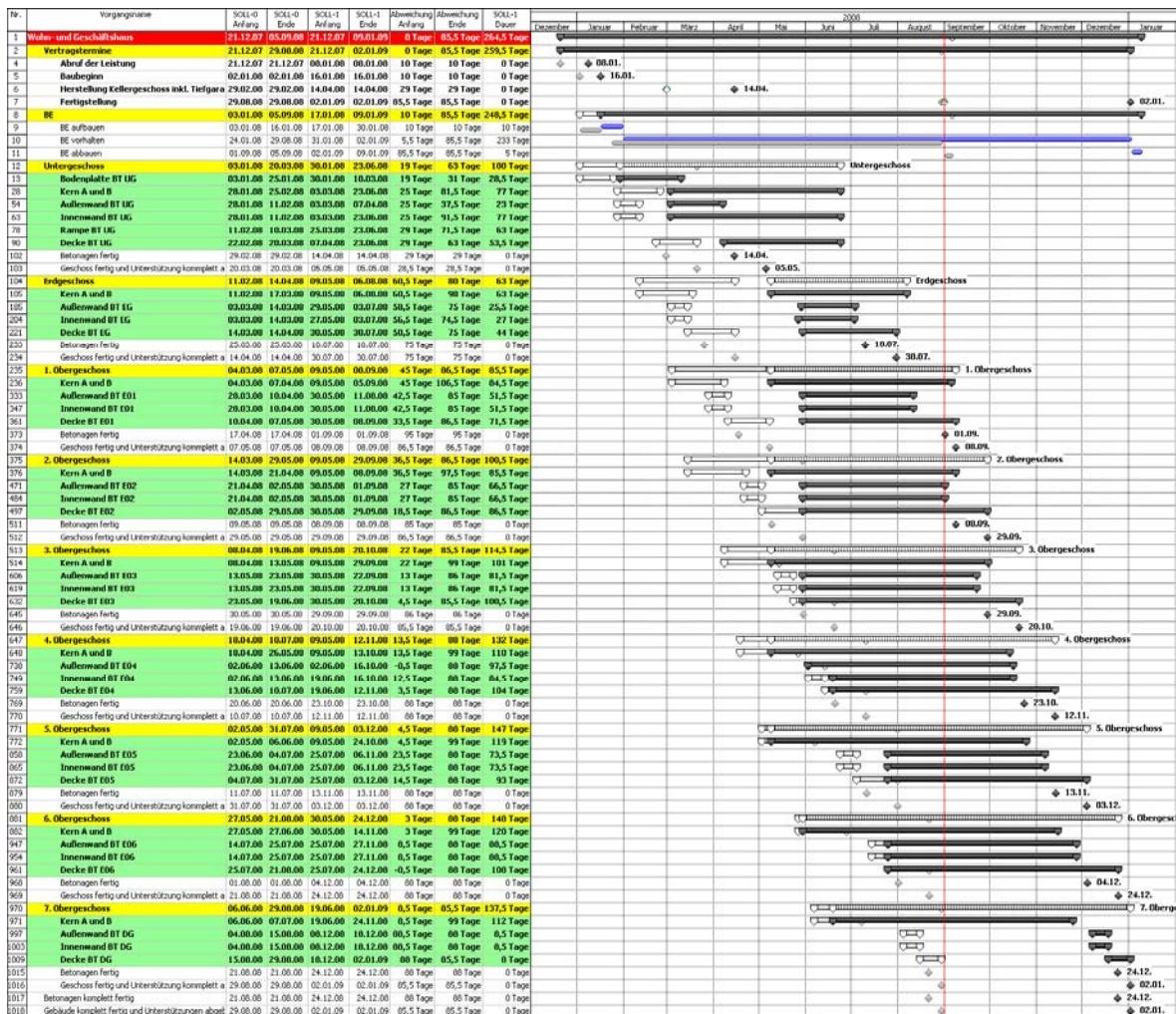


Bild 3.3: Terminplanvergleich ungestörter und gestörter Zustand, Status Ende August 2008

Der störungsmodifizierte Terminplan (vgl. Bild 3.1, 3.2 und 3.3) wurde wie oben beschrieben visualisiert. Nachfolgend werden damit die Bauzustände abgebildet, welche am Ende eines jeden Monats aufgrund der Störungsmodifikation erreicht wurden.

Damit kann im direkten Vergleich dargestellt werden, wie weit das Bauvorhaben zum jeweiligen Zeitpunkt fortgeschritten sein sollte (links in Bild 3.3, 3.4, 3.5) und wie weit das Bauvorhaben aufgrund der Störungssachverhalte fortgeschritten ist (rechts in Bild 3.3, 3.4, 3.5).

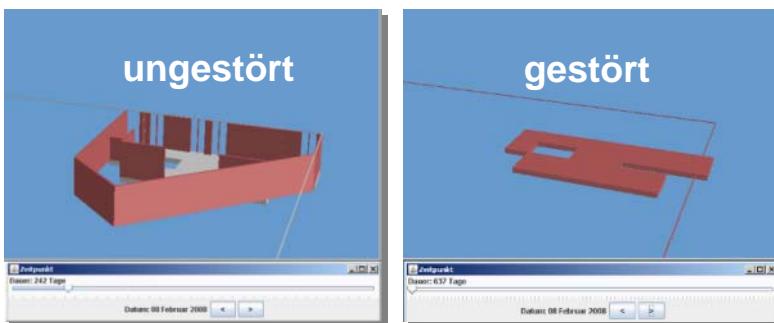


Bild 3.3: 4D-Simulation ungestörter und gestörter Zustand, Status Ende Februar 2008

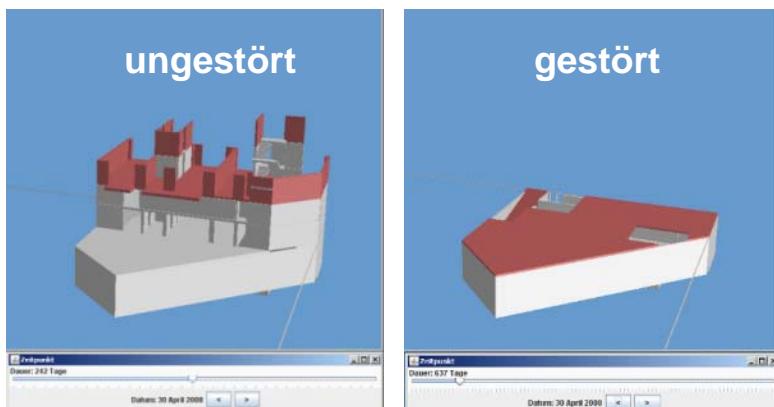


Bild 3.4: 4D-Simulation ungestörter und gestörter Zustand, Status Ende April 2008

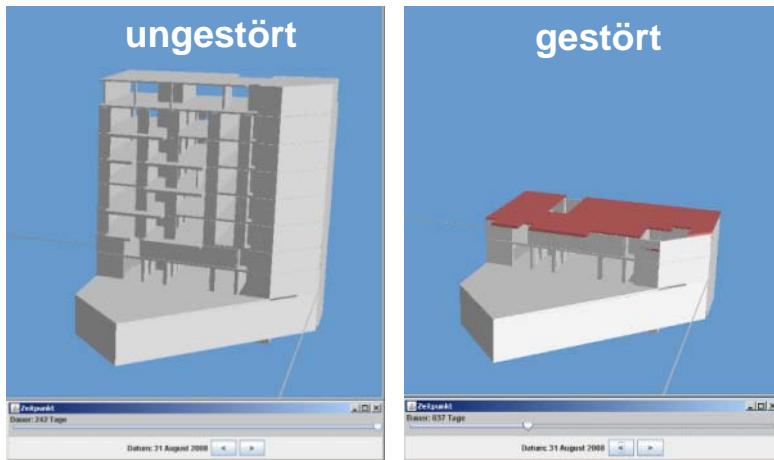


Bild 3.5: 4D-Simulation ungestörter und gestörter Zustand, Status Ende August 2008

Die Störungsmodifikation des geplanten Bauablaufes ergab ein neues hypothetisches Bauzeitende am 04.11.2009. Dies entspricht dem tatsächlichen Bauzeitende. Damit beträgt die Bauzeitverlängerung 299 Arbeitstage.

## 4 Fazit und Ausblick

Die Anforderungen, welche die Rechtsprechung an die Nachweisführung von Ansprüchen stellt, machen eine detaillierte und komplexe Planung und Dokumentation von Bauabläufen erforderlich.

Da kaum Regularien, Gesetze oder Normen existieren, die festlegen, in welcher Art, Form und Umfang die Bauablaufplanung zu erfolgen hat, um bspw. Bauzeitverlängerungsansprüche erfolgreich formulieren und durchsetzen zu können, besteht hier noch immer Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

In dem vorgestellten Beispiel konnte mit Hilfe einer datenbankgestützten Bauablaufplanung ein 4D-Modell erstellt werden, welches sowohl die Baubarkeit im ungestörten Falle, als auch die Auswirkungen von konkreten Störungssachverhalten überzeugend verdeutlicht. Durch eine einzelfallbezogene Darstellung wird es möglich, die Störwirkung auf den Bauablauf in Varianten zu untersuchen und damit verschiedene Szenarien zu simulieren.

Dabei ist es auch möglich, zwischen den Auswirkungen zu differenzieren, die vom Auftraggeber respektive vom Auftragnehmer zu vertreten sind.

Die detaillierte Darstellung im Modell muss sich jedoch immer an der Baustellenrealität messen lassen. Als Beweismittel in einem Streitfall kann auch ein solcher Bauablaufplan nur dann überzeugen, wenn er die tatsächlichen Geschehnisse auf der Baustelle hinreichend genau abbilden kann. Dazu ist es jedoch erforderlich, dass auch die Baustellendokumentation die Qualität und Detaillierung aufweist, wie der Bauablaufplan. Andernfalls wird der Sachvortrag daran scheitern, dass kein Zusammenhang zwischen Modell und Wirklichkeit hergestellt werden kann.

## Literatur

*Bielefeld, B. & Feuerabend, T. (2007): Baukosten- und Terminplanung. Birkhäuser Verlag für Architektur, Basel, 2007.*

*BMVBS (2008): Preisentwicklung bei Großbauprojekten des Bundes. Bericht des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Berlin, 2008.*

*Eschenbruch, K. & von Rintelen, C. (2010): Bauablaufstörung und Terminfortschreibung nach der VOB/B. Neue Zeitschrift für Baurecht und Vergaberecht NZBau, Juli 2010, 401-464.*

*Richter, S.; Huhnt, W.; Wotschke, P. (2009): Applying a New Approach for Generating Construction Schedules to Real Projects. 16th EG-ICE Conference European Group for Intelligent Computing in Engineering 2009. Conference Proceedings. Berlin, 2009.*

*Schubert, E. (2008): Bauverzögerung und Leistungsänderung. In: Vygen / Schubert / Lang, Rechtliche und baubetriebliche Probleme und ihre Lösungen. 5. Auflage, Werner Verlag Wolters Kluwer, Köln, 2008.*

*Viering, M. G. (2010): Handbuch Bauzeit. In: Roquette / Viering / Leupertz, Werner Verlag Wolters Kluwer, Köln, 2010.*

Prof. Dr.-Ing. André Borrmann,

Dipl.-Inf. Yang Ji,

Dipl.-Ing. Johannes Wimmer

## **Kopplung makroskopischer und mikroskopischer Verfahren zur Optimierung von Erdbauprozessen<sup>1</sup>**

Prof. Dr.-Ing. André Borrmann

Dipl.-Inf. Yang Ji

Technische Universität München

Fachbereich Computergestützte Modellierung und Simulation

Arcisstraße 21, 80333 München

Dipl.-Ing. Johannes Wimmer

Technische Universität München

Lehrstuhl Fördertechnik Materialfluss Logistik

Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

---

<sup>1</sup> Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Bayerischen Forschungsverbundes „ForBAU – Die digitale Baustelle“, der von der Bayerischen Forschungsstiftung unterstützt wurde.

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	111
1 Einführung .....	111
2 Mikroskopische und makroskopische Ansätze .....	112
3 Iteratives Kopplungsverfahren .....	113
3.1 Prinzip .....	113
3.2 Primärer Optimierungslauf .....	115
3.3 Primärer Simulationslauf .....	115
3.4 Weiterer Verlauf des Kopplungsalgorithmus .....	117
4 Zusammenfassung und Ausblick .....	117
Literatur .....	118

## Kurzfassung

Der Beitrag stellt ein Verfahren zur Optimierung von Erdbauprozessen vor, das mikroskopische Simulationsmethoden mit makroskopischen Optimierungsansätzen koppelt. Dabei handelt es sich um ein iteratives Verfahren, bei dem Simulations- und Optimierungsläufe einander abwechseln und Daten miteinander austauschen. Die vom Optimierungsmodul ermittelte optimale Zuordnung von Damm- zu Einschnittsbereichen wird im Simulationsmodul als Grundlage für das Routen der Transportfahrzeuge verwendet. Die dort durch Einbeziehung mikroskopischer Randbedingungen ermittelten Gesamtprozessdauern auf jeder Strecke dienen im nächsten Optimierungsschritt als Grundlage für die Ermittlung der optimalen Zuordnung. Das Verfahren wird iterativ wiederholt, bis Konvergenz eintritt. Erste Tests des Verfahrens, die auf Eingangsdaten realer Bauvorhaben beruhen, haben eine spürbare Verminderung der Gesamtprozessdauer ergeben.

## 1 Einführung

Der Einsatz von Werkzeugen der Prozesssimulation im Bauwesen bietet die Möglichkeit, einzelne Bauabläufe zunächst virtuell am Rechner ablaufen zu lassen, um Abhängigkeiten zwischen Prozessschritten zu identifizieren, den Ressourceneinsatz abzustimmen und Flaschenhälse zu vermeiden. Ziel ist es, entweder bei gegebener Projektlaufzeit möglichst wenige Ressourcen einzusetzen und damit geringe Kosten zu erzielen oder bei vorgegebenen Kosten eine möglichst kurze Projektlaufzeit zu erreichen. Dieser Beitrag widmet sich der Simulation von Erdbauprozessen, die im Rahmen der Errichtung von Trassen ausgeführt werden. Dabei gilt es, Erdbaustoffe an Einschnitten mithilfe von Lösegeräten (i.d.R. Baggern) auszubauen und, sofern sie wiederverwendbar sind, mithilfe von Transportfahrzeugen (i.d.R. Dumpern) zu Abschnitten zu transportieren, an denen ein Damm errichtet wird, um sie dort wieder einzubauen und ggf. zu verdichten. Nicht wiederverwendbares Erdmaterial muss zu einer Deponie transportiert und dort entsorgt werden. Sollte das vorhandene Erdmaterial zur Errichtung der Dämme nicht ausreichen, muss zusätzliches Material zugekauft und antransportiert werden.

## 2 Mikroskopische und makroskopische Ansätze

Häufig werden zur Simulation derartiger Erdbauarbeiten Verfahren der ereignisdiskreten Simulation eingesetzt, die entweder speziell für das Bauwesen oder ursprünglich für die Fabrikplanung entwickelt wurden (Martinez 1998, Askew et al. 2002, Sung-Keun & Ruessel 2002, Borrman et al. 2009, Dawood & Castro 2009; Wimmer et al. 2010). Daneben werden auch auf Petri-Netzen basierende Methoden verwendet (Chahrou 2006, Luo et al. 2008, Cheng et al. 2011). Beide Ansätze gehören zu den mikroskopischen Verfahren, da hier detaillierte Randbedingungen zu Prozesszeiten und Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Prozessschritten berücksichtigt werden. Die mikroskopischen Verfahren erlauben präzise Aussagen zur Prozesszeiten und zur Auslastung einzelner Ressourcen. Nachteilig ist jedoch, dass in der Regel genaue Vorgaben zur Prozesskonfiguration gemacht werden müssen, d.h. zu den einzusetzenden Ressourcen und der Reihenfolge einzelner Prozessschritte. Im Bereich der Erdbausimulation schließt dies auch die Zuordnung von Einschnitts- zu Dammbereichen ein. Gerade hier besteht jedoch enormes Potential zur Optimierung des Gesamtprozesses hinsichtlich der Projektdauer und/oder der anfallenden Kosten.

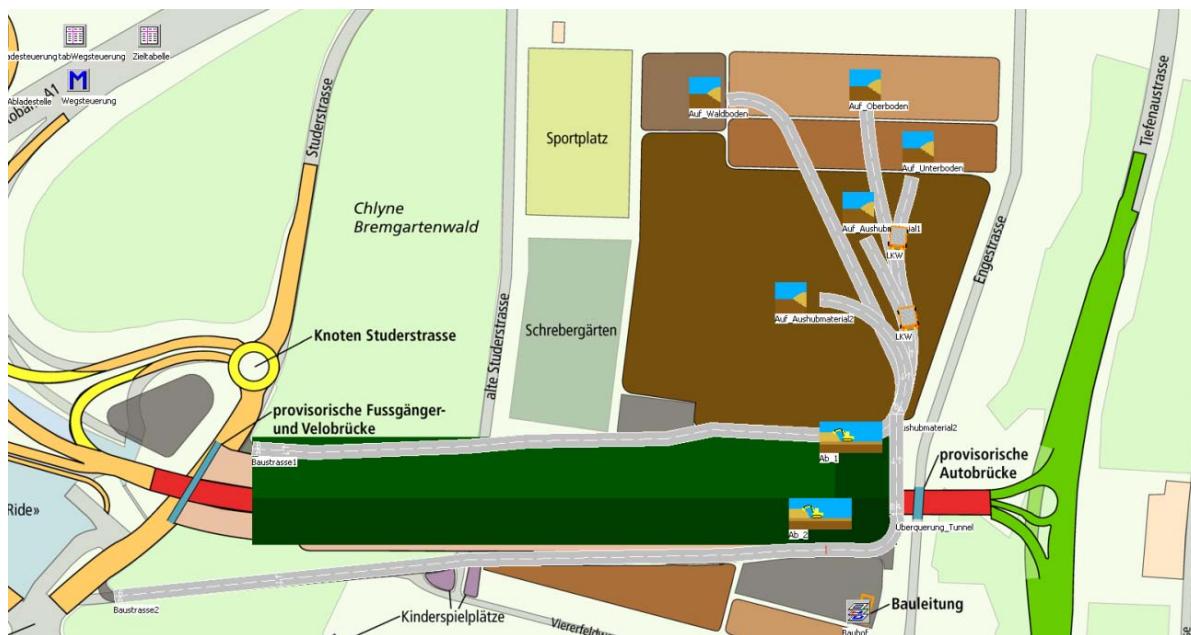


Bild 1: Mikroskopische Simulation eines Erdbauvorhabens auf der Basis diskreter Ereignisse

Eine solche Optimierung wird von Simulationswerkzeugen primär nicht unterstützt. Um dennoch ein gutes Ergebnis zu erreichen, variiert der Planer selbsttätig die Eingangsgrößen und führt so systematisch Versuche durch.

Im Gegensatz dazu werden auf makroskopischer Ebene bereits seit längerem mathematische Optimierungsverfahren eingesetzt (Easa 1988, Jayawardana & Harris 1990, Marzouk & Moselhi 2004, Son et al. 2005, Ji et al. 2010a). Diese gewährleisten eine optimale Zuordnung von Einschnitts- zu Dammbereichen, können dabei jedoch lediglich makroskopische Eingangsgrößen berücksichtigen wie die Mengen der ein- bzw. auszubauenden Erdmassen sowie die Weglängen zwischen den einzelnen Einschnitts- und Dammbereichen. Mikroskopische Randbedingungen wie die gegenseitige Beeinflussung von Lösegeräten und Transportfahrzeugen oder die Beschaffenheit einzelner Transportwege und die daraus resultierenden Unterschiede in den Transportzeiten können hingegen vom Optimierungsverfahren nicht berücksichtigt werden. In diesem Beitrag wird daher ein neues Verfahren vorgestellt, das die Vorteile von makroskopischen und mikroskopischen Ansätzen miteinander kombiniert.

### 3 Iteratives Kopplungsverfahren

#### 3.1 Prinzip

Das vorzustellende Verfahren beruht auf einer Kopplung von makroskopischen und mikroskopischen Ansätzen. Dabei handelt es sich um ein iteratives Verfahren, bei dem zwischen Simulations- und Optimierungsmodul in mehreren Durchgängen Daten ausgetauscht werden, bis Konvergenz eintritt (Bild 2). Auf diese Weise wird es möglich, eine optimale Zuordnung von Einschnitts- zu Dammbereichen zu finden, so dass die Gesamtprozessdauer der auszuführenden Erdarbeiten minimiert wird (Ji et al. 2010b).

