

**Spezifikation des Bau-Solls
durch interaktive Modellierung
auf virtuellen Baustellen**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

an der Fakultät Bauingenieurwesen

der

BAUHAUS-UNIVERSITÄT WEIMAR

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Arno Blickling

**Gutachter: 1. Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Bargstädt M.Sc.
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz
3. Prof. Daniel W. Halpin**

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

Professur Baubetrieb und Bauverfahren
Fakultät Bauingenieurwesen
Bauhaus-Universität Weimar

Marienstraße 7, 99423 Weimar
Postanschrift: 99421 Weimar

Tel.: (03643) 58 4563

Fax.: (03643) 58 4565

<http://www.uni-weimar.de/Bauing/baubet/>

Abstrakt

Heutige Methoden zur Soll-Spezifikation von Bauleistungen (Kostenermittlung und zeitliche Ablaufplanung) gehen von einer abstrahierten und vereinfachten Betrachtung der Zusammenhänge bei Bauprojekten aus. Leistungsverzeichnisse, Kostenermittlungen und Bauzeitpläne orientieren sich nur indirekt an der Geometrie des Bauwerks und der Baustelle. Die dabei verwendeten Medien wie Papier, 2D-Dateien, digitale Leistungsbeschreibungen oder 3D-Darstellungen lassen die Suche nach Informationen auf der Baustelle zu einem zeitaufwändigen und in Anbetracht existierender Medientechnologien ineffizienten Prozess werden. Interaktive virtuelle Umgebungen erlauben die Auflösung starrer Zusammenhänge durch interaktive Eingriffe des Anwenders und visualisieren komplexe bauproduktionstechnische Vorgänge.

Das Konzept der visuellen interaktiven Simulation der Bauproduktion sieht vor, die Soll-Spezifikation anhand eines interaktiven 3D-Modells zu entwickeln, um räumliche Veränderungen und parallele Prozesse auf der virtuellen Baustelle im Rahmen der Entscheidungsfindung zum Bauablauf besser berücksichtigen zu können. Verlangt man einen hohen Grad an Interaktivität mit dem 3D-Modell, dann bieten sich Computerspieltechnologien sehr gut zu Verifikationszwecken an. Die visuelle interaktive Simulation der Bauproduktion ist damit als eine 3D-modellbasierte Methode der Prozessmodellierung zu verstehen, die Entscheidungen als Input benötigt und die Kostenermittlung sowie die zeitliche Ablaufplanung als Output liefert.

Schlagwörter: Prozessmodellierung, interaktiv, Simulation, modellbasiert, visuell, VIS, Virtuelle Realität, Soll-Spezifikation, Bauablauf, Kostenermittlung

Abstract

Current methods for the description of construction works presume a high abstraction level to simplify the constraints between single processes of a process model. The determination of costs together with the specification of a time schedule form the primary components (to-be-built) of this description. Cost estimations, bills of quantities and bar charts are not directly connected to the geometry of the product nor of the construction site. The used media like paper, 2D-files or – in best case scenarios – 3D pictures lead us to a time-consuming information retrieval on the site. Considering modern media technologies these processes are inefficient and demand for alternative scenarios based on 3D-models. In this work a concept for interaction with a virtual construction site is presented. The user can interact with objects on the site in such a way that he initiates the execution of single process steps in the complex production model of the site.

The approach to visual interactive simulation (VIS) leads to a to-be-built specification of construction works (determination of costs and 4D-model). Thus spatial changes and parallel processes can be considered when modeling the construction sequence on the virtual site. If one requirement of the solution is a high level of interactivity between the user and the model then game development engines are a suitable tool for the verification of the approach. This work integrates tendering issues with cost estimation and 4D-modeling in order to develop an interactive method for the simulation of construction works. This simulation approach is based on the 3D-model of the site and requires human-based decisions as an input while delivering costs and a 4D-model on a high level of detail as an output.

Keywords: process modeling, interactive, simulation, model based, visual, VIS, virtual reality, to-be-built specification, sequence, determination of costs

Gewidmet

Robert Ribicki, der den Faden spinn.

Vorwort

Die heutige Kalkulation von Bauleistung und das daraus entwickelte Controlling von Baustellen gehen bisher von weitgehend statischen Prinzipien der Leistungsansätze aus. Das entsprach in der Vergangenheit auch den mit den vorhandenen Werkzeugen und Methoden erreichbaren Ergebnissen.

Ein großer Schritt zu einer neuen Qualität von Arbeitsvorbereitung, Kalkulation und Baustellencontrolling kann durch die Simulation von Bauabläufen erreicht werden. Ansätze gab es dazu bereits in den 1980er und 1990er Jahren. Sie erreichten einen ersten, manchmal noch rudimentären Entwicklungsstand und zeigten Defizite in mehrfacher Hinsicht auf, die im Wesentlichen darauf beruhten, dass weder die Rechnerkapazitäten ausreichend waren, um die im Bauwesen sehr komplexen Zusammenhänge und Abhängigkeiten hinreichend vollständig zu beschreiben, noch die Visualisierungswerkzeuge so weit entwickelt waren, dass auch ungeübte Anwender das Arbeiten mit Simulationstools verstehen und beherrschen konnten.

An dieser Stelle setzt die Arbeit von Herrn Blickling entscheidende neue Akzente. Mit der universitären Ausbildung zum Architekten greift er, anders als der analytisch vorgeprägte Bauingenieur, auf Lösungsstrategien zu, die eher vom Ganzen auf das Detail hin gerichtet sind. So verfolgt die vorliegende Arbeit das Ziel, nicht den analytischen Weg mit dem Aufbau von Parameter orientierten Funktionen zu gehen, sondern systematisch den Spielraum für eine intuitiv orientierte Herangehensweise auszuloten. Ganz bewusst werden hierbei Analogien zur Nutzung von Entwicklungsumgebungen für Computerspiele aufgezeigt.