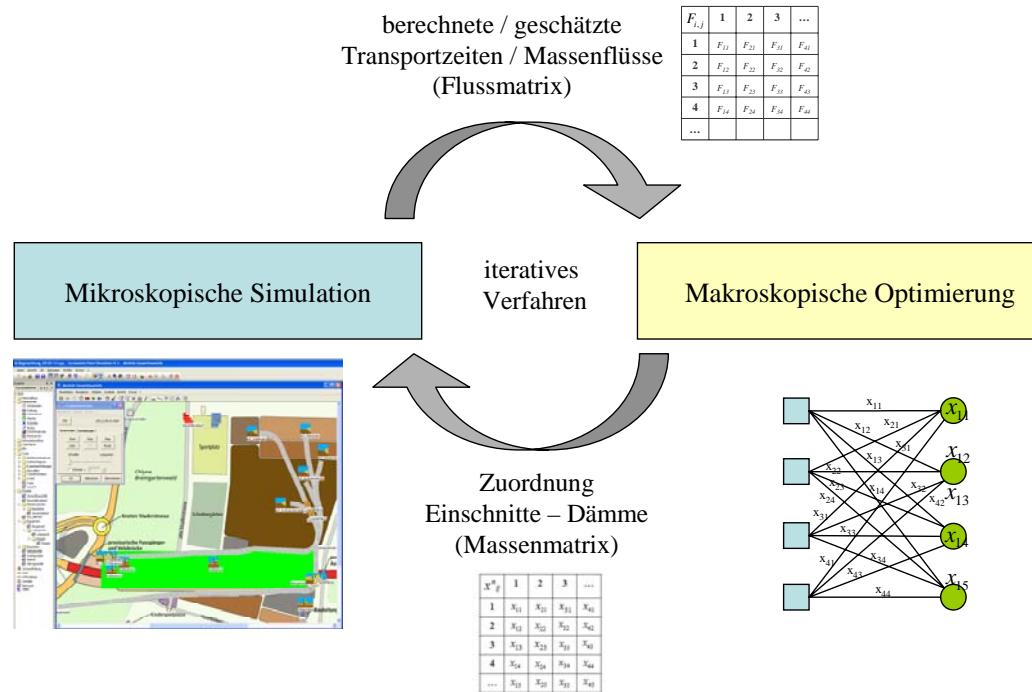


Bild 2: Prinzip des iterativen Verfahrens zur Kopplung von mikroskopischer Simulation und makroskopischer Optimierung

Die grundsätzliche Idee ist dabei, zunächst die mithilfe des makroskopischen Verfahrens auf Basis der Weglängen ermittelten optimalen Zuordnungen von Einschnitten und Dämmen als Eingangsgröße für die mikroskopische Simulation zu nutzen, d.h. die Transportwege der Dumper entsprechend dieser Zuordnung zu legen. Gleichzeitig werden in einem Folgeschritt die durch den Simulationslauf ermittelten Prozessdauern für den Transport („Reisezeiten“) als Eingangsgröße an das Optimierungsmodul übergeben, das nun nicht mehr auf der Basis von Entfernung, sondern auf Basis der ermittelten Prozessdauern arbeitet. Auf diese Weise werden mikroskopische Effekte in der Optimierung berücksichtigt und eine Minimierung der Gesamtprozessdauer ermöglicht.

Da das Ergebnis des nächsten Optimierungslaufs eine Änderung der Einschnitt-Damm-Zuordnung zur Folge haben kann, wird das gesamte Verfahren iterativ wiederholt, bis Konvergenz eintritt.

### 3.2 Primärer Optimierungslauf

Wie bereits beschrieben, wird zunächst ein Optimierungslauf auf Basis der reinen Weglängen durchgeführt. Hierzu wird ein vollständig verbundener bipartiter Graph genutzt, um die Verbindungen zwischen allen Einschnitten zu allen Dämmen zu modellieren (Bild 3). Die Kantengewichte im Graphen entsprechen den jeweiligen Weglängen. Auf der Basis dieses Graphs liefert eine lineare Optimierung (Ahuja 1993) die optimale Zuordnung von Einschnitts- zu Dammbereichen und die jeweils von einem Einschnitt zu einem Damm zu transportierenden Massen. Zu beachten ist, dass die gefundene optimale Zuordnung zu diesem Zeitpunkt ausschließlich auf den Weglängen beruht.

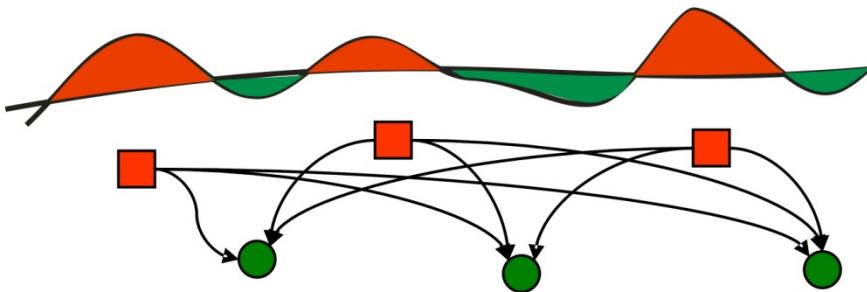


Bild 3: Schematische Darstellung der Ableitung eines vollständig verbundenen bipartiten Graphen aus der Dämmen und Einschnitten der Erdbauanstelle

### 3.3 Primärer Simulationslauf

Die vom Optimierungslauf ermittelte Zuordnung von Einschnitts- zu Dammbereichen wird im nächsten Schritt im Simulationsmodul verwendet, um die Dumper entsprechend zu routen, d.h. sie gemäß der ermittelten Zuordnung Erdmaterial von den jeweiligen Einschnitten zu den zugeordneten Dammbereichen transportieren zu lassen.

Im Simulationswerkzeug werden dabei detaillierte Streckenprofile hinterlegt, die einen Zusammenhang zwischen der vorherrschenden Steigung und der Transportgeschwindigkeit herstellen. Da zudem die Bodenbeschaffenheit großen Einfluss auf die erzielbare Transportgeschwindigkeit hat, wird auch diese berücksichtigt. Auf diese Weise werden sehr präzise Aussagen über die Transportzeiten auf den einzelnen Routen möglich.

Da auf die Größe des tatsächlichen Erdmaterialflusses jedoch nicht nur die reinen Transportzeiten, sondern auch Zeiten für das Be- und Entladen maßgeblichen Einfluss haben, werden diese bei der Bestimmung der Gesamttransportdauern der einzelnen Strecken mit einbezogen.

Die ermittelten Gesamttransportdauern könnten im nächsten Schritt als Grundlage für die Optimierung genutzt werden. Dies führt jedoch zu Problemen im Falle der nicht genutzten Strecken des voll verbundenen Wegegraphs, da hierfür keine Transportdauern ermittelt wurden. Um zu verhindern, dass diese Strecken im weiteren Verlauf des Kopplungsverfahrens ignoriert werden, muss diesen eine geschätzte Transportdauer zugewiesen werden.

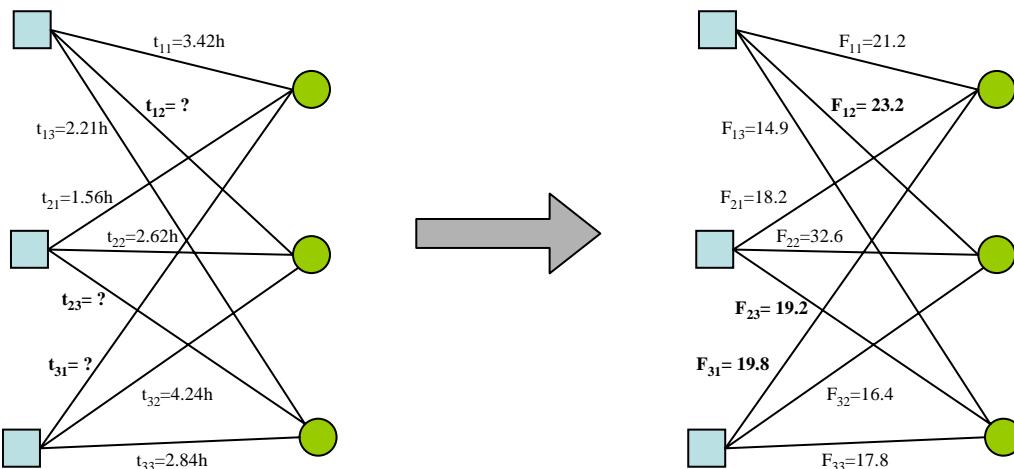


Bild 4: Umwandlung der für jede Kante ermittelten Transportdauern in Materialflüsse. Für in der Simulation nicht genutzte Verbindungen werden Schätzwerte bestimmt.

Diese geschätzte Transportdauer ergibt sich aus einer Mittelung der Transportdauern der tatsächlich genutzten Strecken. Dabei werden zunächst Einflüsse aus der Weglänge und der transportierten Erdmenge eliminiert, indem der *normalisierte Materialfluss* für jede Strecke bestimmt wird. Dieser berechnet sich aus  $F_i^N = m_i / t_i \cdot d_i$ , wobei  $m_i$  für die transportierte Erdmenge,  $t_i$  für die Dauer des Gesamtprozesses Laden / Transportieren / Entladen und  $d_i$  für die Weglänge steht. Aus den so ermittelten normalisierten Materialflüssen wird ein mittlerer normalisierter Materialfluss bestimmt:  $\bar{F}^N = \sum_i F_i^N / n$ . Für Kanten, für die keine Transportdauer ermittelt wurde, wird dieser Wert als Grundlage für die Schätzung des Materialflusses verwendet:  $F_i = \bar{F}^N / d_i$ . Hieraus ließe sich eine geschätzte Trans-

portdauer ermitteln, der Materialfluss selbst eignet sich aber auch hervorragend als Kopplungsparameter und wird in der Folge als solcher verwendet (Bild 4). Entsprechend werden im nächsten Schritt die durch Simulation oder Schätzung ermittelten Materialflüsse der einzelnen Wegstrecken als Kantengewichte an das Optimierungsmodul übergeben.

### **3.4 Weiterer Verlauf des Kopplungsalgorithmus**

In der Folge wird das Kopplungsverfahren iterativ wiederholt. Dabei werden vom Simulationsmodul Materialflüsse für die einzelnen Wegstrecken bestimmt und als Grundlage für die Ermittlung der optimalen Zuordnung von Einschnitts- zu Dammbereichen verwendet. Diese Zuordnung wird an das Simulationsmodul zurückgegeben und dient dort als Grundlage für den nächsten Simulationslauf.

Das Verfahren wird so lange wiederholt bis der mittlere normalisierte Materialfluss konvergiert ist.

## **4 Zusammenfassung und Ausblick**

Der Beitrag hat ein Verfahren zur Optimierung von Erdbauprozessen vorgestellt, das mikroskopische Simulationsmethoden mit makroskopischen Optimierungsansätzen koppelt. Dabei handelt es sich um ein iteratives Verfahren, bei dem Simulations- und Optimierungsläufe einander abwechseln und Daten miteinander austauschen. Die vom Optimierungsmodul ermittelte optimale Zuordnung von Damm- zu Einschnittsbereichen wird im Simulationsmodul als Grundlage für das Routen der Transportfahrzeuge verwendet. Die dort durch Einbeziehung mikroskopischer Randbedingungen ermittelten Gesamtprozessdauern auf jeder Strecke dienen im nächsten Optimierungsschritt als Grundlage für die Ermittlung der optimalen Zuordnungen. Das Verfahren wird iterativ wiederholt, bis Konvergenz eintritt.

Erste Tests des Verfahrens, die auf Eingangsdaten realer Bauvorhaben beruhten, haben eine spürbare Verminderung der Gesamtprozessdauern ergeben. Für die Zukunft ist eine umfangreiche Validierung des entwickelten Verfahrens in Zusammenarbeit mit verschiedenen Baufirmen geplant.

## Literatur

- Ahuja, R.; Magnati T. L.; Orlin, J. B. (1993): Network Flows. Prentice Hall, Inc..
- Askew, W.H.; Al-Jibouri, S. H.; Mawdesley, M. J.; Patterson, D. E. (2002): Planning Linear Construction Projects: Automated Method for the Generation of Earthwork Activities. *Automation in Construction*, 11(6) pp. 643-653.
- Borrmann, A.; Ji, Y.; Wu, I.-C.; Obergrießer, M.; Rank, E.; Klaubert, C.; Günthner, W. (2009): ForBAU - The Virtual Construction Site Project. Proc. of the 26th CIB-W78 Conference on Managing IT in Construction.
- Chahrour, R. (2006): Integration von CAD und Simulation auf der Basis von Produktmodellen im Erdbau. Dissertation, Universität Kassel.
- Cheng, F.F.; Wang, Y.W.; Ling, X. Z.; Bai, Y. (2011): A Petri net simulation model for virtual construction of earthmoving operations. *Automation in Construction*, in press.
- Dawood, N.; Castro, S. (2009): Automating road construction planning with a specific-domain simulation system. In: *Journal of Information Technology in Construction* 14, pp. 556–573.
- Easa, M. (1988): Earthwork Allocations with Linear Unit Costs. *Journal of Construction Engineering and Management*, 114(4) pp. 641-655.
- Jayawardana, A. K.W.; Harris, F.C. (1990): Further Development of Integer Programming in Earthwork Optimization. *Journal of Construction Engineering and Management*, 116(1) pp. 18-34.
- Ji, Y.; Seipp F.; Borrmann A.; Ruzika, S.; Rank, E. (2010a): Mathematical Modeling of Earthwork Optimization Problems. Proc. of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE).

*Ji, Y.; Borrmann, A.; Wimmer, J.; Günthner, W. (2010b): Bidirectional Coupling of Macroscopic Optimization and Microscopic Simulation of Earthwork Processes. In: Proc. of the 27th CIB-W78 Conference. Cairo, Egypt.*

*Luo, W., Liu, Q.; Hu, Z.; Qiu, Y. (2008): The Simulation Study on Dynamic Optimization of Hydropower Project Earthwork Allocation System Based on Petri Net. 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing.*

*Marzouk, M.; Moselhi, O. (2004): Multiobjective Optimization of Earthmoving Operations. ASCE Journal of Construction Engineering and Management, 130(1) pp. 105-113.*

*Martinez, J. C. (1998): EarthMover-simulation tool for earthwork planning. Proc of the 1998 Winter Simulation Conference (WSC'98).*

*Son, J.; Mattila, K. G.; Myers, D. (2005): Determination of Haul Distance and Direction in Mass Excavation. Journal of Construction Engineering and Management, 131(3) pp. 302-309.*

*Sung-Keun, K.; Russell, J. S. (2002): Framework for an Intelligent Earthwork System Part II. Task Identification / Scheduling and Resource Allocation Methodology. Automation in Construction, 12 (1) pp. 15-27.*

*Wimmer, J.; Ji, Y.; Horenburg, T.; Borrmann A.; Günthner W.; Rank, E. (2010): Evaluation of the 3D Model-based Earthwork Process Simulation in Practice. Proc. of the 14th ASIM-Conference Simulation in Production and Logistic (ASIM).*



Dipl.-Wi.-Ing. Christian Flemming

## **Simulation für die Risikoprognose von Bauprojekten**

Dipl.-Wi.-Ing. Christian Flemming  
Technische Universität Dresden  
Fakultät Bauingenieurwesen  
Institut für Baubetriebswesen  
Nürnberger Straße 31 A, 01187 Dresden

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	123
1 Motivation.....	123
2 Auswirkung der Risiken auf den Projekterfolg des Auftragnehmers.....	124
3 Einordnung der Risikosimulation in das Risikomanagement.....	127
3.1 Risiko und Risikomanagement .....	127
3.2 Regelkreis des Risikomanagements .....	128
3.3 Risikomodellierung und Risikosimulation in der Risikobewertung .....	129
4 Entwicklung eines probabilistischen Modells für die Risikosimulation aus Sicht des Auftragnehmers .....	130
4.1 Anbindung an das Projektcontrolling .....	130
4.2 Modularer Modellaufbau .....	131
4.3 Modellierung der Risiken .....	136
4.4 Risikosimulation für ein Beispielprojekt .....	138
5 Zusammenfassung.....	139
Literatur.....	140

## Kurzfassung

Die Notwendigkeit eines Risikomanagements für Bauprojekte tritt immer mehr in das Bewusstsein der ausführenden Bauunternehmen. Ein mangelndes oder fehlendes Risikomanagement kann die unternehmerische Existenz – besonders in einer risikoreichen Industrie wie dem Bauwesen – langfristig gefährden oder sogar beenden. Auftragnehmer sehen sich mit Risiken konfrontiert, die sie oft nicht alleine oder gar nicht beeinflussen können. Die baubetriebliche Literatur fordert die Bewertung dieser Risiken, kann aber nur vereinzelt Modelle aufweisen, die eine praktische Relevanz zeigen.

Innerhalb des Forschungsprojektes MEFISTO wird ein Risikomodell für den Auftragnehmer entwickelt, das sich an den bestehenden Arbeitsprozessen im Bauunternehmen orientiert. Die Grundlage für das Risikomodell bildet das Projektcontrolling. Die Ergebnisse der Risikosimulation unterstützen das Projektcontrolling in einer risikoorientierten Entscheidungsfindung. Damit wird das Projektcontrolling um ein Risikocontrolling erweitert.

Dieser Beitrag stellt den Aufbau des Risikomodells für den Auftragnehmer vor. Das methodische Vorgehen für die Modellierung und Simulation der Risiken wird beschrieben und die Ergebnisse der Risikosimulation anhand eines Beispielprojektes demonstriert.

## 1 Motivation

Das BMBF-Leitprojekt MEFISTO entwickelt ein Managementführungssystem für die Durchführung von Bauprojekten. Die verschiedenen Arbeitspakete des Forschungsprojektes befassen sich mit der Bauprozesssimulation, der Integration von dreidimensionalen Bauwerksmodellen mit der Termin- und Kostenplanung sowie mit dem Controlling und Risikomanagement von Bauprojekten. Ein weiteres Anliegen des Forschungsprojektes ist die Förderung des partnerschaftlichen Bauens. Eine verbesserte Kommunikation und ein besserer Datenaustausch unterstützen die Zusammenarbeit zwischen den am Bau beteiligten Partnern. An dem For-

schungsprojekt beteiligen sich fünf Universitätsinstitute und sieben Industriepartner.

Dieser Beitrag beschreibt die Entwicklung und Anwendung des probabilistischen Modells für das Risikomanagement des Auftragnehmers. Ein besonderes Anliegen der Konzeption des Risikomodells liegt in der einfachen Integration des Modells in den baubetrieblichen Arbeitsprozess. Die Literatur bietet bereits verschiedene Modelle für das Risikomanagement von Auftragnehmern an. Die mangelnde Anbindung dieser Modelle in die bestehenden Prozesse erschwert jedoch die praktische Anwendung. Das im Forschungsprojekt MEFISTO zu entwickelnde Risikomodell besteht nicht losgelöst vom Projektcontrolling des Auftragnehmers, sondern baut auf den Daten des Projektcontrollings auf und unterstützt das Projektcontrolling in der risikoorientierten Entscheidungsfindung. Das Risikomodell erweitert das herkömmliche Baustellencontrolling, das aus Mengen-, Kosten- und Termincontrolling besteht, um ein Risikocontrolling. Für den Auftragnehmer wird die Möglichkeit geschaffen, alle relevanten Risiken des Bauprojektes zu modellieren und durch Simulationsverfahren zu einem Gesamtrisiko zu verdichten. Das Gesamtrisiko des Projektes bildet die Grundlage für die Festlegung geeigneter Maßnahmen. Durch die Anpassung der Risikomodellierung an die aktuelle Situation des Bauprojektes kann der Erfolg der gewählten Maßnahmen bewertet und ein Risikocontrolling betrieben werden.

Kapitel 2 zeigt die Auswirkung der Risiken auf den Projekterfolg des Auftragnehmers auf und begründet damit die Notwendigkeit des Risikomanagements. Kapitel 3 beschreibt die Risikosimulation im Kontext des Risikomanagement-Prozesses. Kapitel 4 stellt das probabilistische Risikomodell für den Auftragnehmer vor. An dieser Stelle werden die Modellierungs- und Simulationsmethoden näher beschrieben.

## **2 Auswirkung der Risiken auf den Projekterfolg des Auftragnehmers**

Das primäre Ziel der unternehmerischen Tätigkeit besteht in der Erwirtschaftung eines größtmöglichen Gewinns. Dem Auftragnehmer stehen für die Erreichung dieses Ziels zwei Alternativen zur Verfügung. Der Auftragnehmer kann seinen

Umsatz maximieren oder seine Kosten minimieren (*Seyfferth 2003*). In Bezug auf die Realisierung eines Bauprojektes bedeutet Umsatzmaximierung die Weitergabe der anfallenden Kosten zuzüglich eines Gewinnanteils an den Auftraggeber. Dieses Vorgehen wird zum Beispiel bei Mengenmehrungen angewandt. Die Kostenminimierung beschreibt die Verringerung der tatsächlichen Kosten gegenüber den geplanten Kosten ohne diese Einsparung an den Auftraggeber weiterzuleiten. Kosteneinsparungen können zum Beispiel durch die Änderung des geplanten Bauverfahrens zu einem kostengünstigeren Verfahren entstehen.

Der Projekterfolg für den Auftragnehmer ergibt sich somit aus der Differenz des eingenommenen Umsatzes und der aufgewendeten Kosten. In der baubetrieblichen Literatur wird für die Bezeichnung des Projekterfolges häufig der Begriff des Deckungsbeitrages gewählt. Dieser Begriff ist aber nicht eindeutig definiert und kann sich auch auf die Deckung der Gemeinkosten beziehen (*Leimböck et al. 2007*). Aus dem Grund wird in diesem Beitrag der Begriff der Projektrendite (engl.: Return on Investment) verwendet. Die Projektrendite ist die entscheidende Kennzahl für den Projekterfolg und wird nach folgender Formel berechnet:

$$\text{Projektrendite} = \text{Umsatz} - \text{Kosten} \quad (1)$$

Zum Zeitpunkt der Zuschlagserteilung kann keine exakte Aussage über die tatsächliche Höhe des Umsatzes oder der Kosten getroffen werden. Die Projektrendite des Auftragnehmers ist somit risikobehaftet.

Die Vergütung der erbrachten Leistung erfolgt bei einem Einheitspreisvertrag nach § 2 (2) VOB/B nach den vertraglich vereinbarten Einheitspreisen und den tatsächlich ausgeführten Mengen. Die Einheitspreise werden bei der Zuschlagserteilung fixiert und sind als feste Größe während der gesamten Ausführungszeit bekannt. Die tatsächlich ausgeführten Mengen können jedoch erst nach ihrer Fertigstellung eindeutig bestimmt werden. Die tatsächlichen Mengen können die ausgeschriebenen Mengenansätze über- oder unterschreiten. Der Umsatz für den Auftragnehmer zeigt sich aufgrund der möglichen Abweichungen der ausgeführten Ist-Mengen von den ausgeschriebenen Soll-Mengen als risikobehaftet. Der tatsächliche Umsatz kann den geplanten Umsatz über- oder unterschreiten und auf diese Weise einen positiven oder negativen Einfluss auf die Projektrendite nehmen.