Eine wichtige Anforderung für die Modellierung von Prozessen auf virtuellen Baustellen ist, dass der Benutzer interaktiv mit dem Modell arbeiten kann. Entscheidungen sollen noch während des Simulationsprozesses getroffen und eingefügt werden können. Dort, wo bisherige Simulationsansätze wegen der zu großen Komplexität der Parameterbeschreibung an ihre Grenzen stießen, entwickelt Blickling Lösungsvorschläge, die es dem Nutzer erlauben, die verbleibende Menge an nicht parametrisiertem Wissen und Verständnis durch intuitive Entscheidungen interaktiv in das Modell einzuspielen.

Für die Forschergruppe an der Professur, die sich konzentriert mit Simulation im Bauwesen befasst, hat Blickling mit der vorliegenden Arbeit einen Eckpfeiler gesetzt, welcher für die weiteren Ziele der Forschung an der Professur und mit nationalen und internationalen Partnern von wesentlicher Bedeutung ist.



Professor Dr.-Ing. Hans-Joachim Bargstädt M.Sc.

Professur Baubetrieb und Bauverfahren

Bauhaus Universität Weimar

Weimar, im September 2006

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist an der Bauhaus Universität Weimar am Lehrstuhl Baubetrieb und Bauverfahren im Zeitraum zwischen April 2001 und März 2006 entstanden. Es liegt in der Charakteristik der Arbeit, dass sie Sichtweisen aus zwei Disziplinen des Bauwesens vereint. Diese sind – entsprechend dem bisherigen Erfahrungsprofil des Verfassers – das Baubetriebswesen und die Architektur. Der fächerübergreifende Ansatz wird durch Anwenderwissen aus dem Bereich der Medien, speziell der Entwicklung interaktiver, virtueller Welten komplettiert. In guter Bauhaus-Tradition wurde angestrebt, die Verzahnung dieser an der Bauhaus Universität gelehrt Disziplinen zu nutzen, um daraus unkonventionelle und alternative Lösungsalgorithmen für Problemstellungen im Baubetriebswesen zu entdecken und zu entwickeln.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Bargstädt M.Sc. danke ich für die Übernahme des Erstreferats sowie für die richtungsweisende Unterstützung bei der Bearbeitung der Dissertation und die Möglichkeiten zur internationalen Ausrichtung der Arbeit. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Volkhard Franz danke ich für die Übernahme des Zweitreferats, die stete Gesprächsbereitschaft und die Unterstützung durch seinen Lehrstuhl, hier insbesondere Frau Dipl.-Ing. Racha Chahrouh. Herrn Prof. Daniel W. Halpin danke ich für die Übernahme des Drittreferats sowie für wertvolle Hinweise im Zusammenhang mit Forschungsaktivitäten vor allem in den USA. Herrn Apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Rolf Steinmetzger gilt mein Dank für zahlreiche wertvolle Hinweise, insbesondere im Zusammenhang mit Baumaschinen und der REFA-Methodenlehre.

Mein Dank gilt ferner allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Professur Baubetrieb und Bauverfahren, die mich administrativ und fachlich in zahlreichen Diskussionen und Kolloquien unterstützt haben. Ein besonderer Dank geht an meine Promotionskollegen Stefan Weyhe, Raghavendra Kulkarni, Clemens Elbing und Thilo Kath, die zu einem sehr freundlichen Umfeld an der Bauhaus Universität beigetragen haben.

Schließlich danke ich meiner geliebten Familie, ohne deren richtige Entscheidungen ich diesen Schritt niemals hätte vollbringen können.

Weimar, im September 2006

Arno Blickling

Diese Arbeit basiert auf einer Dokumentenvorlage für Dissertationen der Humboldt-Universität zu Berlin¹. Es wird darauf hingewiesen, dass unter Umständen markenrechtlich geschützte Produktbezeichnungen bei Hinweisen auf Softwareentwicklungen oder -produkte verwendet wurden.

¹ Siehe http://edoc.hu-berlin.de/e_autoren_vorlage.php (16.02.06)

Inhaltsverzeichnis	Seite
Abkürzungsverzeichnis	1
1 Einleitung	3
1.1 Motivation und Schwerpunkt	4
1.2 Problemstellung	5
1.3 Ziel der Arbeit	6
1.4 Einordnung in die aktuelle Forschung	7
2 Stand der Wissenschaft	9
2.1 Grundlagen	9
2.1.1 Kosten von Bauleistungen	9
2.1.2 Zeitliche Bauablaufplanung.....	15
2.1.3 Unschärfen und Risiken.....	18
2.2 Bauteile	24
2.2.1 Bauteile in Ausschreibung und Kalkulation	24
2.2.2 Integrierte Produktmodelle.....	27
2.2.3 Der Raum als Bauteil	29
2.2.4 Virtuelle Baustellen	31
2.3 Ressourcen.....	36
2.3.1 Ressourcen in Simulationsumgebungen	36
2.3.2 Menschen auf virtuellen Baustellen	36
2.3.3 Maschinen auf virtuellen Baustellen	40
2.4 Prozesse	41
2.4.1 Grundlagen der Simulation	42
2.4.2 Modellierung ohne räumliche Modelle	45
2.4.3 Modellierung mit räumlichen Modellen	56
2.5 Schlussfolgerungen für die eigene Arbeit.....	60
3 Anforderungen an die interaktive Modellierung	62
3.1 Funktionalitäten der virtuellen Baustellenumgebung	62
3.1.1 Zusammenführung von Produkt- und Prozessmodell	62
3.1.2 Interaktion zwischen Anwender und virtueller Umgebung	65
3.1.3 Bestimmung von Prozessparametern.....	67
3.2 Vorgehensweise bei der Spezifikation des Bau-Solls.....	69
3.2.1 Orte und Wege auf der virtuellen Baustelle	70
3.2.2 Interaktive Modellierung und Zeitsprünge.....	72
3.2.3 Verhaltenslogik von Objekten	73
3.3 Zusammenfassung der Anforderungen.....	75
4 Theoretischer Lösungsansatz	76
4.1 Bauteile	77
4.1.1 Zerlegung und Gruppierung.....	77
4.1.2 Automatische Zerlegung und Gruppierung.....	79
4.1.3 Temporäre Bauteile.....	80