Ein ähnliches Problem ergibt sich bei den Kosten des Auftragnehmers. Auch hier können Mengenunter- oder -überschreitungen die Kostensituation und damit auch die Projektrendite positiv oder negativ beeinflussen. Ein weiteres Problem für eine exakte Bestimmung der Projektrendite besteht in dem Umstand, dass die Kosten, die dem Auftragnehmer bei der Bauausführung entstehen, nicht wie die Einheitspreise zum Zeitpunkt der Zuschlagserteilung fixiert werden können. Die entstehenden Kosten können während der Bauausführung von den kalkulierten Kosten sowohl im Bereich der Einzelkosten als auch im Bereich der Gemeinkosten abweichen. Zu niedrig kalkulierte Kosten können die entstehenden Kosten nicht vollständig abdecken und resultieren in Kostensteigerungen. In der Angebotskalkulation zu hoch angesetzte Kosten führen dagegen zu Kosteneinsparungen. Die Abweichungen bei den kalkulierten Kostenansätzen besitzen also wie die Abweichungen der ausgeschriebenen Mengenansätze positive oder negative Auswirkungen auf die Projektrendite.

Neben diesen Risiken, die aus der Unsicherheit über die ausgeschriebenen Mengenansätze und der kalkulierten Kostenansätze entstehen, können Ereignisse auftreten, die sich positiv oder negativ auf den Erfolg des Bauprojektes auswirken. Diese Ereignisse heißen im Rahmen dieses Beitrags Projekteinzelrisiken. Projekteinzelrisiken können zum Beispiel Lieferengpässe und Terminverschiebungen, die Insolvenz eines Nachunternehmers, Vandalismus oder verspätete Planlieferung durch den Auftraggeber sein. Der Umgang des Auftragnehmers mit den Projekteinzelrisiken beeinflusst die Auswirkungen dieser Ereignisse auf den Projekterfolg. Projekteinzelrisiken können durch die Übertragung des Risikos auf den Auftraggeber zu einer Umsatzsteigerung führen. Übernimmt der Auftragnehmer das Projekteinzelrisiko selbst, kann das Risiko in Kostensteigerungen resultieren.

Die Formel (1) kann somit wie folgt aufgeschlüsselt werden. Der Index i steht für eine beliebige Leistungsposition des Leistungsverzeichnisses:

$$\begin{aligned}
 \text{Projektrendite} = & + \sum \text{Menge } i * \text{Einheitspreis } i & (2) \\
 & - \sum \text{Menge } i * \text{Einzelkosten } i \\
 & - \text{Gemeinkosten} \\
 & \pm \text{Risikobetrag}
 \end{aligned}$$

Die Elemente der Formel (2) sind bis auf den Einheitspreis der Leistungsposition i risikobehaftet. Die tatsächlichen Ausprägungen der Elemente können bis zur fakti-

schen Ausführung der Leistungen nicht exakt bestimmt werden. Allerdings ist es für diese Elemente möglich, auf der Basis von Vergangenheitsdaten und Expertenwissen eine Bandbreite potenzieller Ausprägungen zu definieren. Eine deterministische Rechnung, die mit unveränderlichen Werten rechnet, stößt bei solchen Fragestellungen an ihre Grenzen. Das vorhandene Wissen über mögliche Abweichungen von den Soll-Werten kann nicht berücksichtigt werden (*Sander et al. 2010*). Es besteht somit der Bedarf an einer probabilistischen Methode, die das Wissen über die Unsicherheit der angesetzten Kennwerte mathematisch erfasst und in die Ergebnisberechnung integriert.

### **3 Einordnung der Risikosimulation in das Risikomanagement**

#### **3.1 Risiko und Risikomanagement**

Für den Begriff des Risikos existieren verschiedene Definitionen. Eine einheitliche Begriffsbestimmung lässt sich in der Literatur nicht finden. Die Definitionen können hinsichtlich der Begriffsweite in zwei Kategorien eingeteilt werden. Die erste Kategorie betrachtet Risiken ausschließlich als negative Ereignisse. DREES/PAUL definieren bspw. das Risiko als „[...] eine Handlung oder Aktivität mit nachteiligen Folgen [...]“ (*Drees und Paul 2008*). Die Definitionen der zweiten Kategorie beziehen die Möglichkeit von positiven Entwicklungen ein. Das Risiko zeigt sich nicht ausschließlich negativ, sondern erhält einen neutralen Charakter. HARRANT/HEMMRICH beschreiben das Risiko als „[...] ein noch nicht eingetretenes Ereignis, welches einen positiven oder negativen Einfluss auf das Erreichen der Projektziele hat.“ (*Harrant und Hemmrich 2004*).

Für die Fragestellung in diesem Beitrag eignet sich die neutrale Riskodefinition. Die Ausführungen in Kapitel 2 haben bereits gezeigt, dass Risiken zu einer Erhöhung wie auch zu einer Minderung der Projektrendite führen können. Das Projektziel zur Erreichung der kalkulierten Projektrendite kann durch den Eintritt von Risiken positiv oder negativ beeinflusst werden. Um die Projektrendite zu steigern oder zumindest eine negative Verfehlung zu verhindern, muss ein Risikomanagement betrieben werden.

Das Risikomanagement schafft eine strukturelle Vorgehensweise für den Umgang mit den Risiken eines Projektes. Die Risiken werden systematisch erfasst und be-

wertet, um geeignete Maßnahmen ergreifen und überwachen zu können. Durch die Anwendung eines Risikomanagementsystems sollen die unternehmerische Existenz und zukünftige Erfolge sichergestellt sowie die Risikokosten optimiert werden (Martin und Bär 2002). Die Durchführung des Risikomanagements ist kein einmaliger Vorgang, sondern stellt sich als stetig wiederholender Prozess dar. Der Risikomanagementprozess kann in Form eines Regelkreises beschrieben werden.

### 3.2 Regelkreis des Risikomanagements

Der Regelkreis des Risikomanagementprozesses bildet die einzelnen Schritte zum Umgang mit den Risiken innerhalb eines Projektes ab. Bild 3.1 schlüsselt den Risikomanagementprozess in drei Hauptphasen mit jeweils zwei oder drei Teilschritten auf.

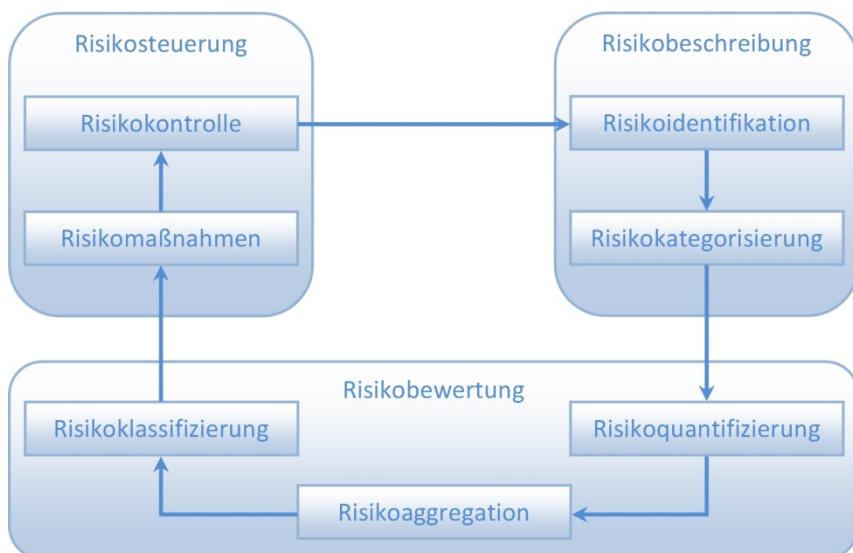


Bild 3.1: Der Risikomanagementprozess als Regelkreis

#### Phase 1: Risikobeschreibung

Die erste Phase des Risikomanagementprozesses analysiert die potenziellen Risiken, mit denen sich das Projekt konfrontiert sieht. Im Schritt der *Risikoidentifikation* soll eine umfassende Übersicht der Risiken erstellt werden. Der Fokus in diesem Schritt liegt auf der Vollständigkeit der möglichen Risiken. Nicht erfasste Risiken können in den späteren Phasen nicht berücksichtigt werden. In der *Risikokategorisierung* erfolgt die Einteilung der Risiken anhand ihrer Ursache. Die

systematische und geordnete Auflistung erleichtert die effiziente Bearbeitung der Risiken durch Experten.

### **Phase 2: Risikobewertung**

Die Phase der Risikobewertung beurteilt die Auswirkungen der Risiken auf die Projektziele. Zunächst werden in der *Risikoquantifizierung* die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Tragweite eines jeden Risikos bestimmt. Die Festlegung dieser Parameter beruht auf objektiven und subjektiven Einschätzungen des Anwenders. Durch die *Risikoaggregation* werden die verschiedenen Risiken zu einem Gesamtrisiko zusammengeführt. Die Verdichtung der Risiken ist vor allem dann hilfreich, wenn die Gesamtsituation des Projektes auf der Basis einer Vielzahl möglicher Risiken beurteilt werden soll. Die Risikobewertung endet mit der *Risikoklassifizierung*. Im Gegensatz zur ursachenbezogenen Risikokategorisierung werden die Risiken in diesem Schritt nach ihren Auswirkungen unterschieden. Dadurch sollen die Risiken mit einem großen Einfluss auf die Projektziele von den Risiken mit geringem Einfluss getrennt und die Effizienz des Risikomanagements erhöht werden.

### **Phase 3: Risikosteuerung**

In der Risikosteuerung erfolgt die Festlegung von *Risikomaßnahmen* auf Basis der Ergebnisse der Risikobewertung. Die Bewältigung der Risiken kann ursachenbezogen oder wirkungsbezogen durchgeführt werden. Zu den ursachenbezogenen Maßnahmen gehören die Risikoeliminierung und die Risikominderung. Wirkungsbezogene Maßnahmen sind Risikoübernahme, Risikoübertragung oder Risikoversicherung. Die *Risikokontrolle* prüft die Wirksamkeit der getroffenen Maßnahmen und erfasst die neue Ist-Situation als Ausgangspunkt für die nächste Iteration des Risikomanagementprozesses.

## **3.3 Risikomodellierung und Risikosimulation in der Risikobewertung**

Die Risikomodellierung und die Risikosimulation kommen in der Phase der Risikobewertung zur Anwendung. Die Risikomodellierung versucht als Instrument der Risikoquantifizierung die verschiedenen Risiken hinreichend genau abzubilden. An dieser Stelle ist ein Kompromiss zwischen exakter Abbildung des Risikos und dem

Aufwand, der zur Ermittlung der exakten Abbildung notwendig ist, zu finden. In diesem Beitrag werden die Risiken mittels probabilistischer Ansätze modelliert. Dabei haben sich einfache Wahrscheinlichkeitsverteilungen wie die Rechteck-, die Dreieck-, die Trapez- oder die Betaverteilung bewähren können.

Die Risikosimulation ist eine Methode der Risikoaggregation. Durch die Simulation werden die einzelnen Risiken zu einem Gesamtrisiko verdichtet. Als Verfahren wird die Monte-Carlo-Simulation verwendet. Die Monte-Carlo-Simulation entspricht der Vorgehensweise einer Szenarioanalyse. Aus den modellierten Wahrscheinlichkeitsintervallen der verschiedenen Risiken wählt das Verfahren bei jeder Iteration genau einen zufälligen Wert aus. Die Kombination dieser Realisierungen kann als ein mögliches Szenario betrachtet werden. Die Werte gehen in den Algorithmus zur Berechnung der Zielgröße, zum Beispiel der Projektrendite, ein. Durch die wiederholte Simulation möglicher Szenarien kann eine repräsentative Prognose für die Risikosituation des Auftragnehmers ermittelt werden.

Das nachfolgende Kapitel vertieft das Vorgehen zur Risikomodellierung und der Risikosimulation am Beispiel eines probabilistischen Modells zur Berechnung der Projektrendite.

## **4 Entwicklung eines probabilistischen Modells für die Risikosimulation aus Sicht des Auftragnehmers**

### **4.1 Anbindung an das Projektcontrolling**

Das Risikomodell soll die Basis für ein projektbegleitendes Risikocontrolling schaffen. Die Risikosituation des Bauprojektes muss zu jedem Zeitpunkt prognostiziert werden können und soll auf den Daten des Projektcontrollings basieren. Aus diesem Grund bedarf es zunächst eines Konzeptes zur Integration des Risikomodells in die bestehenden Prozesse des Projektcontrollings. Bild 4.1 zeigt die Verknüpfung des Risikocontrollings mit dem Projektcontrolling. Ausgangspunkt der Betrachtung ist die Angebotskalkulation des Auftragnehmers. In der Projektphase vor der Bauausführung bestehen die notwendigen Daten aus dem Projektcontrolling für die Risikosimulation aus den Soll-Leistungsmengen des Leistungsverzeichnisses und den Soll-Kostenansätzen der Kalkulation. Auf der Basis dieser Daten und einer weitergehenden Risikomodellierung kann eine erste Risikoprognose durch-

geführt werden. Diese Risikoprognose stellt das gesamte Risikopotenzial des Projektes dar und unterstützt damit den Auftragnehmer in einer risikoorientierten Entscheidungsfindung über die Abgabe des Angebots. Durch eine umfängliche Risikobetrachtung vor Angebotsabgabe soll dem Auftragnehmer die Risikosituation des Projektes verdeutlicht und die unbewusste Übernahme von Projekten mit hohem Risikopotenzial verringert werden.

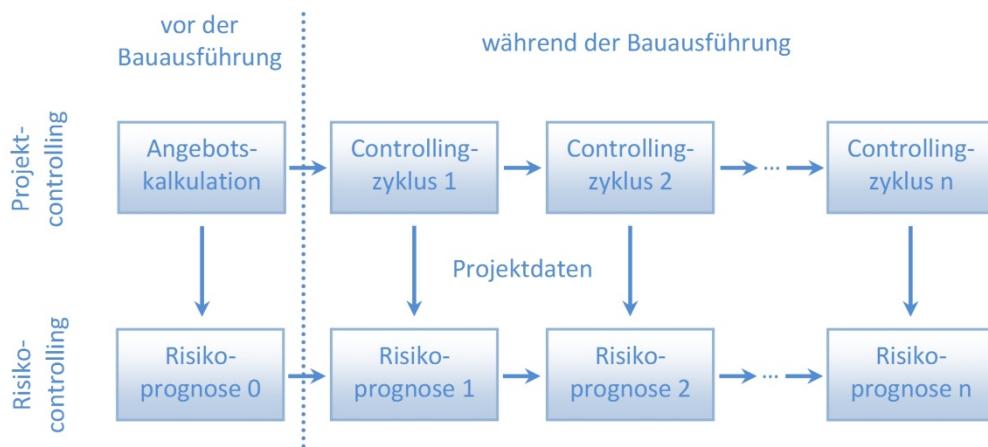


Bild 4.1: Einbindung des Risikocontrollings in das Projektcontrolling

Während der Bauausführung verringert sich das Risikopotenzial des Projektes durch die Herstellung der geforderten Bauleistung. Risikobehaftete Soll-Werte werden durch sichere Ist-Werte ersetzt. Die in den Controlling-Zyklen aufgenommenen Ist-Werte fließen in das Risikomodell ein, um bei einer weiteren Risikoprognose nur die tatsächlich risikobehafteten Werte zu berücksichtigen. Zu diesen Ist-Werten gehören insbesondere die Ist-Leistungsmengen. Neben den Ist-Werten müssen aber auch neue Soll-Daten aus der Änderung der Bauaufgabe oder des Bauprozesses (zum Beispiel durch zusätzlich angeordnete Leistungen) oder aktuelle Erkenntnisse über bestehende und neue Risiken aus dem Projektcontrolling in das Risikomodell aufgenommen werden können.

## 4.2 Modularer Modellaufbau

Der Leistungsumfang bei einem Bauprojekt kann sich während der Bauausführung sehr oft ändern. Neue Leistungspositionen ergänzen das bestehende Leistungsverzeichnis und alte Leistungspositionen können komplett entfallen. Die Risiko-

situation des Bauprojektes verändert sich damit ebenfalls. Das Risikomodell muss die Ist-Situation des Projektes zu jedem Zeitpunkt korrekt abbilden, um geeignete Risikoprognosen gewährleisten zu können. Die Änderungen der Bauaufgabe und des Bauprozesses müssen leicht in das Modell integriert werden können, um die Effektivität der Risikobetrachtung sicherzustellen. Aus diesem Grund wird ein modularer Aufbau für das Risikomodell gewählt. Die Module stellen abgeschlossene Einheiten dar, die spezifische Aufgaben erfüllen. Über definierte Verknüpfungen tauschen die Module verschiedene Daten aus. Bild 4.2 zeigt den Aufbau des Risikomodells mit wichtigen Verknüpfungen zwischen den Modulen.

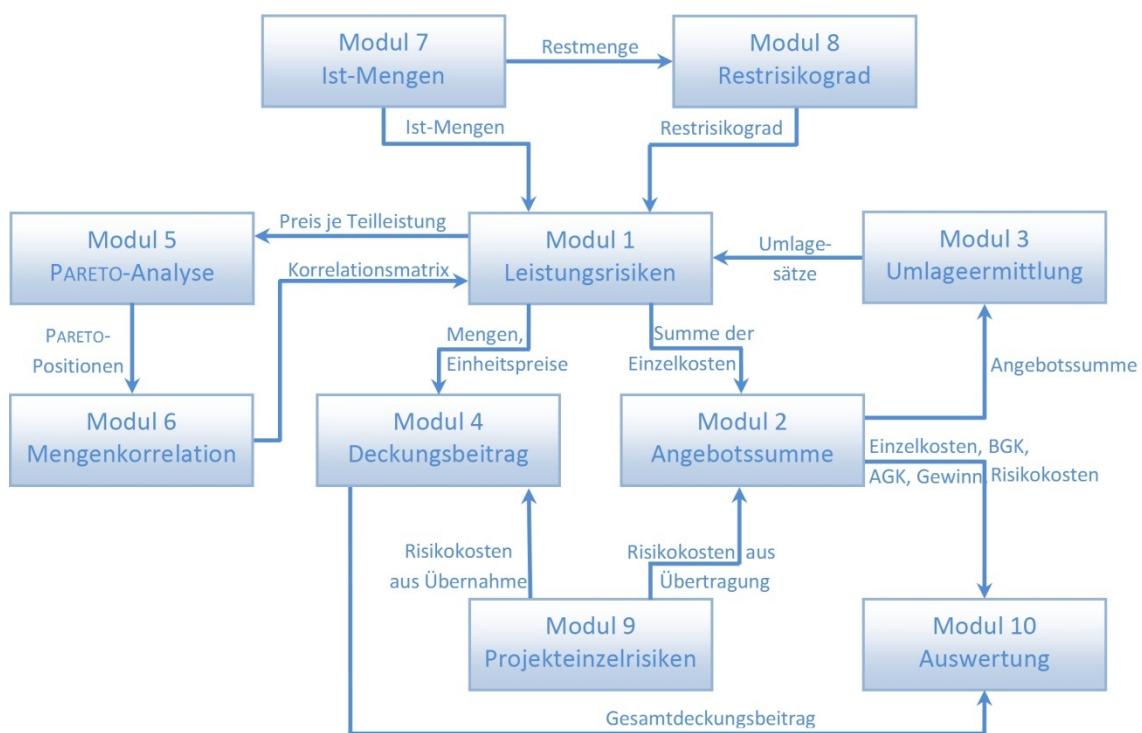


Bild 4.2: Modularer Aufbau des Risikomodells

### Module 1, 2, 3 und 4 – Berechnung der Angebotssumme und der Projektrendite

Die Module 1 bis 4 bilden die Berechnung zur Ermittlung der Angebotssumme und der Projektrendite ab (Drees und Paul 2008). Sie stellen den Kern des Modells dar. Das *Modul 1 Leistungsrisiken* enthält die Leistungspositionen des Leistungsverzeichnisses mit den jeweiligen Mengenansätzen sowie die kalkulierten Kostenansätzen des Auftragnehmers. In diesem Modul werden die Mengen- und Kostenrisiken modelliert (siehe Abschnitt 4.3). In *Modul 2 Angebotssumme* werden die

Beträge für die Allgemeinen Geschäftskosten sowie Wagnis und Gewinn berechnet und die Angebotssumme des Projektes bestimmt. Die Allgemeinen Geschäftskosten, Wagnis und Gewinn müssen wie die Baustellengemeinkosten auf die Einzelkosten der Teilleistungen umgelegt werden. In *Modul 3 Umlageermittlung* werden die Gemeinkostenumlagesätze ermittelt, um in Modul 1 die Kosten jeder Leistungsposition inklusive der Gemeinkosten zu berechnen. Diese Kosten fließen zusammen mit den Mengenansätzen und den fixierten Einheitspreisen in das *Modul 4 Projektrendite* ein. Dieses Modul berechnet den Gewinn oder Verlust des Auftragnehmers für das Bauprojekt. Bei einer deterministischen Rechnung ohne Risikobetrachtung entspricht das Ergebnis aus Modul 4 dem in Modul 2 kalkulierten Gewinn.