4.2 Ressourcen.....	81
4.2.1 Personal.....	81
4.2.2 Maschinen.....	84
4.3 Prozesslogik.....	86
4.3.1 Logikbausteine.....	87
4.3.2 Prozessdauern.....	90
4.3.3 Aufträge ohne Prozesslogik.....	91
4.4 Zeit auf virtuellen Baustellen.....	92
4.4.1 Zeit in virtueller Realität.....	92
4.4.2 Verringerung der Bildanzahl.....	93
4.4.3 Raffung der Darstellungszeit.....	94
4.5 Funktionsweise der interaktiven Modellierung.....	96
4.5.1 Soll-Spezifikation einer geraden Mauerwerkswand.....	96
4.5.2 Individuelle Modellierung durch Interaktion.....	99
5 Erprobung an einem Prototyp.....	101
5.1 Konzept für ein einfaches Ladespiel zwischen Bagger und LKW.....	102
5.1.1 Objekte und Orte.....	102
5.1.2 Interaktive Navigation.....	104
5.2 Entwicklung der Zeitsteuerung.....	104
5.2.1 Funktionsweise der virtuellen Uhr.....	105
5.2.2 Bestimmung der Prozessdauern.....	105
5.3 Entwicklung der Prozesslogik.....	107
5.3.1 Logikbausteine für den automatisierten Ablauf.....	107
5.3.2 Logik für die Interaktion mit dem Benutzer über die Tastatur.....	108
5.4 Ergebnisse aus dem Prototyp.....	109
5.4.1 Ermittlung individueller Prozessdauern.....	109
5.4.2 Bewertung des Entwicklungsansatzes.....	111
6 Anwendung der Forschungsergebnisse.....	113
6.1 Definition von Reihenfolgen.....	113
6.2 Parallele Prozesse an getrennten Orten.....	115
6.3 Varianten der Soll-Spezifikation.....	116
7 Schlussbetrachtung.....	118
7.1 Zielbetrachtung.....	118
7.2 Weiterführende Forschung.....	119
7.3 Zusammenfassung und Ausblick.....	122
Abbildungsverzeichnis.....	124
Tabellenverzeichnis.....	126
Literaturverzeichnis.....	127

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AGK	Allgemeine Geschäftskosten
ARH	Arbeitszeit-Richtwerte Hochbau
AVA	Ausschreibung – Vergabe – Abrechnung
BEN	Bedingungs-Ereignis-Netz
BGK	Baustellengemeinkosten
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CAD/CAM	Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing
CAE	Computer Aided Engineering
CPM	Critical Path Method
DMU/BMU/PMU	Digital Mock-Up/Behavioral Mock-Up/Physical Mock-Up
ERP	Enterprise Resource Planning
G	Gewinn
GAEB	Gemeinsamer Ausschuss Elektronik im Bauwesen
GK	Gemeinkosten
GPS	Global Positioning System
IFC	Industry Foundation Classes
KBES	Knowledge Based Engineering Systems
LoD	Level of Detail
LV	Leistungsverzeichnis
NU	Nachunternehmer –(leistungen)
ODBC	Open Database Connectivity
PLM/PDM	Product Lifecycle Management / Product Data Management
PTN	Prädikats-Transitions-Netz
REFA	Reichsausschuss für Arbeitszeitermittlung; Logo des Verbandes für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung e.V.
SPS	Special Purpose Simulation
STEP	Standard of Exchange of Product Data
STN	Stellen-Transitions-Netz

StLB-Bau	Standardleistungsbuch Bau
StLK	Standardleistungskatalog
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VHB	Vergabehandbuch
VOB	Vergabe- und Vertragsordnung (bis 12/2002 Verdingungsordnung) für Bauleistungen
VR	Virtuelle Realität
VRML	Virtual Reality Modeling Language
W	Wagnis