### **Modul 5 – PARETO-Analyse**

Die Leistungsbeschreibung mittels eines Leistungsverzeichnisses umfasst häufig eine Vielzahl von Leistungspositionen. Die Anzahl der Leistungspositionen liegt für gewöhnlich im dreistelligen Bereich; kann diesen Bereich aber auch übersteigen. Eine Modellierung aller Risiken zeigt sich aufgrund des hohen Aufwands als nicht praktikabel. Die Konzentration fällt auf die Risiken, deren Auswirkungen die Projektrendite am stärksten beeinflussen können. Dabei kommt das PARETO-Prinzip zur Anwendung. Das PARETO-Prinzip besagt, dass ein Großteil der Risiken einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Projektrendite besitzt, während ein kleiner Teil der Risiken die Projektrendite sehr stark beeinflussen kann. Eine Untersuchung von FLEMMING ET AL. zeigt an einem konkreten Beispiel, dass die Risikosimulation unter Anwendung des PARETO-Prinzips mit nur 10 Prozent der möglichen Risiken aus Kosten- und Mengenabweichungen gegenüber der Simulation aller Risiken zu einem gleichwertigen Ergebnis führt (FLEMMING ET AL. 2011). Die Aufgabe des *Moduls 5* besteht in der Bestimmung der Leistungspositionen mit dem größten Einfluss auf die Projektrendite. Dabei werden die Leistungspositionen absteigend anhand des Gesamtpreises sortiert. Die Leistungspositionen werden der Gruppe der relevanten Risiken, der sogenannten PARETO-Positionen, zugeordnet, bis der kumulierte Gesamtpreis der Leistungspositionen einen zu definierenden Grenzwert erreicht. Dieser Grenzwert kann zum Beispiel „80 Prozent der Angebotssumme“ sein. Es werden dann nur die Risiken der Leistungspositionen modelliert, deren Gesamtpreis zusammen 80 Prozent der Angebotssumme ergibt.

## Modul 6 – Korrelation der Mengenansätze

Die Risikosimulation erzeugt verschiedene Szenarien, die mögliche Realisierungen des Bauprojektes darstellen. Die Ergebnisse der Simulation können nur dann eine repräsentative Prognose ergeben, wenn die simulierten Szenarien ein möglichst genaues Abbild der Realität darstellen. Aus diesem Grund ist es notwendig, dass die Abhängigkeiten zwischen den Mengenansätzen im Modell berücksichtigt werden. Es muss zum Beispiel verhindert werden, dass ein erhöhter Betonbedarf mit einer Verringerung des Bewehrungsanteils einhergeht. Diese Abhängigkeiten können mithilfe von Korrelationskoeffizienten modelliert werden. Ein Korrelationskoeffizient kann jeden beliebigen Wert im Intervall zwischen -1 und +1 annehmen. Um auch hier die praktische Anwendbarkeit zu erleichtern, empfiehlt es sich, die Korrelation in Gruppen wie in Tabelle 4.1 einzuteilen. Bei der Einteilung nach CHAU werden die Korrelationskoeffizienten auf sieben mögliche Werte reduziert.

Tabelle 4.1: Korrelationsgruppen nach CHAU (Chau 1995)

Korrelationsgruppe	Koeffizienten	Mittelwert
stark positiv	+1,0 bis +0,7	+0,85
positiv	+0,7 bis +0,4	+0,55
schwach positiv	+0,4 bis +0,1	+0,25
unkorreliert	+0,1 bis -0,1	0,00
schwach negativ	-0,1 bis -0,4	-0,25
negativ	-0,4 bis -0,7	-0,55
stark negativ	-0,7 bis -1,0	-0,85

Das *Modul 6 Mengenkorrelation* erstellt für die PARETO-Positionen aus Modul 5 automatisch eine Korrelationsmatrix, in die die Korrelationskoeffizienten eingetragen werden müssen. Diese Korrelationsmatrix wird mit den modellierten Kosten- und Mengenrisiken in Modul 1 verknüpft.

## Module 7 – Integration der Ist-Mengen

Das Risikomodell soll eine projektbegleitende Risikobetrachtung ermöglichen. Dazu ist es notwendig, dass der Baufortschritt im Modell Berücksichtigung findet. Das *Modul 7 Ist-Mengen* sammelt die in den Controlling-Zyklen aufgemessenen Ist-Mengen der ausgeführten Leistungen. Die Ist-Mengen aus Modul 7 reduzieren die

risikobehafteten Ansätze für die Soll-Mengen in Modul 1. Damit verringert sich das Risiko aus den jeweiligen Leistungspositionen, wenn die Leistung in Teilen oder in der Gesamtheit ausgeführt wurde. In der nächsten Risikoprognose werden dann nur noch die tatsächlich risikobehafteten Teilmengen einer Leistungsposition berücksichtigt.

### Module 8 – Risikograd eines Mengenrisikos

Die Ausführung der Bauleistungen schafft nicht nur Ist-Mengen, sondern lässt auch neue Erkenntnisse über die Mengenrisiken an sich zu. Das verbleibende Risiko für einen Mengenansatz reduziert sich in Abhängigkeit der ausgeführten Menge. Es wird die Annahme getroffen, dass die Schwankung eines größeren Mengenansatzes höher ist als bei einem kleinen Mengenansatz. So wird zum Beispiel die absolute Schwankungsbreite für 100 m<sup>3</sup> Erdaushub höher ausfallen als bei einem Mengenansatz von 10 m<sup>3</sup>. Das vorgegebene Wahrscheinlichkeitsintervall, das das Risiko abbildet, kann somit verringert werden. In *Modul 8 – Restrisikograd* erfolgt die Definition dieser Verringerung mit Hilfe mathematischer Funktionen wie sie Bild 4.3 zeigt. Der gewählte Verlauf für ein Risiko hängt von den Eigenschaften und dem Wissen über das Risiko ab und sollte für jedes Risiko individuell gewählt werden.

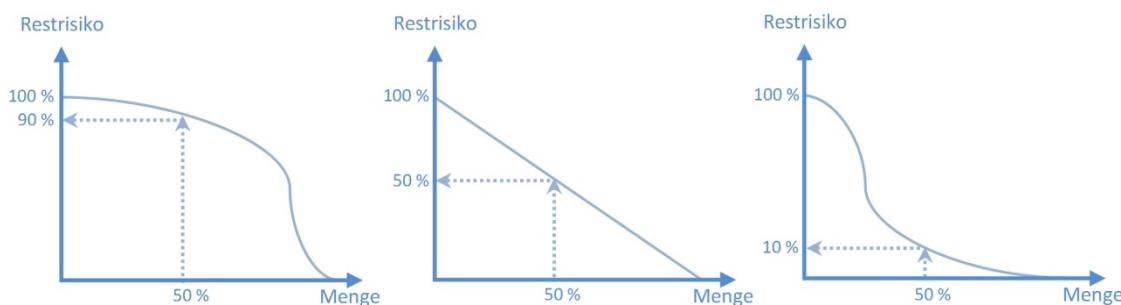


Bild 4.3: Mögliche Funktionen für den Restrisikograd eines Mengenansatzes (Beispiele)

### Modul 9 – Projekteinzelrisiken

Durch das *Modul 9 – Projekteinzelrisiken* werden weitere Risiken in die Risikoprognose einbezogen, die nicht auf die Schwankung der Mengenansätze und der Kostenkennwerte zurückzuführen sind. Für diese Risiken bietet die Literatur verschiedene Auflistungen (vgl. *Girmscheid und Busch 2008* oder *Maria-Sanchez 2005*). Die Modellierung der Einzelrisiken wird in Abschnitt 4.3 näher beschrieben.

Neben der Risikomodellierung ist in diesem Modul die Bestimmung des Risikoträgers von entscheidender Bedeutung. Während Kosten- und Mengenrisiken sowohl Auftraggeber und Auftragnehmer betreffen, können Einzelrisiken einem der beiden Projektpartner direkt zugerechnet werden. Soll der Auftraggeber das Risiko tragen, gehen die Risikokosten aus Modul 9 in Modul 2 als Risikozuschlag bei der Berechnung der Angebotssumme ein. Übernimmt der Auftragnehmer die Konsequenzen für ein Risiko, werden die Risikokosten in Modul 4 bei der Berechnung der Projektrendite nach Formel 2 berücksichtigt.

## **Modul 10 – Auswertung**

Das *Modul 10 – Auswertung* fasst die Ergebnisse der Risikosimulation zusammen. Wichtige Prognosedaten über die Projektrendite, die Angebotssumme sowie die Projekteinzelrisiken werden in diesem Modul übersichtlich dargestellt. Die Form und Detaillierung der Darstellung muss bei jedem Projekt individuell festgelegt werden. Die Gestaltung soll so gewählt werden, dass sie den Anforderungen für die Entscheidungsfindung der Projektbeteiligten entspricht.

### **4.3 Modellierung der Risiken**

Die *DIN 62198 Risikomanagement für Projekte – Anwendungsleitfaden* definiert ein Risiko als die „Kombination aus der Eintrittswahrscheinlichkeit eines bestimmten Ereignisses und seinen Folgen für die Projektziele“. Die Parameter eines Risikos bestehen somit in der Eintrittswahrscheinlichkeit und der monetären Tragweite (Folgen). In der Literatur lässt sich eine Reihe von Publikationen finden, die das Risiko als die Multiplikation von Eintrittswahrscheinlichkeit und Tragweite berechnen. Dieses Vorgehen kann für die Risikosimulation nicht überzeugen. Die Risikosimulation ermittelt verschiedene mögliche Szenarien. In einem Szenario kann ein Risiko eintreten oder nicht eintreten. Es entstehen entweder keine oder die vollen Risikokosten. Unrealistisch ist dagegen, dass ein Risiko zum Beispiel zu 30 Prozent eintritt und nur 30 Prozent der Risikokosten verursacht. Die Eintrittswahrscheinlichkeit „30 Prozent“ bedeutet insofern, dass das Risiko bei 30 Prozent der simulierten Szenarien eintritt und die vollen Risikokosten erzeugt bzw. in 70 Prozent der Szenarien nicht auftritt und keine Risikokosten verursacht. Die Risiko-

kosten R ergeben sich somit als Zufallsvariable in Abhängigkeit der Eintrittswahrscheinlichkeit  $\omega$  und nehmen entweder den gesamten Betrag für die Tragweite T oder null ein.

Die Formel für die Berechnung eines Risikos lautet damit wie folgt:

$$R(\omega) = \begin{cases} T & \text{wenn Risiko eintritt} \\ 0 & \text{wenn Risiko nicht eintritt} \end{cases} \quad (3)$$

Die Tragweite T ist in dieser Formel ein deterministischer Wert. Wie bereits ausgeführt, kann ein deterministischer Wert nicht das gesamte Wissen über das Risiko abbilden. Für die Modellierung der Tragweite eines Risikos werden Wahrscheinlichkeitsverteilungen vorgegeben. Die Tragweite stellt sich damit nicht mehr als ein konstanter Wert, sondern als eine Variable dar. In Abhängigkeit des Wissens über ein Risiko eignen sich unterschiedliche Verteilungen. Bild 4.4 zeigt drei mögliche Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Durch die Form der Wahrscheinlichkeitsverteilung können die Werte innerhalb der vorgegebenen Intervalle unterschiedlich gewichtet werden.



Bild 4.4: Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Modellierung der Risiken

Die Risikosimulation erfolgt somit bei jeder Iteration in zwei Stufen. Zunächst wird der Eintritt des Risikos in Abhängigkeit der vorgegebenen Eintrittswahrscheinlichkeit simuliert. Wenn das Risiko eintritt, wird aus dem vorgegebenen Wahrscheinlichkeitsintervall für die Tragweite ein Wert für die Risikokosten ermittelt. Dieser Wert geht in die Formeln zur Berechnung der Projektrendite oder Angebotssumme ein. Dieses Vorgehen wiederholt sich bei jeder Iteration und für jedes Risiko. Eine Ausnahme bilden die Risiken aus den Mengen- und Kostenansätzen. Diese Risiken bilden die zu erbringende Leistung ab und sind somit unvermeidlich vorhanden. Die Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Risiken beträgt 100 Prozent. Die Simulation des Eintritts entfällt. Es werden nur potenzielle Werte aus den vorgegebenen

nen Intervallen ermittelt. Es ist zum Beispiel nicht notwendig, den Eintritt des Stahlpreisrisikos zu simulieren, sondern nur in welcher Höhe dieses Risiko eintritt.

#### 4.4 Risikosimulation für ein Beispielprojekt

Als Beispiel dient ein Bauprojekt zur Errichtung des Rohbaus für ein Laborgebäude mit zwei anliegenden Bürotrakten. Das Leistungsverzeichnis umfasst insgesamt 358 Leistungspositionen. Bei einer deterministischen Rechnung ergibt sich eine Angebotssumme von 4.103.453,01 € und eine kalkulierte Projektrendite von 87.685,46 €. Die PARETO-Analyse ergibt, dass die 39 größten Leistungspositionen (elf Prozent) zusammen einen Anteil von 3.323.869,84 € (81 Prozent) der Angebotssumme erwirtschaften. Von den 21 identifizierten Projekteinzelrisiken übernimmt der Auftragnehmer 13, dem Auftraggeber werden acht Einzelrisiken übertragen.

Die Monte-Carlo-Simulation wird mit 5.000 Iterationen durchgeführt. Es werden somit 5.000 mögliche Szenarien mit den jeweiligen Werten für die Projektrendite ermittelt. Die Simulationsergebnisse für die Projektrendite lassen sich in Form eines Histogramms visualisieren. Bild 4.5 zeigt ein solches Histogramm für die Risikosimulation vor der Bauausführung. Diese Risikoprognoze verdeutlicht das gesamte Risikopotenzial des Bauprojekts. Für die bessere Bewertung der Simulationsergebnisse ist in der Abbildung der Wert für die Projektrendite aus der deterministischen Berechnung eingetragen.

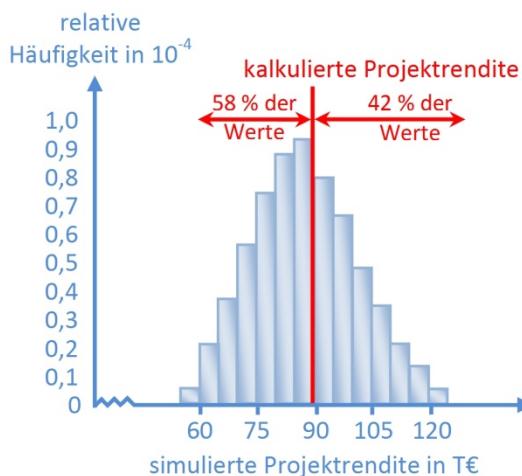


Bild 4.5: Visualisierung der Simulationsergebnisse

Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit dem kalkulierten Wert für die Projektrendite zeigt, dass die Mehrheit der simulierten Szenarien eine Projektrendite unterhalb der kalkulierten Projektrendite besitzt. Dies kann vor allem auf die Projekteinzelrisiken zurückgeführt werden. Dieses Bauprojekt weist damit ein erhöhtes Gefahrenpotenzial auf. Vor der endgültigen Angebotsabgabe steht der Auftragnehmer vor der Entscheidung, weitere Projekteinzelrisiken dem Auftraggeber zu übertragen, wodurch allerdings die Chance auf eine Auftragserteilung sinkt, das Angebot gar nicht abzugeben oder dieses Bauprojekt mit dem höheren Gefahrenpotenzial auszuführen. Für die Entscheidungsfindung können weitere Risikoprognosen mit anderen Risikokonstellationen durchgeführt werden, bei denen zum Beispiel weitere Risiken an den Auftraggeber übertragen werden oder vom Auftragnehmer Risiken übernommen werden, die bisher dem Auftraggeber übertragen wurden.

Während der Bauausführung dienen die Ergebnisse der Risikoprognoze zur Einschätzung des zukünftigen Verlaufs des Bauprojektes mit dem Fokus, die kalkulierte Projektrendite zu erreichen. Das Risikopotenzial soll während der Ausführung sinken. Dies muss sich in den Prognosen bestätigen. Bei Erhöhung des Risikopotenzials während der Ausführung sind geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um die kalkulierte Projektrendite zu erreichen.

## 5 Zusammenfassung

Dieser Beitrag stellte ein probabilistisches Modell für Risikosimulation eines Bauprojektes vor. Zunächst wurde die Notwendigkeit für ein Risikomanagement von Bauprojekten beschrieben. Es konnte festgestellt werden, dass Risiken die Projektrendite des Auftragnehmers positiv oder negativ beeinflussen. Um diese Auswirkungen steuern zu können, bedarf es eines Risikocontrollings.

Im Fokus des Beitrags wurde ein Risikomodell vorgestellt, dass die Möglichkeit schafft, verschiedene Kosten-, Mengen- und Projekteinzelrisiken zu einem Gesamtrisiko zu verdichten. Hierfür wird das Verfahren der Monte-Carlo-Simulation eingesetzt. Durch die Simulation mehrerer möglicher Szenarien kann eine repräsentative Risikoprognoze für das Bauprojekt ermittelt werden. Durch die Anbindung des Risikomodells an das Projektcontrolling, insbesondere durch die

Integration der Ist-Mengen und des während der Ausführung gewonnenen Wissens über die Risiken, wird ein projektbegleitendes Risikocontrolling ermöglicht.

## Literatur

*Chau, K. W. (1995): Monte Carlo simulation of construction costs using subjective data. In: Construction Management and Economics. Vol. 13, 1995, S. 369 – 383.*

*Drees, G. und Paul. W (2008): Kalkulation von Baupreisen – Hochbau, Tiefbau, Schlüsselfertiges Bauen. Mit kompletten Berechnungsbeispielen. 10. Auflage, Bauwerk Verlag, Berlin, 2008.*

*Flemming, C.; Netzker, M. und Schöttle, A. (2011): Probabilistische Berücksichtigung von Kosten- und Mengenrisiken in der Angebotskalkulation. In: Bautechnik. Vol. 88, Nr. 2, 2011.*

*Girmscheid, G. und Busch, T. A. (2008): Unternehmensrisikomanagement in der Bauwirtschaft. 1. Auflage, Bauwerk Verlag, Berlin, 2008.*

*Harrant, H. und Hemmrich, A. (2004): Risikomanagement in Projekten. 1. Auflage, Hanser Verlag, München, Wien, 2004.*

*Leimböck, E.; Klaus, U. R. und Hölkermann, O. (2007): Baukalkulation und Projektcontrolling unter Berücksichtigung der KLAR Bau und der VOB. 11. Auflage, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2007.*

*Maria-Sanchez, P. (2005): Neuronal risk assessment system for construction projects. 1. Auflage, Expert Verlag, Renningen, 2005.*

*Martin, T. A. und Bär, T. (2002): Grundzüge des Risikomanagements nach KonTraG – das Risikomanagementsystem zur Krisenfrüherkennung nach § 91 Abs. 2 AktG. 1. Auflage, Oldenbourg Verlag, München, Wien, 2002.*

*Sander, P.; Spiegl, M. und Schneider E.* (2010): Die exakte Zahl. Gedanken zum Umgang mit Unschärfen. In: Die Wirtschaftliche Seite des Bauens. Festschrift zum 60. Geburtstag von Rainer Wanninger. Institut für Bauwirtschaft und Betrieb, TU Braunschweig, Heft 50, 2010, S. 605 – 616.

*Seyfferth, G.* (2003): Praktisches Baustellen-Controlling – Handbuch für Bau- und Generalunternehmen. 1. Auflage, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2003.



Dipl.-Ing. Ramez Edris,  
Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz,  
Dr. rer. nat. Armin Wolf

## **Constraint-basierter Ansatz zur Optimierung von Bauablaufterminplänen auf Basis von optimalen Lohnstundensummen im Hochbau**

Dipl.-Ing. Ramez Edris  
Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz  
Universität Kassel, Institut für Bauwirtschaft  
Fachgebiet Bauorganisation und Bauverfahren  
Mönchebergstraße 7, 34125 Kassel  
Dr. rer. nat. Armin Wolf  
Fraunhofer-Institut für Rechnerarchitektur und Softwaretechnik FIRST  
Kekuléstraße 7, 12489 Berlin

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	145
1 Einleitung .....	145
2 Einzelkosten der Teilleistungen.....	146
3 Optimierte Lohnstundensummen als Basis für die Optimierung des Bauablaufterminplanes .....	147
3.1 Ermittlung der zusätzlichen Lohnkosten wegen gestörter Reihenfolge .....	148
3.2 Beispiel.....	148
3.2.1 Ablaufanalyse am Beispiel einer Etage .....	148
3.2.2 Ermittlung der Lohnzusatzkosten wegen Verletzung der Soft-Constraints.....	150
4 Modellierung des Ablaufproblems .....	152
5 Beispiel .....	153
6 Zusammenfassung und Ausblick .....	154
Literatur .....	154

## Kurzfassung

Die Constraint-Programmierung ist heute ein wichtiger und stetig wachsender Forschungs- und Anwendungsbereich. In der Praxis wird das Paradigma der Constraint-Programmierung in vielen industriellen Bereichen erfolgreich angewandt, um kombinatorische Probleme zu lösen, insbesondere in Planung, Simulation und Diagnose (*Hofstedt, Wolf 2007 S. VII*). In *Edris u.a. (2010)* wird gezeigt, wie lokale und globale Constraint-Modelle der Constraint-Solver Bibliothek firstCS (*Wolf 2006*) effizient für die Modellierung des Bauablaufproblems eingesetzt werden können. Darüber hinaus wurde ein geeignetes Soft-Constraint-Modell auf Basis von normierten Bewertungen für die Modellierung von zweckmäßigen Abhängigkeiten entwickelt sowie eine passende effektive Suchheuristik zur Reduzierung des Suchaufwands anhand eines Anwendungsfalls diskutiert.

In diesem Beitrag wird ein Ansatz zur Optimierung von Lohnstundensummen präsentiert. Im Mittelpunkt der Betrachtung steht dabei der Einfluss der Reihenfolge der Bauaufgaben auf die Aufwandswerte der zugehörigen Bauaufgaben und auf deren Lohnstundenkosten. Dafür wird ein geeignetes Soft-Constraints Modell zur Modellierung der zusätzlichen Lohnstunden bei gestörten Reihenfolgen vorgestellt.