1 Einleitung

Der tatsächliche Aufwand zur Erstellung eines Bauwerkes hängt unmittelbar mit den Entscheidungen und Prozessen zusammen, die vor Ort auf der Baustelle im Zuge der Errichtung getroffen werden. Die Planungsentscheidungen im Vorfeld der Bauausführung haben ohne Zweifel einen großen Einfluss auf den zu erwartenden Produktionsaufwand. Oftmals unterschätzt werden jedoch die von Einzelpersonen situativ und spontan getroffenen Entscheidungen während der Ausführung, die einen folgenreichen Einfluss auf die Kosten, die Bauzeit und den Bauablauf haben. Sie machen auch den Unikatcharakter in der Bauproduktion aus und führen dazu, dass Prozesserfahrungen nur bedingt wieder verwendet und optimiert werden können. Die Wirtschaftlichkeit von nicht repetitiven Prozessmustern auf Baustellen hängt unmittelbar von der Qualität dieser situativen und spontanen Entscheidungen einzelner Beteiligter ab. Aus diesen Gründen lässt die Erforschung von Bauproduktionsprozessen auf einer hohen Detailstufe unter baustellenähnlichen Bedingungen vermuten, dass neue Erkenntnisse über das Zusammenspiel und die Steuerung der Einzelprozesse gewonnen werden. Im Unterschied hierzu wurde bisher die Detailstufe der Einzelprozesse in der baubetrieblichen Forschung gemieden, da Prozessstudien vor Ort auf der Baustelle umständlich und teuer waren und den Charakter einer 'Überwachung' hatten. Mit der Einführung neuer Technologien wie der 'virtuellen Baustelle' lassen sich Prozesssimulationen im Vorfeld der realen Bauproduktion durchführen. Interaktive Elemente erlauben dabei die Integration menschlichen Wissens in die Prozessgestaltung der Bauproduktion im virtuellen Raum einer Baustelle.

Untersuchungen haben gezeigt, dass die Differenz zwischen Auftragssumme und Abrechnungssumme im Durchschnitt 19 % beträgt². Die beträchtliche Höhe der Differenz ist ein Anzeichen dafür, dass die zu erwartenden Baukosten nur in grober Annäherung ermittelt werden. Grund hierfür ist die Tatsache, dass während der Soll-Spezifikation des zu erwartenden Aufwands die situativen und spontanen Entscheidungen in der späteren Ausführungsphase nicht antizipiert werden können. Es werden heute viele Annahmen getroffen, ohne sie im Vorfeld der Angebotsabgabe aufgrund des Zeitaufwands bei der Informationsrecherche zuverlässig zu prüfen. Die Menge der Informationen in den Ausschreibungsunterlagen ist so groß, dass es kaum möglich ist, alle für die Kostenermittlung notwendigen Informationsbausteine zusammenzutragen und zu interpretieren. Des Weiteren werden Überschneidungen der Einzelprozesse nicht untersucht, sodass spezifische Kostentreiber nicht identifiziert werden können. Die Konsequenz sind fälschliche Bewertungen des Aufwands für die Bauproduktion, die zur Unterdeckung der ermittelten Baukosten führen können. Der Grund liegt nicht nur in der Menge der Information, sondern auch in der Methode der Informationsfindung und -verarbeitung. Die verwendeten Medien, wie Papier, digitale 2D-Dateien oder Leistungsbeschreibungen und im besten Fall 3D-Darstellungen, lassen die Suche nach Informationen zu einem zeitaufwändigen und in Anbetracht existierender Medientechnologien ineffizienten Prozess werden.

Virtuelle 3D-Modelle stellen heute ein Medium dar, dessen breite Anwendung sich auch in der Baubranche langsam aber stetig durchsetzt. 3D-Modelle dienen bisher vorwiegend der Visualisierung von Bauprojekten vor Investoren, Bauherren oder Baulaien und waren aus diesem Grund meist nur in den Anfangsphasen eines Projektes zu finden. Lebenszyklus-

² Siehe [Weeb01, S. 131]

übergreifende Forschungsansätze im Bauwesen verbunden mit der vollständigen Abbildung von Produktentwicklungsprozessen in 3D führen dazu, dass auch die Baustelle in virtueller Form in den Blickpunkt der Forschung im Baubetriebswesen und in der Bauproduktion rückt.

Es ist notwendig, die Bauproduktion und damit die Baustelle vor dem Hintergrund dreidimensionaler Technologien zu betrachten, um Medienbrüche und Unterbrechungen im virtuellen 3D-Lebenszyklus eines Bauwerks zu vermeiden. Die Visualisierung der Bauwerksgeometrie ist eine erste Erleichterung. Sie wird jedoch den Potenzialen nicht gerecht, die in 3D-Technologien stecken. Zeitgemäße Lösungen erlauben eine verstärkte Interaktion zwischen Anwender und Modell bei gleichzeitiger Echtzeit-Visualisierung und stellen eine Erweiterung bestehender Lösungen dar.

1.1 Motivation und Schwerpunkt

Die Motivation zur Erstellung dieser Arbeit folgt dem Argumentationsfaden in Abb. 1. Dabei werden die getroffenen Schlussfolgerungen chronologisch aufgeführt. Sie stützen sich auf Erfahrungen als Bauleiter in einem mittelständischen Bauunternehmen auf einer Hochbau-Baustelle der öffentlichen Hand in Deutschland (Auftragsvolumen ca. 12 Mio. EUR).