## 1 Einleitung

Zur Bestimmung der Ablauffolge in Bauprojekten wird die Netzplantechnik als klassische Herangehensweise zur Ermittlung von Terminplänen benutzt (*Brandenberger, Ruosch 1993 S. 43*). Dies erlaubt aber nur die Abbildung der gegenseitigen Abhängigkeitsbeziehungen zwischen einzelnen Vorgängen. In der Praxis sind aber auch andere Arten von Abhängigkeiten sehr wichtig, z.B. Abhängigkeiten, die wünschenswert aber nicht zwingend einzuhalten sind, oder Abhängigkeiten, die sich auf mehrere Vorgänge gleichzeitig beziehen. In *Edris u.a. (2010)* wird eine Modellierungsmethode vorgeschlagen, die alle diese Abhängigkeiten berücksichtigen kann und dabei die wünschenswerten Abhängigkeiten von den zwingend notwendigen Abhängigkeiten unterscheidet.

Bauunternehmen trennen meist zwischen Termin- und Kostenplanung, obwohl die Ablaufplanung schon bei geringer Modifikation der Bauabläufe wichtige Inputgrößen auch für die Kostenkalkulation liefern könnte. Eine wichtige Inputgröße der Kalkulation für die Terminplanung sind die Aufwandswerte der Teilleistungen. Die Aufwandswerte sind in der Regel Erfahrungswerte und sind von vielen Faktoren wie Anzahl der Arbeitskräfte, täglicher Arbeitszeit, Fläche eines Fertigungsabschnittes, Gerätekosten usw. abhängig. Die Beziehungen zwischen den Aufwandswerten und diesen Einflussfaktoren können teilweise aus Interaktionsdiagrammen entnommen werden.

Der Aufwandswert der Fertigung einer Aufgabe ist aber auch oft von der Ausführung der anderen Aufgaben abhängig, so dass sich die Produktivität einer Fertigungsgruppe in Fall von Reihenfolgestörungen verschlechtern kann und der tatsächliche Aufwand größer wird. Das hat zur Folge, dass die Lohnkosten während der Ausführung steigen können. In diesem Beitrag soll ein Verfahren zur Optimierung von Bauabläufen auf Basis der optimalen Lohnstundensumme präsentiert werden, das die Bauablaufplanung und die daraus resultierenden Reihenfolgen der Aufgaben mit den Aufwandswerten und den Lohnstunden verknüpft.

## 2 Einzelkosten der Teilleistungen

Die Einzelkosten der Teilleistungen (EKT) werden nach *Keil u.a. (2008 S. 58)*, wie in **Formel 2-1** beschrieben, zusammengefasst.

$$\text{EKT} = \text{Lohnkosten} + \text{Sonstige Kosten} + \text{Gerätekosten} + \text{Fremdleistungskosten}$$

**Formel 2-1:** allgemeine Form der EKT

Die Lohnkosten enthalten die Kosten, die sich aus der Arbeitszeit der gewerbliechen Arbeitnehmer bei der Erstellung der Bauleistung ergeben. Sie bilden im Bauwesen häufig den überwiegenden Anteil an den Gesamtkosten. In manchen Fällen erreichen die Lohnkosten das Drei- bis Fünffache der Materialkosten und sind daher das wichtigste Entscheidungskriterium bei der Auswahl von Fertigungsverfahren. Die sonstigen Kosten enthalten die Kosten für die Baustoffe, Bauhilfsstoffe usw. Die Gerätekosten werden meist nur für große Maschinen getrennt ermittelt. Bei kleineren Geräten werden sie in der Regel den Lohnkosten

zugeordnet. Unter Fremdleistungskosten (Kosten der Nachunternehmerleistungen) werden nur die Kosten für die von Nachunternehmern erbrachten Leistungen verstanden. Im Rahmen dieses Beitrags stehen die Lohnkosten im Mittelpunkt der Betrachtungen. Deshalb werden zur Vereinfachung zunächst nur die Lohnkosten und Materialkosten betrachtet, so dass die EKT nur aus Lohnkosten und Materialkosten bestehen. Die Lohnkosten ergeben sich aus der Multiplikation von Lohnstunden mit dem Mittellohn. Die Lohnstunden der einzelnen Positionen können auf Basis von geschätzten Aufwandswerten und der Menge der Teilleistungen wie folgt berechnet werden: Lohnstunden = Menge \* Aufwandwert. In **Formel 2-2** sind die Einzelkosten der Teilleistungen (pro Einheit) und die Gesamtkosten der Teilleistungen (GKT) zusammengefasst.

$$\text{EKT} = \text{Mittellohn [€/Std]} * \text{Aufwandwert [Std/Einheit]} + \text{Materialkosten[€/Einheit]}$$

$$\text{GKT} = \text{Menge} * (\text{Mittellohn [€/Std]} * \text{Aufwandwert [Std/Einheit]} + \text{Materialkosten [€/Einheit]})$$

**Formel 2-2:** die Einzel- und Gesamtkosten der Einzelleistungen

Für jeden Arbeitsvorgang bzw. für mehrere Arbeitsteilvorgänge, die für eine einheitliche Teilleistung erforderlich sind, werden in der Regel gemeinsame Lohnstundenaufwandswerte gebildet (*Keil u.a. 2008 S.59*). Diese Aufwandswerte werden zur Berechnung der Soll-Lohnstundensumme aller Arbeitsvorgänge der jeweiligen Teilleistung in der Kalkulation eingesetzt. Während der Ausführung kann der tatsächliche Stundenaufwand für die gleichen Arbeitsvorgänge einer Teilleistung variieren. Ursachen dafür sind unter anderem die unterschiedlichen Einflüsse von anderen Bauaufgaben auf die Produktivität der Arbeitsgruppe. Der mögliche zusätzliche Stundenaufwand aufgrund von Störungen durch andere Aufgaben wird in diesem Beitrag mit Hilfe des Soft-Constraints-Modells „DistanceCost“ betrachtet.

### 3 Optimierte Lohnstundensummen als Basis für die Optimierung des Bauablaufterminplanes

Wie beschrieben, stellen die Aufwandswerte in der Angebotsphase eine wesentliche Grundlage zur Kosten- und Zeitberechnung dar. In der Phase der Arbeitsvorbereitung sind sie wichtiger Bestandteil für die Berechnung der Dauern der einzel-

nen Vorgänge und damit die Basis des gesamten Fertigungsablaufes und des Ressourceneinsatzes. Die Reihenfolge der Bauaufgaben hat einen starken Einfluss auf die Produktivität der Fertigungsgruppen, so dass es durch gestörte Reihenfolgen zu erheblichen Produktivitätsminderungen kommen kann, wodurch erhebliche zusätzliche Lohnkosten entstehen können. In diesem Beitrag wird angestrebt, diese zusätzlichen Lohnkosten wegen gestörter Reihenfolge von Bauaufgaben zu vermindern. Zunächst werden die Ursachen der Zusatzlohnstunden wegen gestörter Reihenfolge analysiert und exemplarisch für ein konkretes Beispiel ermittelt.

### **3.1 Ermittlung der zusätzlichen Lohnkosten wegen gestörter Reihenfolge**

Bei der gestörten Reihenfolge entstehen zusätzliche Arbeiten, die oft zusätzliches Personal benötigen und/oder die Produktivität der Fertigungsgruppe vermindern. Ursachen der Produktivitätsminderung bei gestörten Reihenfolgen von Bauaufgaben sind unter anderem:

- Ausweicharbeiten, die nur mit geringerer Produktivität ausführbar sind,
- Zusätzliche Einarbeitungseffekte,
- Kolonnenverstärkung/Überschneidungseffekte,
- Personal und Geräteminderleistungen durch Produktivitätsverluste.

Dieser zusätzliche Aufwand wird in der Praxis durch den Soll-Ist-Vergleich der Leistungsstunden bzw. durch die Feststellung der gegenüber dem ursprünglich geplanten Aufwand mit zusätzlichem Personal und/oder in Überstunden zu leistenden Arbeiten ermittelt. In dem folgenden Beispiel werden exemplarisch die zusätzlichen Arbeiten bestimmt, um prozentuale Zuschläge auf die Aufwandswerte bzw. Stundenlohnsummen der jeweiligen Fertigungsgruppe ermitteln zu können.

### **3.2 Beispiel**

Zunächst werden die in einer Etage auszuführenden Bauaufgaben und deren Abhängigkeiten analysiert.

### 3.2.1 Ablaufanalyse am Beispiel einer Etage

Die Ablaufanalyse dient der Beantwortung der Frage, ob ein Vorgang vor dem anderen aus zweckmäßigen oder zwingenden Gründen auszuführen ist. Die Grundlage dieser Analyse bilden die Abhängigkeitsbeziehungen zwischen den Vorgängen. Die Analyse kann in die lokale und globale Ablaufanalyse unterteilt werden. Die lokale Ablaufanalyse betrifft die am selben Ort auszuführenden Vorgänge. Diese Analyse wird hier für die Ausbauarbeiten in einem Raum am Beispiel einer Trennwandkonstruktion (siehe Bild 3.1) durchgeführt.



Bild 3.1: Ablaufvarianten innerhalb eines Raumes (Sommer 1994 S. 92)

Im Beispiel ist eine Trennwand vom Rohboden bis zur Rohdecke zu erstellen. In dieser Konstruktion kann entweder mit der Trennwand oder mit der Deckeninstal-lation begonnen werden. Danach ist die abgehängte Decke oder die komplett e Fußbodeninstallation durchzuführen. Das ergibt insgesamt vier mögliche Ablauf-varianten, wobei die ganze Etage entsprechend einer gemeinsamen Variante ge- baut wird.

Die folgenden fünf Hard-Constraints sind zu betrachten: Aufgabe 5 vor Aufgabe 2, Aufgabe 5 vor Aufgabe 3, Aufgabe 5 vor Aufgabe 4, da die Trennwand vor der abgehängten Decke, dem Doppelboden sowie der Installation des Fußbodens auszuführen ist. Aufgabe 1 vor Aufgabe 2, Aufgabe 4 vor Aufgabe 3, da innenlie- gende Elemente vor äußereren Elementen auszuführen sind.

Die beiden Soft-Constraints sind:

1. Aufgabe 5 vor Aufgabe 1, damit die Montagewände genau ausgerichtet wer- den und die Installation darauf abgestellt werden kann.
2. Aufgaben 2 vor Aufgabe 3, da die oberen Arbeiten zur Vermeidung von Be- schädigungen vor den unteren Arbeiten besser auszuführen sind.

Innerhalb der Ablaufvariante A sind die beiden Soft-Constraints eingehalten. Bei

den anderen Ablaufvarianten sind ein oder beide Soft-Constraints verletzt. Bei jeder Verletzung von Soft-Constraints entstehen zusätzliche Arbeiten, die wie folgt geschätzt werden können.

### **3.2.2 Ermittlung der Lohnzusatzkosten wegen Verletzung der Soft-Constraints**

#### **1. Aufgabe 5 vor Aufgabe 1:**

Zur Berechnung der Soll-Lohnstundensumme wird für die Wandmontage ein Aufwandwert von  $2 \text{ h/m}^2$  kalkuliert. Für eine Ausführungsmenge von  $300 \text{ m}^2$  wird die Lohnstundensumme in Höhe von  $300 \cdot 2 = 600 \text{ h}$  berechnet – also betragen die Leistungen zur Wandmontage gemäß Soll-Terminplan 600 h.

Die Verletzung dieses Soft-Constraints kann bei Ausrichtung der Wandmontage zu erheblichen Steigerungen des Zeitaufwandes führen, da die genaue Ausrichtung von Wandmontagen nach der Installation von Deckeninstallation zusätzliches Personal (Kolonnenverstärkung) benötigt; die Wandbefestigung ist schwieriger wegen der Deckeninstallation und kann nur mit geringerer Produktivität ausgeführt werden.

Bei der Montage der Deckeninstallation vor den Trennwänden werden die notwendigen Leistungen zur Wandmontage gemäß Ist-Terminplan mit 950 h abgeschätzt. Der zusätzliche Aufwand wegen der Verletzung des Soft-Constraints beträgt daher:  $950 - 600 = 350 \text{ h}$ . Die zusätzliche Mehrleistung je Mengeneinheit ist  $350/300 = 1,17 \text{ h/m}^2$ . Der prozentuale zusätzliche Aufwandwert beträgt  $1,17/2 = 58,5\%$ . Der tatsächliche Aufwandwert bei einer gestörten Reihenfolge beträgt  $2 + 1,17 = 3,17 \text{ h/m}^2$ .

Zur Berechnung des prozentualen Anteils der Zusatzleistungen an den Gesamtkosten sind die Materialkosten ( $30 \text{ €/m}^2$ ) und der Mittellohn von  $22,00 \text{ €/h}$  mit einzubeziehen:

$$\text{GKT(Soll)} = 300 \cdot 2 \cdot 22 + 300 \cdot 30 = 22,200 \text{ €}$$

$$\text{GKT(Ist)} = 300 \cdot 3,17 \cdot 22 + 300 \cdot 30 = 29,900 \text{ €}$$

Damit entstehen zusätzliche Lohnkosten von  $7,700 \text{ €} = 34,7\%$  des Soll-GKT.

## 2. Aufgabe 2 vor Aufgabe 3:

Zur Berechnung der Soll-Lohnstundensumme wird für die abgehängte Decke ein Aufwandswert von 3 h/m<sup>2</sup> kalkuliert. Für eine Ausführungsmenge von 400 m<sup>2</sup> ergibt sich somit die Lohnstundensumme in Höhe von 400\*3= 1200 h (Soll-Ausführungsduer).

Die Verletzung dieses Soft-Constraint führt bei der Montage der abgehängten Decke zu einem höheren Aufwand, da zusätzliche Maßnahmen unternommen werden müssen sowohl für die Sauberkeit als auch dem Schutz der bereits eingebauten Bodeninstallation und Bodenbeläge. Die erforderliche Vorsicht beim Materialtransport vermindert außerdem die Produktivität der Arbeitsgruppe.

Bei Verletzung des Soft-Constraints (die Bodenbeläge werden vor der abgehängten Decke verlegt) werden die Leistungen zur Montage der abgehängten Decke mit 1700 h abgeschätzt. Der zusätzliche Aufwand wäre dann: 1700 – 1200 = 500 h. Je Mengeneinheit ist die zusätzliche Mehrleistung 500/400 = 1,25h/m<sup>2</sup>. Der prozentuale zusätzliche Aufwandwert ist 1,25/3 = 42%. Der tatsächliche Aufwandwert bei einer gestörten Reihenfolge beträgt damit 3 + 1,25 = 4,25 h/m<sup>2</sup>.

Zur Berechnung des prozentualen Anteils der Zusatzleistungen an den Gesamtkosten werden wieder die Materialkosten(40 €/m<sup>2</sup>) und der Mittellohn (22 €/h) mit einbezogen.

$$GKT(\text{Soll})= 400*3*22 + 400*40=42.400 \text{ €}$$

$$GKT(\text{Ist})= 400*4,25*22 + 400*40=53,400 \text{ €}$$

Es ergeben sich zusätzliche Lohnkosten von 11.000 € = 25,94% der Soll-GKT.

Die beiden oben vorgestellten Beispiele wurden in der **Tabelle 3-1** zusammengefasst.

Tabelle 3-1: Berechnung der zusätzlichen Lohnkosten bei gestörten Reihenfolgen

Pos.-Nr.	Soft-Constraints	Teileistungen		Menge der Vorgang X	Einheit	Aufwandswert der Vorgang X (h/Einheit)		Lohnstunden(h)		Zusätzliche Lohnstunden (h)	Mittellohn (€)	Zusätzliche Lohnkosten (€)
		X	Y			soll	gestörter Ablauf	soll	gestörter Ablauf			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Aufgabe 5 vor Aufgabe 1	Trennwand	Deckeninstallation	300	m <sup>2</sup>	2	3,17	600	951	351	22	7722
2	Aufgabe 2 vor Aufgabe 3	Abgehängte Decke	Doppelboden	400	m <sup>2</sup>	3	4,125	1200	1650	450	22	9900

## 4 Modellierung des Ablaufproblems

In *Edris u.a. (2010)* wurde die Bauablaufplanung durch eine endliche Menge von Bauaufgaben und Bauplätzen (Ebenen/Räume) charakterisiert, die einer endlichen Menge von Hard-Constraints und Soft-Constraints unterliegen. Auf der Basis der festgelegten Planungszeiträume der unterschiedlichen Gewerke und dem insgesamt zur Verfügung stehenden Zeitraum wird um eine optimale Lösung gesucht.

Zur Bewertung beliebiger Reihenfolgen von Bauaufgaben werden nach *Edris u.a. (2010)* soft-Constraints mit normierter Bewertung angewendet. Diese Bewertungen beschreiben die Erfüllung oder Verletzung der jeweiligen Reihenfolge.

In diesem Beitrag wird eine Soft-Constraints Klasse „DistanceCost“ zur Modellierung des zusätzlichen Aufwands wegen der gestörten Reihenfolgen eingeführt. Dafür wird der Einfluss der Verletzung von wünschenswerten Reihenfolgen von Bauaufgaben auf deren Lohnstundensummen bzw. Lohnkosten betrachtet.

Alle Soft-Constraints der Klasse „DistanceCost“ werden durch Differenzen zwischen den Start-/Endezeiten zweier Vorgänge x und y modelliert:  $\text{Start}(y) - \text{Ende}(x)$ . Der Erfüllungsgrad wird durch normierte Bewertungen b folgendermaßen definiert: Ist die Differenz  $\text{Start}(y) - \text{Ende}(x) \geq 0$ , dann ist die Bewertung  $b = 0$ . Ist sie kleiner 0, dann ist die Bewertung  $b = 1$ . Dies bedeutet, dass die Variable x (Ende des Vorgängers) kleiner oder gleich der Variabel y (Start des Nachfolgers) sein sollte. Das bedeutet, bei der Einhaltung der Soft-Constraint für die Reihenfolge zweier Aufgaben entstehen keine zusätzlichen Lohnstunden. Dafür wird der jeweilige Soft-Constraint „DistanceCost“ mit (0) bewertet. Ansonsten ist das Soft-Constraint mit (1) zu bewerten.

Die Bestimmung des Gewichtes eines Soft-Constraints erfolgt in diesem Beitrag durch die Berechnung des möglichen zusätzlichen Aufwands wegen der Verletzung des Soft-Constraints (Verletzung der Reihenfolge). Bei Verletzung des Soft-Constraints entstehen dem Vorgänger (Teilleistung x) zusätzliche Lohnstunden, welche aus dem Umfang der zusätzlichen Arbeiten berechnet werden können (siehe Absatz 3.2.2).

Die Gewichte der Soft-Constraints werden mit ihren normierten Bewertungen multipliziert. Die Zielfunktion, die es zu optimieren gilt, ist die Summe der Produkte

von normierten Bewertungen und Ihrer Gewichte über alle Soft-Constraints. Das ergibt die optimale Reihenfolge, die die maximale Erfüllung der Soft-Constraints erreicht und damit minimale zusätzliche Lohnstunden verursacht.

## 5 Beispiel

Das folgende Beispiel betrachtet das Ablaufproblem aus **Bild 3.1**. In dem Beispiel sollte die Variante A ausgewählt werden, da alle zweckmäßigen und auch zwingenden Abhängigkeiten eingehalten sind. Es ist aber auch der Ablauf C möglich. Die Abläufe B und D sind grundsätzlich auch möglich, da diese die zwingenden Bedingungen (Hard-Constraints) erfüllen; sie sind jedoch weniger geeignet, da zweckmäßige Bedingungen (Soft-Constraints) verletzt werden. In **Tabelle 5-1** werden die möglichen Ablaufvarianten mit der Zahl der erfüllten Soft-Constraints und deren erreichten Zielfunktionswert innerhalb einer Etage nach der Lösung mit Hilfe der Constraint-Bibliothek firstCS dargestellt.

Tabelle 5-1: Mögliche Ablaufvarianten innerhalb einer Etage

Variante	Reihenfolgen					Erfüllte Soft-Constraints	Zielfunktionswert	
							<i>h</i>	€
A	5	1	2	4	3	2	0	0
B	5	1	4	3	2	1	450	9.900
C	1	5	2	4	3	1	351	7.722
D	1	5	4	3	2	0	801	17.622
E	5	4	3	1	2	1	450	9.900

Der Tabelle ist zu entnehmen, dass die Variante A die optimale Variante ist. Darüber hinaus sind vier weitere Varianten möglich. Zwar lassen sich die Ergebnisse in der Tabelle für das einfache Beispiel einer Etage mit geringen Aufwand ausrechnen, aber für eine größere Menge von Bauaufgaben und Gebäuden mit mehreren Stockwerken wächst der Aufwand erheblich und erfordert unbedingt einen Constraints-Solver, um die optimale Lösung ermitteln zu können. Das vorgestellte Beispiel kann zu mehreren Stockwerken erweitert werden, die dieselbe Konstruktion wie *Bild 3.1* beschreiben. Für eine gegebene Gesamtzeitdauer kann das Optimierungsproblem anhand einer chronologischen Tiefensuche auf Basis von binä-

ren Suchbäumen gelöst werden (Edris *u.a.* 2010). Dazu werden Ablauffreihenfolgen ermittelt, die die Einhaltung einer maximalen Anzahl von Soft-Constraints erlauben. Es wurde gezeigt, dass für kürzere Gesamtbauzeiten nur Lösungen existieren, die Soft-Constraints verletzen. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit erlauben, die Kosten dieser Verletzung abzuschätzen und an Stelle der Zahl der verletzten Soft-Constraints deren Gewichte (Kosten) zu minimieren.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein constraint-basierter Lösungsansatz zur Bauablaufplanung im Hochbau vorgestellt. Zukünftige Arbeiten zur Erweiterung des Modells umfassen die Definition von Constraints für die unterschiedlichen Ressourcenarten (exklusiv, kumulativ, etc.) sowie die Entwicklung von Methoden zur Formalisierung der Zusammenhänge zwischen den möglichen Startpunkten für die einzelnen Gewerke und die notwendigen zusätzlichen Lohnstunden, um unter äußereren Bedingungen wie eingeschränkter Bauzeit eine kostengünstige Lösung zu ermitteln. Ferner muss das gesamte Konzept anhand eines realen Projekts validiert werden.