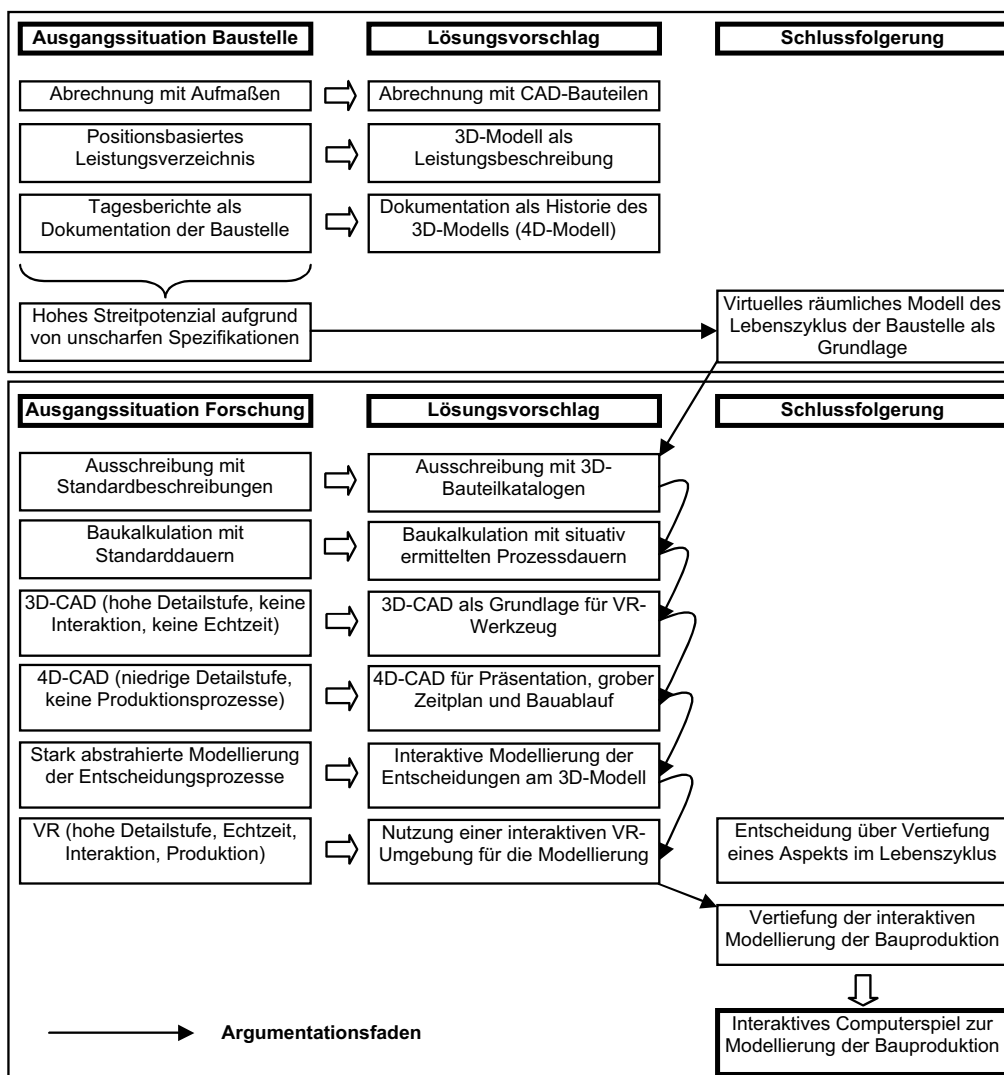


Abb. 1: Argumentation im Vorfeld der Entscheidung zur Forschung

Den Ausschlag gaben vor allem Situationen, in welchen ein schneller Zugriff auf die ange-dachten Soll-Ausführungsprozesse und eine detaillierte Dokumentation der 3D-Baustellengeometrie von entscheidendem Nutzen gewesen wäre. Dies betrifft ebenso den Vergleich zwischen Soll-Vorgaben zur Produktion vor Beginn der Ausführung und den Ist-Bauprozessen auf der realen Baustelle zur Dokumentation von Abweichungen im geplanten Bauablauf. Auch die Erstellung von Aufmaßen im Rahmen der Abrechnung sowie die Doku-mentation des Baufortschritts über handgeschriebene Tagesberichte boten Potenzial zur Optimierung. Mögliche Interpretationen des Textes in Leistungsbeschreibungen schufen großes Konfliktpotenzial, sodass die Notwendigkeit unmissverständlicher Dokumentations- und Beschreibungsmethoden offenbar wurde.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Bestimmung und Dokumentation der produktions-relevanten Entscheidungen im Rahmen der Spezifikation von Soll-Vorgaben bei der Ange-botsfindung. Es entstand die Idee, die Modellierung der Bauproduktion auf der Basis eines interaktiven 3D-Modells zu entwickeln, um räumliche Veränderungen und parallele Prozesse auf der virtuellen Baustelle im Rahmen der Entscheidungsfindung besser berücksichtigen zu können und um eine Lücke im 3D-Lebenszyklus zu schließen. Verlangt man im Zusammen-hang mit virtuellen Baustellen einen hohen Grad an Interaktivität mit dem 3D-Modell, dann bieten sich Computerspieltechnologien sehr gut zu Erprobungszwecken an. Damit spannt sich der Bogen der Arbeit von der Ausschreibung über die Kostenermittlung bis zur Zeit- und Ablaufplanung mit virtuellen 3D-Modellen (4D-Modeling) in der Angebotsphase eines Bau-projekts. Die interaktive Modellierung der Bauproduktion ist als 3D-modellbasierte Methode der Simulation zu verstehen, die Entscheidungen als Input benötigt und die Kostenermittlung sowie die zeitliche Ablaufplanung als Output liefert.

1.2 Problemstellung

Bei der Nutzung von virtuellen 3D-Modellen erfolgt die Modellierung nicht abstrahiert, son-der in Anlehnung an das 3D-Produktmodell. Zu der Prozessbetrachtung im Prozessmodell kommen die Bauteile aus dem Produktmodell und die Ressourcen des Bauunternehmens hinzu (Abb. 2).