## Literatur

*Brandenberger, J.; Ruosch, E.*(1993): Ablaufplanung im Bauwesen. Baufachverlag AG Dietikon, 1993.

*Edris, R.; Franz, V.; Wolf, A.* (2010): Verwendung von constraint-basierten Modellen zur Lösung von Bauablaufproblemen mit Hilfe der Constraint-Solver-Bibliothek firstCS. Tagungsband der 14.ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Hrsg.: Gert Zülch & Patricia Stock Karlsruhe, KIT Scientific, 2010, ASIM 2010, S. 173-180.

*Hofstedt, P.; Wolf, A.*(2007): Einführung in die Constraint-Programmierung. Springer-Verlag Berlin, 2007.

*Keil, W.; Martinsen, U.; Vahland, R.; Fricke, J.*(2008): Kostenrechnung für Bauingenieure. Werner-Verlag, 11.Auflage, Köln, 2008.

*Rossi, F.; van Beek, P.; Walsh, T.*(2006): Handbook of Constraint Programming. 1. Aufl. Elsevier Amsterdam 2006.

*Sommer, H.*(1994): Projektmanagement im Hochbau. Springer-Verlag, 2. Auflage, Berlin, Heidelberg, 1994.

*Wolf, A.*(2006): Object-Oriented Constraint Programming in Java Using the Library firstcs. *20th Workshop on Logic Programming*. Technische Universität, Wien, 2006, S. 21-32.



Dipl.-Ing. Martin Kugler,  
Dipl.-Ing. Basel Kordi,  
Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz

## **Der Aufbau der Modellierungsumgebung CiSmo**

Dipl.-Ing. Martin Kugler  
Dipl.-Ing. Basel Kordi  
Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz  
Universität Kassel, Institut für Bauwirtschaft  
Fachgebiet Bauorganisation und Bauverfahren  
Mönchebergstraße 7, 34125 Kassel

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	159
1 Systemstruktur .....	159
2 Technologische Umsetzung .....	162
2.1 VBA .....	162
2.2 Datenhaltung innerhalb der Zeichnungsdatei .....	163
2.3 MySQL .....	163
2.4 XML .....	164
3 Programmablauf und Benutzeroberflächen .....	165
4 Fazit .....	178
Literatur .....	179

## Kurzfassung

In diesem Beitrag werden die Benutzeroberflächen der Modellierungsumgebung CiSmo vorgestellt. Die Abkürzung CiSmo steht für „CAD-integrierte Simulationsmodellierung für die Bauablaufsimulation im Hochbau“. Die Implementierung von Simulationsmodellen für die Bauablaufsimulation soll durch CiSmo erleichtert werden, indem für die Parametrisierung und die Modellbildung CAD-Daten aus der Entwurfsphase verwendet werden. Die Modellierungsumgebung wurde im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projektes am Institut für Bauwirtschaft der Universität Kassel entworfen und implementiert. Sie ermöglicht die Generierung kompletter agentenbasierter Simulationsmodelle in der CAD-Anwendung AutoCAD Architecture auf der Basis von bauteilorientierten CAD-Gebäudemodellen.

## 1 Systemstruktur

Das Modellierungswerzeug **CiSmo** (CAD-integrierte Simulationsmodellierung für die Bauablaufsimulation im Hochbau) ermöglicht die Entwicklung kompletter agentenbasierter Simulationsmodelle in der CAD-Umgebung Architecture von Autodesk. Architecture basiert auf dem CAD-Programm AutoCAD und wurde speziell für das Bauwesen entwickelt. Die Bauwerke werden innerhalb von Architecture in Form von bauteilorientierten 3-D-Gebäudemodellen dargestellt. Über ein im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes Menüsystem wird innerhalb von Architecture der Zugriff auf Anwendungsoberflächen ermöglicht, die der Parametrisierung eines Prozessmodells zur Beschreibung des Bauablaufs dienen. CiSmo ermöglicht es, die für die Bauablaufsimulation benötigten Bauteilparameter automatisch aus dem bauteilorientierten CAD-Modell auszulesen und in das Simulationsmodell zu übertragen. Die komplette Modellierung und Parametrisierung des Simulationsmodells findet im CAD-System statt. Das CAD-System wird dadurch zu einem Editor für Simulationsmodelle erweitert. Diese Vorgehensweise bietet den Vorteil, dass zum einen die CAD-Daten aus der Entwurfsphase übergangslos für die Bauablaufplanung weiterverwendet werden können und zum anderen die CAD-Umgebung für Ingenieure eine vertraute Arbeitsumgebung darstellt.

In Bild 1 wird die Struktur des Simulationssystems in einem UML-Komponentendiagramm dargestellt. Komponentendiagramme werden vorwiegend für die Spezifikation von Softwarearchitekturen eingesetzt. Die Komponenten des Diagramms symbolisieren die modularen Bestandteile des Simulationssystems, die ihr Inneres kapseln und über vordefinierte Schnittstellen miteinander kommunizieren. Schnittstellen werden im Komponentendiagramm durch Kreise und Halbkreise (Ball- und Socket-Symbole) dargestellt, während die Komponenten selbst durch Rechtecke mit einem kleinen Komponenten-Symbol in der rechten oberen Ecke abgebildet werden.

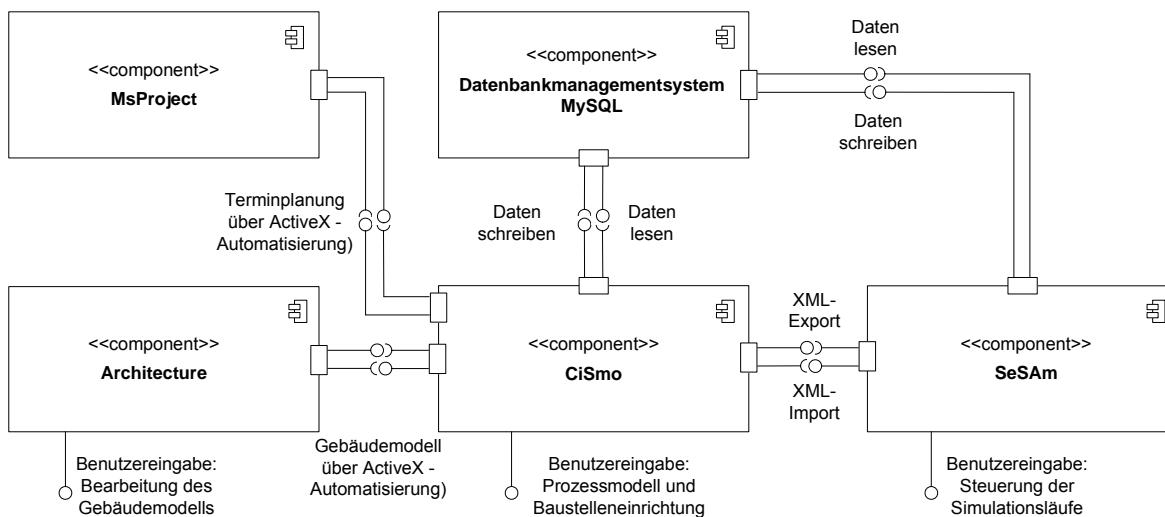


Bild 1: Komponentendiagramm des Simulationssystems

Die Daten des Prozessmodells werden separat in einer MySQL-Datenbank gespeichert und nicht in das CAD-Modell integriert. Die Speicherung der Prozessdaten in einer externen Datenbank hat den Vorteil, dass diese Daten mit allen gängigen 3-D-Gebäudemodellen verbunden werden können, ohne auf ein gemeinsames CAD-Format oder bestimmte Schnittstellenstandards angewiesen zu sein. Gleichzeitig können das Gebäude- und das Prozessmodell völlig unabhängig voneinander bearbeitet werden. Durch die getrennte Speicherung können die Daten des Prozessmodells außerdem für neue Projekte wiederverwendet werden.

Die Durchführung der Experimente geschieht in der agentenbasierten Simulationsumgebung **SeSAM** (**S**hell for **S**imulated **A**gent **S**ystems). Die Agenten des Simulationsmodells greifen über eine SQL-Schnittstelle zur Laufzeit des Simulationsmodells direkt auf die MySQL-Datenbank zu und haben dadurch Zugang zu

dem „Wissen“, das sie für die Ausführung der Arbeitsvorgänge benötigen. Für die Simulation stehen dadurch immer die aktuellsten Daten zur Verfügung.

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

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

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

Die Ergebnisse der Simulationsläufe werden aus SeSAM heraus in einer eigenen MySQL-Datenbank gespeichert. Über CiSmo können diese Ergebnisse ebenfalls in Form eines Terminplans dargestellt werden.

## 2 Technologische Umsetzung

### 2.1 VBA

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

VBA bietet gegenüber anderen Programmierschnittstellen für Architecture, wie ObjectARX und AutoLISP, die Vorteile einer höheren Geschwindigkeit bei der Programmausführung, einer hohen Benutzerfreundlichkeit, der Kompatibilität mit Windows und anderen Microsoft Anwendungen (z.B. MS Office) und der Möglichkeit einer schnellen Prototypenerstellung (*AutoCAD 2009*).

Unter Verwendung der ActiveX Automation ist es in VBA möglich, auf die Eigenschaften und Methoden der Elemente einer Architecture-Zeichnung zuzugreifen.

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

Das im Rahmen dieser Arbeit implementierte prototypische Programm CiSmo, kann daher als Automation-Client nur auf die Objekte und Funktionen von dem Automation-Server Architecture zugreifen, wenn dieser ebenfalls ausgeführt wird.

Auf die gleiche Weise ist es möglich, MS-Project mit in die Anwendung einzubinden.

## 2.2 Datenhaltung innerhalb der Zeichnungsdatei

In einer Architecture- oder AutoCAD-Zeichnungsdatei wird grundsätzlich zwischen graphischen (Entities) und nicht graphischen Elementen (Objects) unterschieden.

*„Jeder Entity-Instanz können in Architecture eigene erweiterte Daten zugewiesen werden.“*

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

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

## 2.3 MySQL

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

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

Bedürfnissen angepasst werden kann, weshalb dieses Datenbanksystem für den Einsatz bei prototypischen Implementierungen sehr geeignet ist. Datenbankabfragen, Datenmanipulationen und das Anlegen neuer Datenbanken und Tabellen erfolgt in MySQL mit der Datenbanksprache **SQL** (**S**tructured **Q**uery **L**anguage). SQL ist eine von **ANSI** (**A**merican **N**ational **S**tandards **I**nstitute) und **ISO** (**I**nternational **O**rganization for **S**tandardization) standardisierte Datenbanksprache, die von den meisten Datenbanksystemen unterstützt wird.

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

## 2.4 XML

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

**<Name> Klaus Müller </Name>**

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

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

Die wichtigsten Regeln der Wohlgeformtheit lauten:

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

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

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

### 3 Programmablauf und Benutzeroberflächen

Das für Architecture entwickelte Menüsyste von CiSmo erscheint am Ende der oberen Menüleiste des CAD-Programms (siehe Bild 2). Der zusätzliche Menüpunkt trägt den Namen „Simulation“ und öffnet ein Dropdown-Menü, über das sich die Anwendungsfenster von CiSmo öffnen lassen. Das Dropdown-Menü ist so angelegt, dass die Menüpunkte von oben nach unten dem Standard-Programmablauf folgen (siehe dazu auch Bild 3).

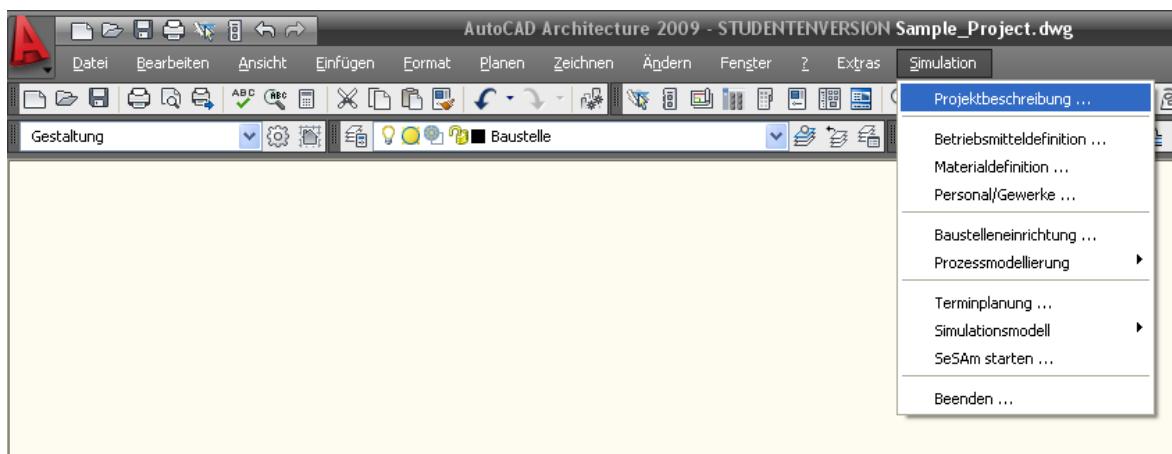


Bild 2: Menüleiste von Architecture mit dem zusätzlichen Menüpunkt „Simulation“

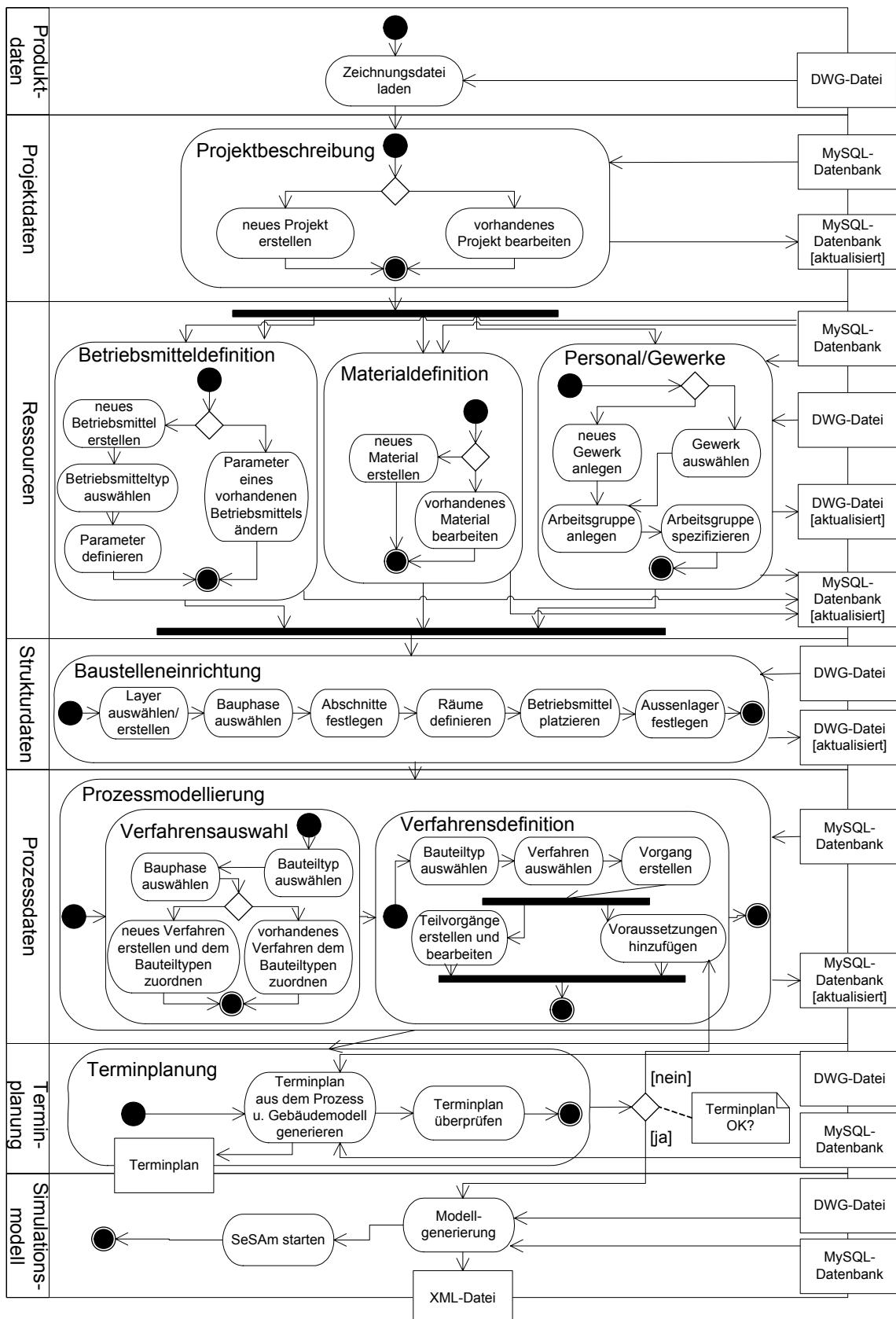


Bild 3: UML-Aktivitätsdiagramm des Programmablaufs

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

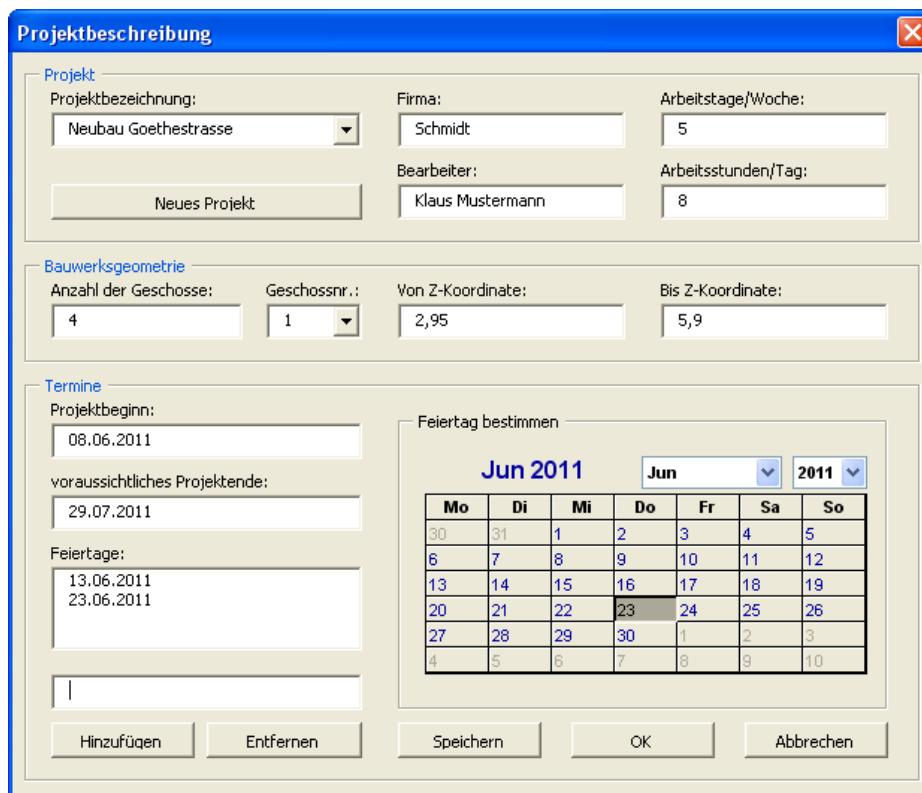


Bild 4: Anwendungsoberfläche der Projektbeschreibung

Der nächste Arbeitsschritt besteht in der Definition der allgemeinen Projektparameter. Diese erfolgt über die Anwendungsoberfläche „Projektbeschreibung“, die über das Drop-down Menü von CiSmo gestartet werden kann. Die Anwendungsoberfläche ermöglicht es, zunächst ein neues Projekt anzulegen oder alternativ ein bereits bestehendes Projekt zur Bearbeitung auszuwählen (siehe Bild 4). In der Anwendungsoberfläche „Projektbeschreibung“ lassen sich allgemeine Projektparameter definieren, wie z.B. den Projektbearbeiter, die Firma, Arbeitszeiten und Feiertage. Außerdem wird hier die Höhe der einzelnen Geschosse des Bauwerks festgelegt, um die Bauteile des Gebäudemodells eindeutig einem Geschoss zuzuordnen zu können (siehe Bild 4). Die Angaben über die Geschosshöhe werden

direkt in der Zeichnungsdatei gespeichert, während die anderen Daten der Projektbeschreibung in der MySQL-Datenbank hinterlegt werden. In dem UML-Ablaufdiagramm in Bild 3 wird der Datenzugriff durch Ein- und Ausgabeparameter in Form von Objektknoten dargestellt, die als Rechtecke am Rand der Aktivitätsknoten angebracht sind.

Nach der Definition der Projektparameter erfolgt die Beschreibung der für den Bauprozess notwendigen Ressourcen. Dazu zählen die Betriebsmittel, die Materialien und die Arbeitskräfte. Für jeden Ressourcentyp existiert eine eigene Anwendungsoberfläche, die über das Menü von CiSmo aufgerufen werden kann.

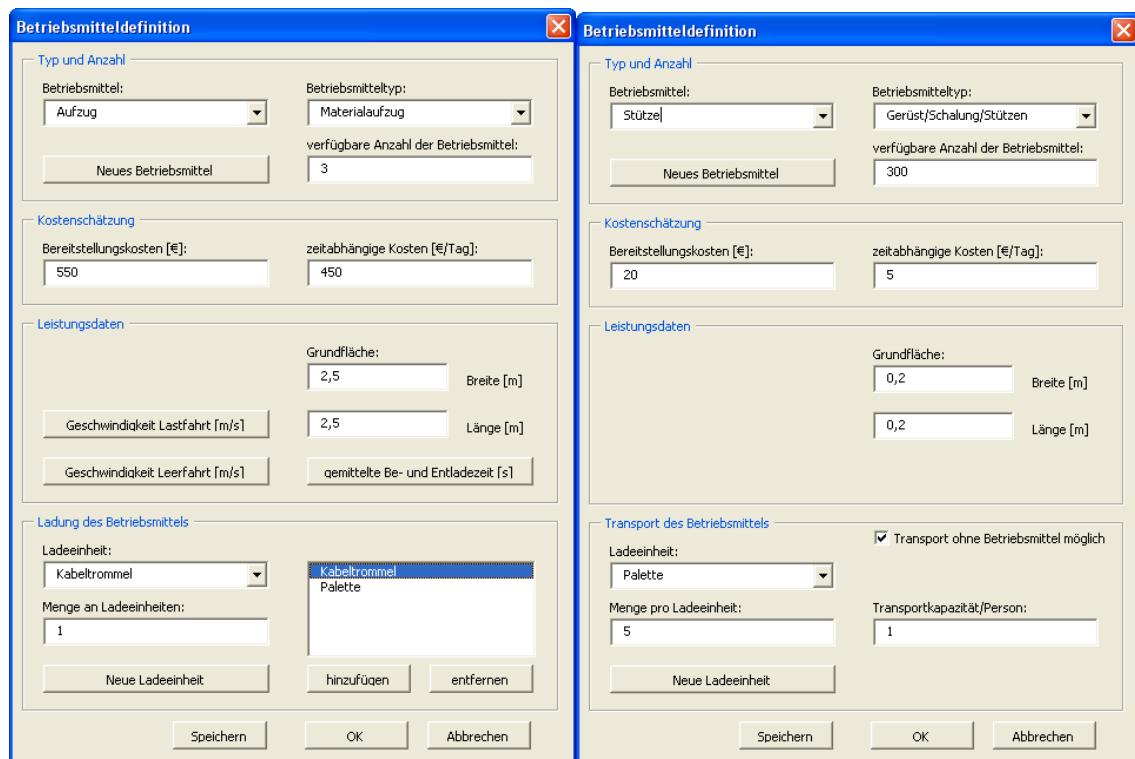


Bild 5: Anwendungsoberflächen für die Betriebsmitteldefinition (links Betriebsmitteltyp „Materialaufzug“, rechts Betriebsmitteltyp „Gerüst/Schalung/Stützen“)

Über das Anwendungsfenster „Betriebsmitteldefinition“ lassen sich alle Betriebsmittel, die für die Arbeitsprozesse benötigt werden, definieren. Der Anwender kann während der Betriebsmitteldefinition entweder neue Betriebsmittel erstellen oder die Parametersätze von vorhandenen Betriebsmitteln verändern. Jedes neue Betriebsmittel muss einem vorgegebenen Betriebsmitteltyp zugeordnet werden. Je-der dieser Betriebsmitteltypen besitzt einen eigenen Parametersatz, so dass sich

die Anwendungsoberfläche bei der Auswahl eines Betriebsmitteltypen dem Parametersatz anpasst (siehe Bild 5).

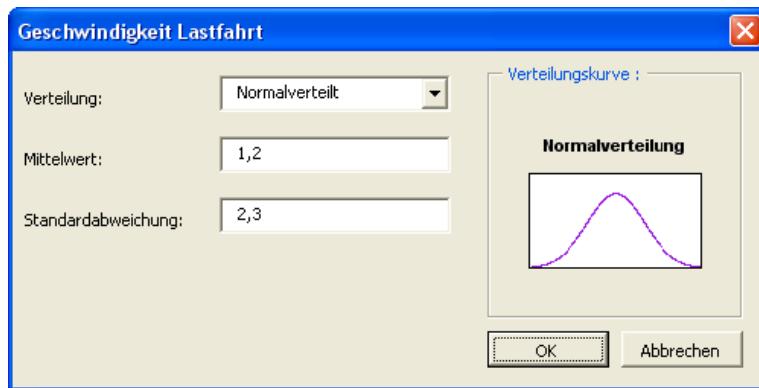


Bild 6: Anwendungsoberfläche für die Definition eines stochastischen Wertebereichs

Nach der Auswahl des Betriebsmitteltypen werden die einzelnen Parameter des Betriebsmittels, wie z.B. Be- und Entladezeiten, Geschwindigkeiten, Abmessungen und die von einem Betriebsmittel zu transportierenden Ladeeinheiten, festgelegt. Für einige Parameter besteht die Möglichkeit, stochastische Wertebereiche zu definieren. Über eine Schaltfläche öffnet sich eine neue Anwendungsoberfläche, in der eine stochastische Verteilung und die zugehörigen Parameter angegeben werden können (siehe Bild 6).

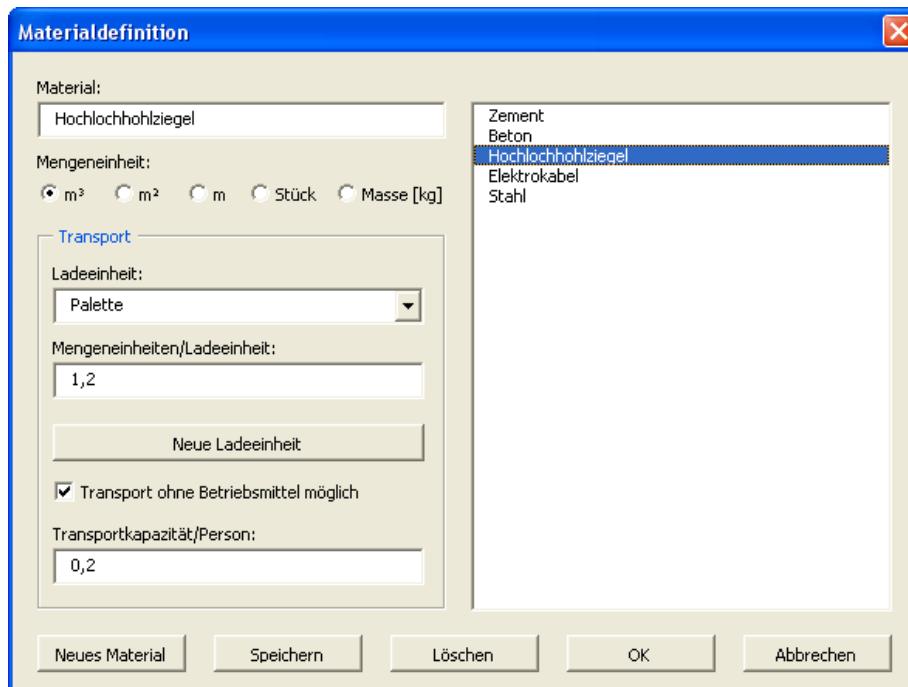


Bild 7: Anwendungsoberfläche der Materialdefinition

In der Anwendungsoberfläche der „Materialdefinition“ werden die Parameter vorhandener Materialien bearbeitet oder neue Materialien angelegt (siehe Bild 7). Den Materialien wird eine Mengeneinheit ( $m^3$ ,  $m^2$ , m, Stück oder kg) und eine Ladeeinheit (z.B. Paket, Karton, etc.) zugewiesen. Für jede Ladeeinheit wird festgelegt, wie viel Material sie maximal enthalten kann. Des Weiteren wird definiert, ob und wie viel Material von einzelnen Arbeitskräften transportiert werden kann.

In der Anwendungsoberfläche „Personal/Gewerke“ werden die Arbeitsgruppen der verschiedenen Gewerke spezifiziert. Für jedes Gewerk wird festgelegt, wie viele Arbeitsgruppen maximal auf der Baustelle arbeiten sollen. Da sich die Anzahl und die Zusammensetzung der Arbeitsgruppen von Projekt zu Projekt unterscheiden, werden diese Angaben nicht in der MySQL-Datenbank, sondern in der Zeichnungsdatei gespeichert. Für jede Arbeitsgruppe kann detailliert angegeben werden, aus wie vielen Vorarbeitern, Gesellen und Hilfsarbeitern die Arbeitsgruppe besteht (siehe Bild 8).

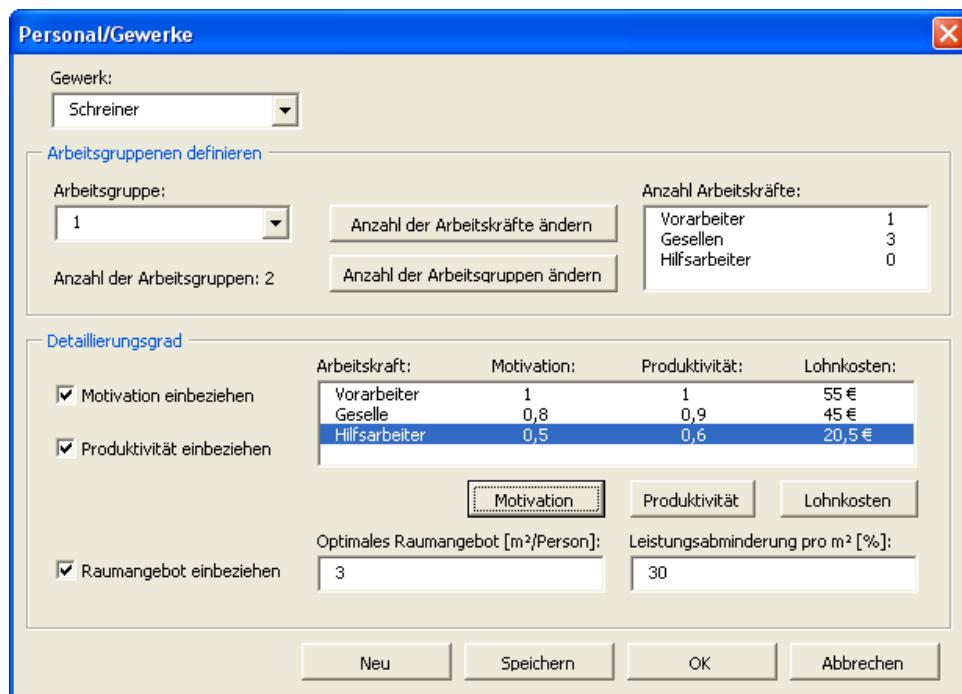


Bild 8: Anwendungsoberfläche Personal/Gewerke

Für jeden Arbeitertyp können außerdem die Lohnkosten, die Produktivität und die Motivation festgelegt werden. Optional kann definiert werden, ob die Arbeitsleistung bei zu knappem Raumangebot nachlässt. Dazu wird ein optimaler Raumbe-

darf festgelegt ( $m^2/Person$ ) und eine Leistungsabminderung (%), die dann eintritt, wenn dieser Raumbedarf unterschritten wird.

Die Baustelleneinrichtungsplanung wird nach der Definition der für den Bauprozess notwendigen Ressourcen durchgeführt. Die Baustelleneinrichtungselemente werden direkt in die Zeichnungsdatei auf einem eigenen Layer eingezeichnet (siehe Bild 9). Zunächst wird definiert, ob die Baustelleneinrichtungsplanung für den Roh- oder den Ausbau durchgeführt wird. Für die Rohbauphase können geschossübergreifende Bauabschnitte in die dwg-Datei eingezeichnet werden. Für die Ausbauphase werden die Räume im Gebäudemodell automatisch erkannt und nummeriert.

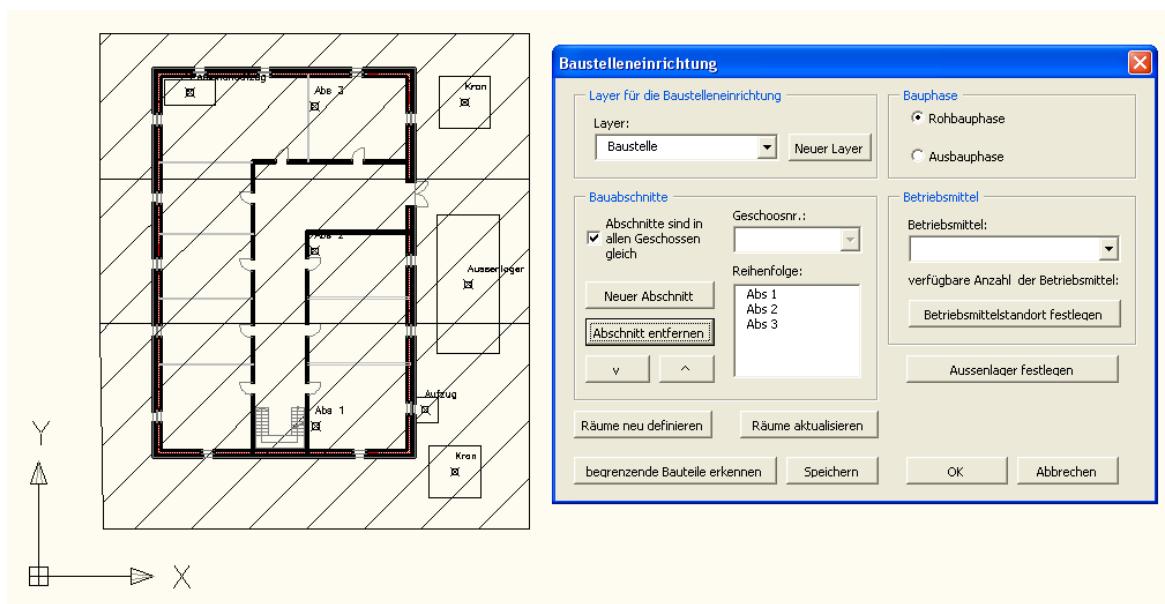


Bild 9: Zeichnungsdatei mit den Baustelleneinrichtungselementen und Anwendungsoberfläche zur Baustelleneinrichtung

Danach können die stationären Betriebsmittel (wie Krane, Aufzüge, etc.) im Gebäudemodell manuell platziert werden. Den Abschnitten und Betriebsmitteln werden zusätzliche Daten zugewiesen, damit sie als Abschnitte oder Betriebsmittel bei der automatischen Modellgenerierung erkannt werden können und korrekt in das Simulationsmodell übertragen werden. Abschließend wird ein Außenlager definiert, das als Schnittstelle für den Eintritt der Materialien in das Simulationsmodell verwendet wird.

Die für die Prozessmodellierung der Abläufe notwendigen Daten werden in den Anwendungsoberflächen „Verfahrensauswahl“ und „Verfahrensdefinition“ erfasst. In dem Anwendungsfenster zur Verfahrensauswahl wird zunächst eine Grobdefinition des Bauprozesses durchgeführt, indem den Bauteiltypen des Gebäudemodells Bauverfahren zugewiesen werden (siehe Bild 10). Unterschieden wird hierbei zwischen Verfahren, die während der Rohbau- und die während der Ausbauzeit eingesetzt werden. Der Anwender hat die Möglichkeit, neue Verfahren selbst anzulegen oder bereits bestehende Verfahren für den Bauteiltypen aus der Datenbank auszuwählen.

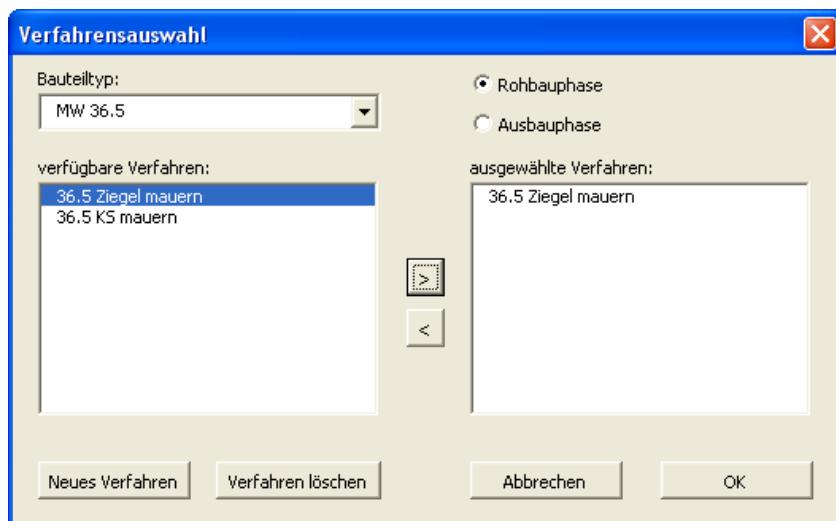


Bild 10: Anwendungsoberfläche zur Verfahrensauswahl

Nach der Zuweisung der Verfahren zu den Bauteiltypen, werden die Verfahren in der Anwendungsoberfläche „Verfahrensdefinition“ im Detail ausgearbeitet (siehe Bild 12). In dem Anwendungsfenster werden zunächst der Bauteiltyp und das Verfahren ausgewählt. Danach können die Vorgänge, aus denen sich das Verfahren zusammensetzt, erstellt werden. Für einen neuen Vorgang wird zunächst das Ergebnis definiert, das nach der Ausführung des Vorgangs vorliegt. Dieses Ergebnis ist insbesondere für die Definition der Voraussetzungen anderer Vorgänge notwendig. Außerdem wird festgelegt, welchem Gewerk sich der Vorgang zuordnen lässt.

Zusätzlich kann die Ausführung eines Vorgangs noch von einer Bauteileigenschaft abhängig sein. Diese Bauteileigenschaften können vom Anwender selbst über das Anwendungsfenster erstellt werden. Die auf diese Weise erzeugten Eigenschaften

werden global für alle Bauteile eines Bauteiltyps erstellt. Im Gebäudemodell kann individuell für jedes Bauteil dieses Bauteiltyps festgelegt werden, ob die Eigenschaft auf das Bauteil zutrifft oder nicht (*true* oder *false*). Auf die Eigenschaften der Bauteile kann über das „Eigenschaften“-Fenster der Bauteile in Architecture zugegriffen werden (siehe Bild 11). Die zusätzlichen Bauteileigenschaften besitzen alle die Vorsilbe „SimDef\_“, um sie von den übrigen Eigenschaften der Bauteile, wie z.B. Breite, Länge und Grundfläche, abzugrenzen. Nur wenn eine zusätzliche Eigenschaft eines Bauteils in dem „Eigenschaften“-Fenster auf *true* gesetzt wird, wird der zugeordnete Vorgang auch tatsächlich am Bauteil ausgeführt. Auf diese Weise lässt sich eine größere Menge von Bauteilen einem gemeinsamen Bauteiltypen zuweisen, wenn sich diese beispielsweise nur durch ihre Oberflächenstruktur unterscheiden.

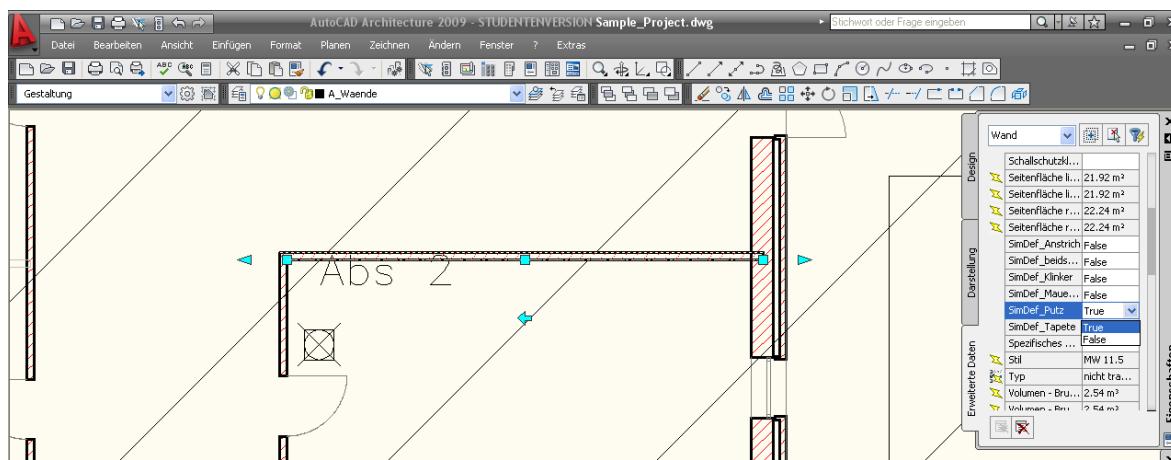


Bild 11: Eigenschaftsfenster (rechts) eines ausgewählten Bauteils mit SimDef\_Eigenschaften

Jeder Vorgang kann aus beliebig vielen Teilvergängen bestehen, die in einem separaten Anwendungsfenster definiert werden (siehe Bild 12). Die Teilvergänge eines Vorgangs besitzen untereinander eine festzulegende Reihenfolge. Diese wird definiert, in dem der jeweilige Vorgänger des Teilverganges ausgewählt wird. Dem Teilvergang wird zunächst ein Arbeitszeitaufwand zugewiesen, für den stochastische Parameter festgelegt werden können. Der Zeitaufwand wird in Minuten pro gefertigter Mengeneinheit angegeben.

Des Weiteren werden in diesem Anwendungsfenster die Materialien und die Betriebsmittel ausgewählt, die für die Ausführung der Teilvergänge benötigt werden. Zur Verfügung stehen dafür die Materialien und Betriebsmittel, die zuvor in den

Anwendungsfenstern „Materialdefinition“ und „Betriebsmitteldefinition“ erstellt wurden. Für die Materialien muss angegeben werden, welche Menge des Materials pro Mengeneinheit des Bauteils benötigt wird (also z.B. kg/m<sup>3</sup>).

Die Menge der benötigten Betriebsmittel kann alternativ pro Arbeitsgruppe oder ebenfalls in Abhängigkeit von der Fertigungsmenge (z.B. Stück/m<sup>2</sup>) definiert werden. Außerdem kann festgelegt werden, ob das Betriebsmittel auch nach der Ausführung des Teilverganges noch gebunden ist und wie lange (in Stunden) das Betriebsmittel nach Produktionsende noch zur Verfügung stehen muss. Diese Angabe ist insbesondere bei dem Einsatz von Schalungstafeln oder Stützen von Bedeutung.