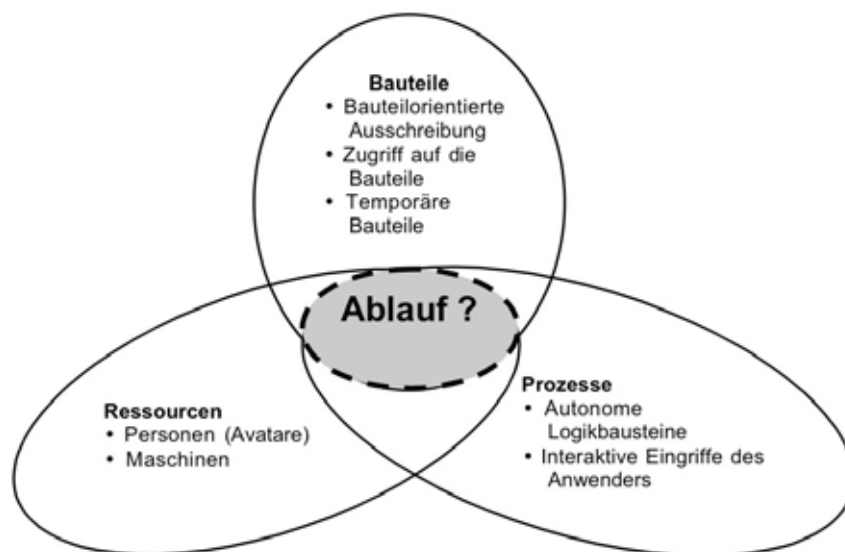


Abb. 2: Ausgangssituation bei der interaktiven Modellierung

Temporäre Bauteile werden nur vorübergehend benötigt und danach wieder von der virtuellen Baustelle entfernt. Der Anwender sieht sich Bauteilen, Ressourcen und Prozessen gegenüber, aus denen er einen möglichst wirtschaftlichen Bauablauf gestalten soll. Die Integration von Ressourcen und Bauteilen ist auch mit abstrahierten Modellierungsmethoden in 2D möglich, jedoch fehlt die einfache visuelle Rückkopplung dessen, was gerade im Modell abläuft. Ein interaktiver Eingriff des Anwenders ist dort zwar technisch möglich, jedoch aufgrund der fehlenden Rückkopplung vom Anwender nur schwer durchzuführen, da die Entscheidungsgrundlage nicht so offensichtlich ist wie in einer virtuellen Realität. Ohne visuelle Rückinformation weiß der Anwender nicht sofort, in welcher Situation sich das Modell befindet. Weiterhin fehlt ihm die Bestätigung, dass seine Entscheidung für den weiteren Verlauf der Modellierung sinnvoll war. Im Gegensatz zu abstrahierten Methoden in 2D spielt die visuelle Kommunikation und insbesondere die damit verbundene Rückkopplung zwischen virtueller Realität und Anwender in dieser Arbeit eine große Rolle. Sie verlangt eine sinnvolle Integration des Anwenders in die virtuelle Umgebung der Baustelle, um Potenzial aus der gemeinsamen Betrachtung von Prozess- und Produktmodell und den Ressourcen zu schöpfen. Die Problemstellung in dieser Arbeit lässt sich anhand folgender Fragestellung formulieren:

Wie kann ein Anwender Bauteile, Ressourcen und Prozesse auf einer virtuellen Baustelle durch interaktive Eingriffe derart miteinander verknüpfen, dass auf dieser Grundlage die Kosten, der Bauablauf und die Bauzeit im Rahmen einer Soll-Spezifikation für die Angebotsabgabe ermittelt werden können?

1.3 Ziel der Arbeit

Das Ziel der Arbeit besteht in der Entwicklung einer Methode zur interaktiven Modellierung der Bauproduktion auf Arbeitsvorgangsebene. Die entwickelte Methode unterstützt die Definition einer Soll-Spezifikation für die Angebotsabgabe eines Bauunternehmers. Dazu wird ein Modellierungskonzept auf der Basis von interaktiven 3D-Modellen entwickelt und ein Szenario prototypisch mit einer Game Development Engine umgesetzt. Das entstandene Computerspiel wird verwendet, um Parameter für Bauproduktionsprozesse auf hoher Detailebene zu ermitteln. Die Parameter werden benutzt, um Aussagen zu den Kosten, der Bauzeit und dem Bauablauf zu tätigen. Die im Rahmen der Arbeit zu lösenden Aufgaben lassen sich wie folgt beschreiben:

1. Analyse des Stands der Forschung für Bauteile, Ressourcen und Prozesse
2. Entwicklung einer Methode zur interaktiven Disposition von Bauteilen, Ressourcen und Prozessen in einer virtuellen Baustellenumgebung
3. Entwicklung eines Software-Prototyps als interaktives Computerspiel für einen ausgewählten Arbeitsprozess zum Zweck der Verifikation der vorgeschlagenen Lösung

Die Grundidee sieht vor, dass der Anwender auf einer virtuellen Baustelle die Bauproduktion interaktiv „durchspielt“ und im Hintergrund ermittelte Parameter, wie z.B. eingesetzte Ressourcen oder die Prozessdauern, in eine Datenbank geschrieben werden. Das Ergebnis ist eine Soll-Spezifikation des Gesamtprojekts. Diese Soll-Spezifikation kann das individuelle Wissen eines einzelnen Anwenders beinhalten oder das Ergebnis von mehreren Spieldurchläufen sein, die das Wissen mehrerer Anwender integriert.

1.4 Einordnung in die aktuelle Forschung

Die drei Komponenten der interaktiven Modellierung befinden sich in der heutigen Forschungslandschaft in unterschiedlichen Entwicklungsstadien. Ressourcen sind im Bauwesen gut erforscht. Bauteile und in diesem Zusammenhang das bauteilorientierte Planen und Bauen sind Gegenstand der aktuellen Forschung. In einigen Bereichen hat sich das bauteilorientierte Planen und Bauen bereits in der Praxis durchgesetzt. Die Bauproduktionsprozesse bieten noch viel Forschungspotenzial. Im Zusammenhang mit dieser Arbeit wird untersucht, inwiefern kurze repetitive Prozesseinheiten auf hoher Detailebene in wiederverwendbare Algorithmen überführt werden können. Bezüglich der Detailebenen wird in dieser Arbeit von vier Ebenen ausgegangen: der Unternehmensebene, der Projektebene, der Produktionsprozessebene und der Arbeitsvorgangsebene³. Einen Zusammenhang zwischen den Komponenten der interaktiven Modellierung und aktuellen Forschungsarbeiten stellt Tab. 1 her.

Ressourcen	<ul style="list-style-type: none"> • Ressourcenbasierte Modellierung von Bauprozessen
Bauteile	<ul style="list-style-type: none"> • Ausschreibung und Kalkulation mit Bauteilen • Visualisierung des Bauablaufs mit Bauteilen (4D-Modeling) • Verknüpfung der Bauteile aus dem Produktmodell (z.B. Wände, Stützen, Decken) mit der virtuellen Baustelle • Umgang mit sich verändernden Bauteilen und Räumen auf der virtuellen Baustellenumgebung (z.B. Baugrube, Aushub und Wiederverfüllung, Hilfskonstruktionen, Straßen, sonstiger Bestand vor Baubeginn)
Prozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Klassische Modellierung und Simulation von Bauprozessen • Visuelle interaktive Simulation (VIS) als Alternative zur klassischen Simulation • Autonom ablaufende Prozesslogiken⁴ • Parallelität und Interferenz von Prozessen

Tab. 1: Einordnung der interaktiven Modellierung in die aktuelle Forschung

Des Weiteren werden aus Anwendersicht Entwicklungsumgebungen für virtuelle Welten und deren Potenzial für baubetriebliche Zwecke untersucht. Als Vorbilder dienen hier die Automobilindustrie und insbesondere die dortigen Entwicklungen um die virtuelle Fabrik.

Die Vorgehensweise, aus Bauteilen, Ressourcen und Prozessen ein Simulationsmodell zu entwickeln, wird auf nationaler und internationaler Ebene zurzeit intensiv erforscht. Es wurden Ansätze auf der Grundlage von 3D-Modellen neben klassischen Ansätzen mit grafischen Modellierungsmethoden untersucht. Diese Ansätze besitzen die Gemeinsamkeit, dass sie von einem vordefinierten und abstrahierten 2D-Prozessmodell ausgehen, welches in 3D oder 4D 'visualisiert' wird. Die Verwendung des 3D-Modells wird auf darstellerische Zwecke reduziert. Der Einsatz von Virtueller Realität (VR) für baubetriebliche Zwecke wurde meist im Zusammenhang mit Visualisierungen vorgefunden. Es wurden einzelne Arbeiten zur Interaktion mit Objekten auf virtuellen Baustellen zum Zweck der Soll-Spezifikation gefunden.

³ Siehe [Gar79]

⁴ Im Folgenden wird der Begriff 'Logik' - wenn nicht anders definiert - im Sinne einer Reihenfolge von chronologisch aufeinanderfolgenden Prozessschritten verwendet.

Das Alleinstellungsmerkmal dieser Arbeit besteht in der echtzeitigen Interaktion mit dem 3D-Modell in Anlehnung an virtuelle Welten aus Computerspielen. Der Bauablauf wird interaktiv und mit visueller Rückkopplung sukzessive simuliert, wie bei einem Computerspiel. Der wesentliche Unterschied zu klassischen Simulationsansätzen besteht im Zweck des Spiels. Während die klassische Simulation ein Prozessmodell bzw. dessen Parameter rechnerisch optimieren soll, will das Spiel die anwenderbezogene Lösung eines Problems dokumentieren. Diese Lösung kann auch suboptimal sein, wenn der Anwender aufgrund eigener Erfahrung auf das vom Computer ermittelte Optimum verzichtet.

2 Stand der Wissenschaft

Nach der erfolgten groben Einordnung der Thematik in die aktuelle Forschung wird in Kapitel 2, aufbauend auf den drei Komponenten der interaktiven Modellierung (Bauteile, Ressourcen und Prozesse), eine genauere Analyse des Stands der Forschung zur Spezifikation des Bau-Solls vorgenommen. Im Vorfeld werden einige Grundlagen heute angewandter Methoden der Soll-Spezifikation erläutert.

2.1 Grundlagen

Die erste Spezifikation des Bau-Solls erfolgt heute in Bauunternehmen im Vorfeld der Angebotsabgabe auf der Grundlage der beschriebenen Bauleistungen in den Ausschreibungsunterlagen. Diese geben den Abstraktionsgrad und damit die Detailstufe der Betrachtung der auszuführenden Bauleistungen vor. Wichtigste Dokumente auf Auftraggeberseite sind die Pläne und das Leistungsverzeichnis, in denen die auszuführenden Bauleistungen in Grafik und Text beschrieben werden. Auf Auftragnehmerseite sind die wichtigsten Dokumente der Soll-Spezifikation für ein Angebot die Kostenermittlung und der zeitliche Ablaufplan. Auf beide wird im Folgenden kurz eingegangen.

2.1.1 Kosten von Bauleistungen

Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Methoden zur Kostenermittlung wird im Folgenden von der Kalkulation über die Endsumme ausgegangen. Diese gilt heute als Standardmethode im Baubetrieb. Es wird darauf hingewiesen, dass bei der Verwendung des Begriffs 'Kalkulation' in dieser Arbeit die Ermittlung der Einzelkosten der Teilleistungen gemeint ist und nicht die strategische Preisfindung. Eine zeitliche Einordnung der verschiedenen Kalkulationen zeigt Abb. 3. Die Betrachtung in dieser Arbeit erstreckt sich auf die Phase der Erstellung eines Angebots.