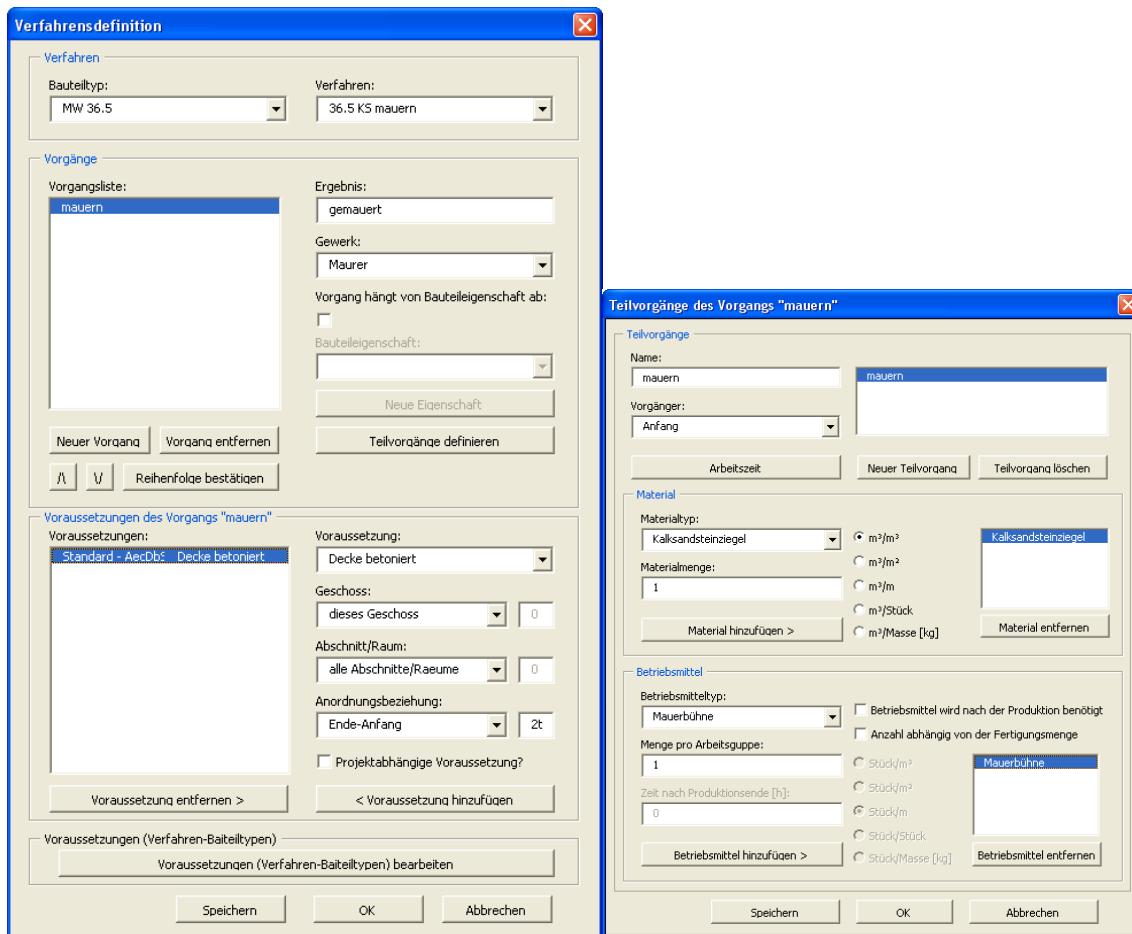


Bild 12: Anwendungsoberfläche zur Verfahrensauswahl (links) und das Unterfenster zur Definition der Teilvorgänge (rechts)

Nach der Definition der Teilvorgänge müssen die Voraussetzungen für die Ausführung des Vorgangs spezifiziert werden. Anhand der Voraussetzungen wird festgelegt, in welcher Reihenfolge die Vorgänge ausgeführt werden. Dies geschieht, in-

dem die technischen und organisatorischen Abhängigkeitsbeziehungen zwischen den Vorgängen definiert werden. So kann z.B. die Fertigungsrichtung eines Vorgangs innerhalb des Gebäudes durch die Voraussetzungen beschrieben werden. Die Voraussetzungen bestehen aus dem Ergebnis eines anderen Vorgangs, einer geometrischen Beziehung (Abschnitt/Geschoss) und einer zeitlichen Anordnungsbeziehung.

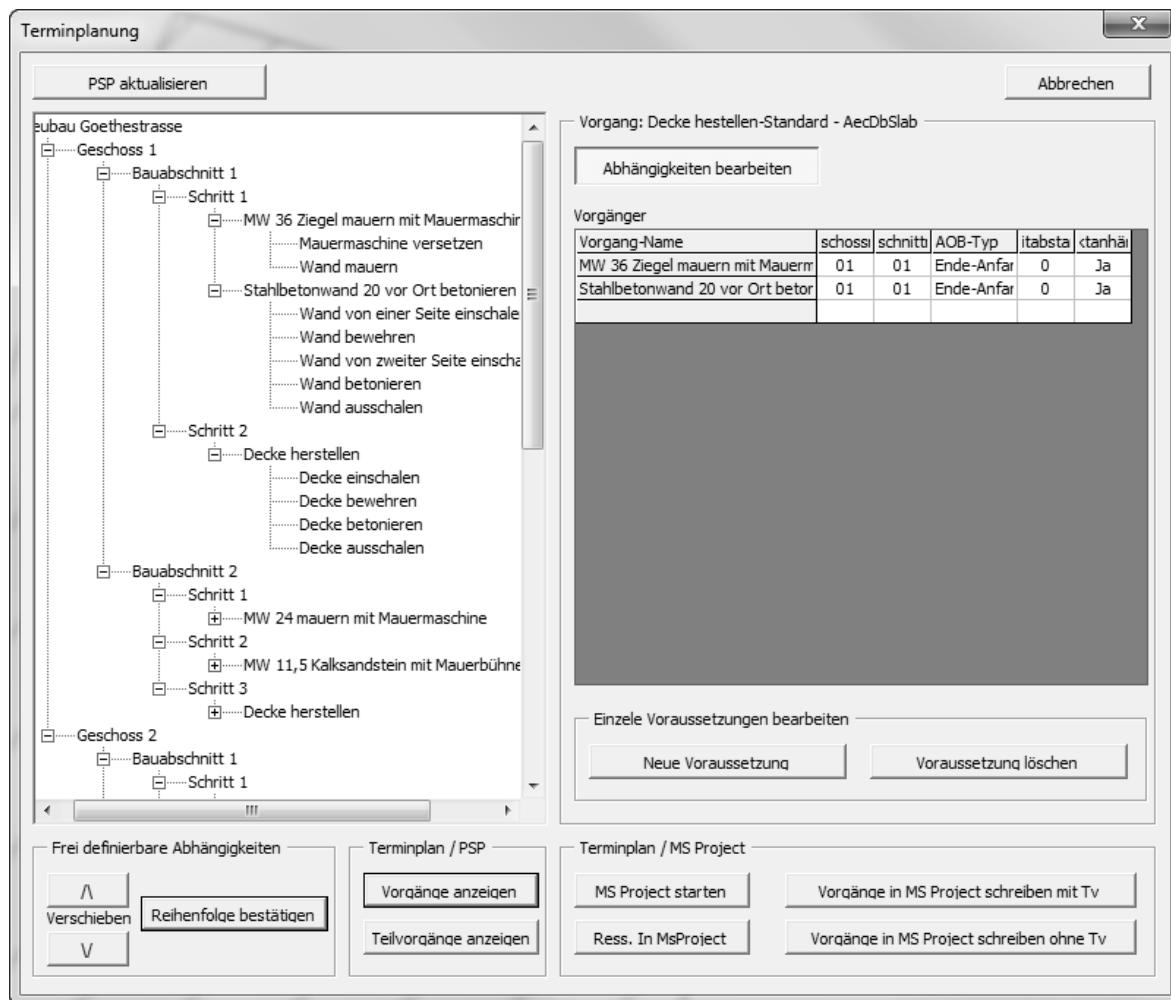


Bild 13: Anwendungsoberfläche zur Terminplanung

Die im Zuge der Prozessmodellierung gespeicherten Informationen werden im Folgenden für die automatische Generierung eines Terminplans verwendet. Die Daten des Prozessmodells werden zu diesem Zweck mit den Daten des Gebäudemodells und den Daten aus der Baustelleneinrichtung kombiniert, so dass ein Terminplan entsteht, der die technischen und die organisatorischen Abhängigkeitsbeziehungen, die Gebäudestruktur, die Bauabschnitte und die zur Verfügung stehenden Ressourcen berücksichtigt. Anhand des Terminplans kann der Anwen-

der die zuvor eher abstrakt definierten Voraussetzungen überprüfen und gegebenenfalls verändern (siehe Bild 14).

Zuvor wird im Anwendungsfenster „Terminplanung“ der Projektstrukturplan grafisch dargestellt (siehe Bild 13). Die Arbeiten werden in jedem Bauabschnitt in Schritte geteilt. Die Zugehörigkeit eines Verfahrens zu einem Schritt wird automatisch anhand der vordefinierten Voraussetzungen bestimmt. Es besteht die Möglichkeit, einzelne Voraussetzungen zu bearbeiten bzw. neu zu definieren. Von diesem Anwendungsfester aus lässt sich MS-Project starten und automatisch ein Terminplan erstellen. Die Ressourcen (Gewerke, Material und Betriebsmittel) werden in MS-Project übertragen. Die Verknüpfung zwischen den Vorgängen und den Ressourcen in MS-Project erfolgt ebenfalls automatisch. Bild 14 zeigt den automatisch erstellten Terminplan in MS-Project.

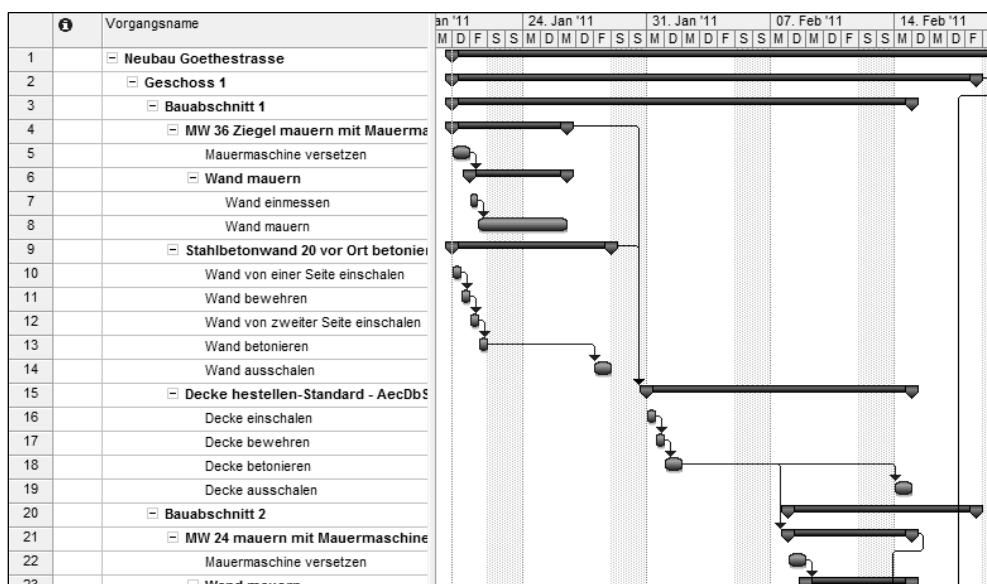


Bild 14: Automatisch erstellter Terminplan in MS Project

Im letzten Anwendungsfenster erfolgt schließlich die automatische Modellgenerierung des Simulationsmodells. In der verwendeten agentenbasierten Simulationsumgebung SeSAM setzen sich die Simulationsmodelle aus drei verschiedenen Modellierungselementen zusammen. „*Passive Bestandteile des Modells werden als Ressourcen (Resources) modelliert, aktive Bestandteile als Agenten (Agents) und übergeordnetes Systemverhalten wird in die Umwelt (World) des Modells integriert. Zusätzlich lassen sich Ausgangszenarien (Situations) für Simulationsläufe definieren, in denen die Ressourcen und die Agenten räumlich angeordnet werden*

können.“(Kugler und Franz 2010 S. 153). Da das Modell in dem Datenformat XML vorliegt, kann CiSmo auf die komplette Modellstruktur zugreifen. Die Agenten und Ressourcen des Simulationsmodells werden von vordefinierten Agenten- und Ressourcentypen abgeleitet und von CiSmo parametrisiert. Als Agenten werden in dem Modell die Arbeitsgruppen und die selbst aktiven Betriebsmittel dargestellt. Als Ressourcen wird die Gebäudestruktur in Form der Bauteile, der Abschnitte, der Geschosse und der Räume, die passiven Betriebsmittel und die Materialien in das Modell integriert.

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

## 4 Fazit

Die Simulation von Bauprozessen ermöglicht die Prognose des Bauablaufs unter Berücksichtigung einer Vielzahl von Projektparametern. Sie wird in der Bauindustrie bisher aber allenfalls in Ausnahmefällen eingesetzt. Ein Hauptgrund dafür ist der hohe Aufwand bei der Projektdatenerfassung und der Modellbildung im Rahmen einer Simulationsstudie.

Die hier vorgestellte Anwendung CiSmo soll die Phasen der Datenerfassung und der Modellbildung beschleunigen, indem auf bereits existierende Planungsdaten in Form des CAD-Gebäudemodells zugegriffen wird. Die Integration der Benutzeroberflächen in ein CAD-System hat den großen Vorteil, dass eine CAD-Umgebung für den Großteil der Ingenieure eine vertraute Arbeitsumgebung darstellt. Dadurch wird die Hemmschwelle für die Anwendung der Simulation gesenkt.

Die Bauprozesse und die benötigten Ressourcen können vom Anwender in CiSmo den Projekterfordernissen entsprechend neu definiert werden. Alternativ können aus der Datenbank von CiSmo bereits existierende Daten verwendet und modifiziert werden. Da die prozessbezogenen Daten unabhängig vom Gebäudemodell in einer eigenen Datenbank gespeichert werden, können diese in neuen Projekten wiederverwendet und mit neuen Gebäudemodellen verbunden werden.

Dadurch, dass der Anwender die Prozesse selbst definiert, kann der Detaillierungslevel des Simulationsmodells in Bezug auf die Bauabläufe stufenlos angepasst werden.

Besonderer Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Unterstützung dieses Forschungsvorhabens.

## Literatur

*AutoCAD (2009): Entwickler-Dokumentation von AutoCAD 2009. Entwicklerhandbuch für ActiveX und VBA.*

*Kugler, M. und Franz, V. (2008): Einsatz der Simulation zur Effizienzsteigerung von Produktionsprozessen im Bauwesen. Advances in Simulation for Production and Logistics Applications - Tagungsband 13. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Berlin 01. - 02. Oktober 2008, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, S. 151-160.*

*Kugler, M. und Franz, V. (2010): CiSmo – CAD-integrierte Simulationsmodellierung für die Bauablaufsimulation im Hochbau. Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal – Tagungsband der 14. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Karlsruhe 7. u. 8. Oktober 2010, KIT Scientific Publishing 2010, S. 149-156.*

*Microsoft (2010): Entwicklung mit ADO. Letzter Zugriff am 18. Juni 2010, <<http://msdn.microsoft.com/de-de/library/bb979546.aspx>>.*

*Rudolph, D. (2000): AutoCAD-Objekte. Sybex-Verlag GmbH, Düsseldorf, 2000.*

*Suthpin, J. (2005): AutoCAD 2006 VBA – A Programmer’s Reference. Apress 2005.*





**Kontakt:**

Institut für Bauwirtschaft  
Universität Kassel  
Mönchebergstr. 7  
34125 Kassel

**Fachgebiete:**

		Sekretariate:
Bauorganisation und Bauverfahren	Prof. Franz	0561 / 804 2615
Baubetriebswirtschaft	Prof. Racky	0561 / 804 2619
Bauinformatik	Dipl.-Ing. Kugler	0561 / 804 2618
Bauwirtschaft/Projektentwicklung	Prof. Busch	0561 / 804 3632

**Schriftenreihe Bauwirtschaft  
des Instituts für Bauwirtschaft der Universität Kassel**

---

**I - Forschung**

**Band 1: Schopbach, Holger (2001)**

Ansätze zur Kostensenkung in Konstruktion und Baubetrieb  
durch Einsatz mathematischer Optimierungsmethoden

**Band 2: Grau, Heidrun (2002)**

Zielorientiertes Geschäftsprozessmanagement zur Förderung der Wirtschaftlichkeit von Abbundzentren

**Band 3: Arnold, Daniel (2005)**

Entwicklung einer Methodik für Innovationsprozesse im Wohnungsbau

**Band 4: Schmitt, Roland (2005)**

Die Beschaffung von Schalungsgeräten und den zugehörigen  
Ingenieurleistungen nach deren Outsourcing

**Band 5: Heinrich, Nils (2006)**

Entwicklung von Parametern zur Risikobewertung für Projektentwicklungen auf brachgefallenen Flächen - am Beispiel freizeitlich orientierter Projekte

**Band 6: Mittelstädt, Norbert (2006)**

Leitlinie zur projektbezogenen Spezifikation und erfolgsabhängigen Honorarbemessung von extern beauftragten Projektmanagement-Leistungen

**Band 7: Chahrour, Racha (2007)**

Integration von CAD und Simulation auf Basis von Produktmodellen im Erdbau

**Band 8: Mieth, Petra (2007)**

Weiterbildung des Personals als Erfolgsfaktor der strategischen Unternehmensplanung in Bauunternehmen. Ein praxisnahes Konzept zur Qualifizierung von Unternehmensbauleitern

**Band 9: Mergl, Oliver (2007)**

Flexibilisierung von Baustrukturen durch Modularisierung zur Verbesserung des Nutzungspotenziales am Beispiel industrieller Produktionsstätten des Automobilbaus

**Band 10: Eitelhuber, Andreas (2007)**

Partnerschaftliche Zusammenarbeit in der Bauwirtschaft – Ansätze zu kooperativem Projektmanagement im Industriebau

**Band 11: Hermelink, Andreas (2008)**

Ein systemtheoretisch orientierter Beitrag zur Entwicklung einer nachhaltigkeitsgerechten Technikbewertung angewandt auf den mehrgeschossigen Wohnungsbau im Niedrigstenergie-Standard

**Band 12: Utsch, Jens H. (2008)**

Entscheidungskomplexorientiertes Controlling – ein Beitrag zur Unterstützung der Planung und Entscheidungsfindung im Baubetrieb

**Band 13: Pauli, Christian (2009)**

Entwicklung einer Entscheidungshilfe zur Beurteilung der PPP-Eignung kommunaler Bauvorhaben

**Band 14: Fistera, Detlev (2009)**

Revitalisierung brachgefallener Wohnbauflächen. Indikatorenbildung zur multikriteriellen Untersuchung und prophylaktischen Abschätzung von entstehenden Wohnbaubrachen

**Band 15: Dobler, Thomas (2009)**

Entwicklung der Archintra-Methodik als Beitrag zur Verbesserung von Bauprozessen

**Band 16: Strack, Stefan (2010)**

Entwicklung eines Bewertungssystems für Redevelopment-Maßnahmen von leer stehenden Gebäuden für Wohnzwecke

**Band 17: Körtgen, Manfred (2010)**

Optimierungsansätze zur prozessorientierten Abwicklung komplexer Baumaßnahmen unter Einsatz neuer Informations- und Kommunikationssysteme

**Band 18: Stichnoth, Philipp (2010)**

Entwicklung von Handlungsempfehlungen und Arbeitsmitteln für die Kalkulation betriebsphasenspezifischer Leistungen im Rahmen von PPP-Projekten im Schulbau

**II - Lehre****Band 1: Institut für Bauwirtschaft (Hrsg.)**

Seminar Sommersemester 2003, Hochhäuser

**III - Tagungen und Berichte****Band 1: Institut für Bauwirtschaft (Hrsg.)**

Tagungsband zum Symposium 2002

Projektentwicklung brachgefallener Flächen am 13. September 2002

**Band 2: Racky, Prof. Dr.-Ing. Peter (Hrsg.)**

3. IBW-Symposium, 17. September 2004 an der Universität Kassel.

Partnerschaftliche Vertragsmodelle für Bauprojekte

**Band 3: Racky, Prof. Dr.-Ing. Peter (Hrsg.)**

4. IBW-Symposium, 15. September 2006 an der Universität Kassel.

Innovative Abwicklungsformen für Bauprojekte: Partnering und PPP

**Band 4: Franz, Prof. Dr.-Ing. Volkhard (Hrsg.)**

1. IBW-Workshop, 13. September 2007 an der Universität Kassel.  
Simulation in der Bauwirtschaft

**Band 5: Busch, Prof. Dr.-Ing. Antonius (Hrsg.)**

5. IBW-Symposium, 26. September 2008 an der Universität Kassel.  
Projektentwicklung brachgefallener Flächen und Immobilien

**Band 6: Institut für Bauwirtschaft (Hrsg.)**

Tagungsband des 20. Assistententreffens der Bereiche Bauwirtschaft,  
Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik, 01. – 03. April 2009 an der  
Universität Kassel

**Band 7: Racky, Prof. Dr.-Ing. Peter (Hrsg.)**

Forum Baubetrieb, 4. November 2009 an der Universität Kassel.  
Kooperationsorientierte Projektabwicklung im Hochbau

**Band 8: Franz, Prof. Dr.-Ing. Volkhard (Hrsg.)**

2. IBW-Workshop, 24. März 2011 an der Universität Kassel  
Simulation von Unikatprozessen – Neue Anwendungen aus  
Forschung und Praxis

Weitere Informationen zur Schriftenreihe unter [www.upress.uni-kassel.de](http://www.upress.uni-kassel.de)

ISBN 978-3-86219-096-6