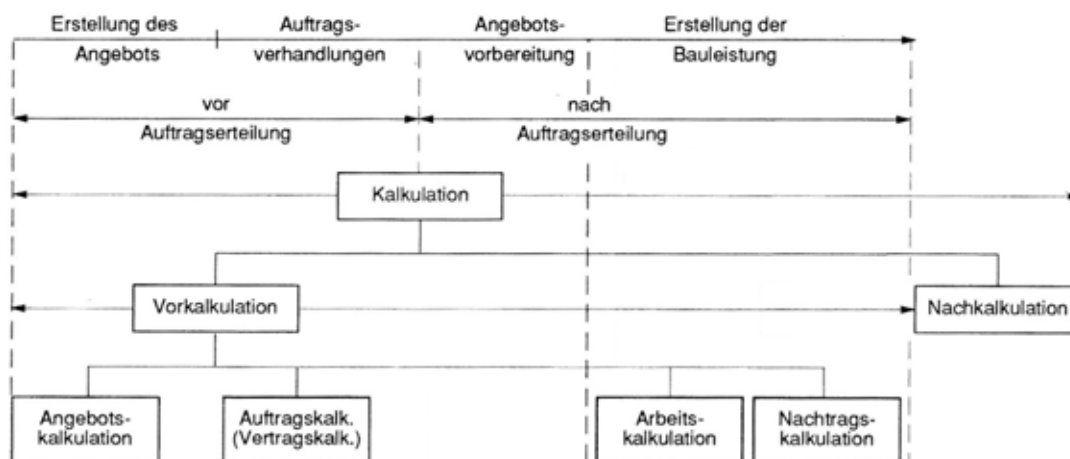


Abb. 3: Arten der Kalkulation, in Anlehnung an: [Drees02, S. 20]

Die Prozesse der Kostenermittlung basieren heute auf Strukturen aus den Anfängen des 20. Jahrhunderts⁵. Seitdem hat sich an den wesentlichen Prinzipien nicht viel verändert. Es hat sich die breit gefasste Meinung durchgesetzt, dass Kosten von Bauprojekten im Vorfeld nicht

⁵ Siehe [Mantsch04, S. 93]: [Opitz67] erschien als Heft 10 der Schriftenreihe der Wirtschaftsgruppe Bauindustrie im Jahre 1940; diese geht zurück auf die 1926 erstmalig vom Reichsverband Industrieller Bauunternehmungen e.V. herausgegebene Schrift „Selbstkostenermittlung für Bauarbeiten“

genau zu ermitteln sind. Aus diesem Grund gelten Bemühungen, die auf eine genaue Ermittlung der Kosten im Vorfeld zielen, als übertrieben. Die Genauigkeit der Kalkulation spiegelt den Umgang des Bauunternehmers mit Risiken wieder. Da Kreditgeber heute den Umgang eines Unternehmers mit Risiken bei ihrer Kreditvergabe verstärkt berücksichtigen, bieten genaue Kostenermittlungen dem Unternehmer eine gute Möglichkeit, die eigene Kreditwürdigkeit zu erhöhen⁶. Die Methoden der Kalkulation aus den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts müssen an die neue Situation angepasst werden, da sie schwer erkennbare Risiken nicht in ausreichendem Maße offen legen. Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass Unternehmer bei einer Angebotsabgabe nicht unbedingt die Genauigkeit der Kostenermittlung als entscheidenden Faktor für den Gewinn der Submission ansehen.

Die Wissenschaft verfügt über Standardwerke, die das Thema Baukalkulation behandeln [Opitz67, Drees02, Fleisch04, Keil01, Mantsch04]. Sowohl Drees [Drees02] als auch Keil et al. [Keil01] unterscheiden in zwei grundsätzliche Verfahren, die Divisionskalkulation und die Zuschlagskalkulation. Drees führt zusätzlich noch die Verrechnungssatzkalkulation auf, die der Bestimmung von Verrechnungssätzen für Maschinen dient. Mantscheff und Helbig [Mantsch04, S. 158] führen insgesamt 13 nationale und internationale Kalkulationsmethoden an. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen in der Abgrenzung zwischen Einzel- und Gemeinkosten⁷. Zur weiteren Vertiefung wird auf die genannte Literatur verwiesen. Im Folgenden wird die Kalkulation über die Endsumme kurz erläutert.

Kalkulation über die Endsumme

Bei der Kalkulation über die Endsumme werden die Gemeinkosten der Baustelle (BGK) separat unter Berücksichtigung der spezifischen Randbedingungen des Projektes ermittelt. Die BGK werden nicht über einen Prozentsatz auf die Einzelkosten der Teilleistungen (EKT) aufgeschlagen, sondern nach vorheriger Bedarfsanalyse berechnet. Für den Kalkulator entsteht Mehraufwand durch die Ausweisung und Berechnung der BGK. Die KLR Bau [KLR01, S. 42] definiert eine Liste mit potenziellen Baustellengemeinkosten. Der Aufbau der Kalkulation über die Endsumme gliedert sich wie folgt:

1. Einzelkosten der Teilleistungen (EKT)
+ 2. Gemeinkosten der Baustelle (BGK)
= Herstellkosten (HK)
+ 3. Allgemeine Geschäftskosten (AGK)
= Selbstkosten (SK)
+ 4. Wagnis und Gewinn (W+G)
= Angebotssumme ohne Umsatzsteuer
+ 5. Umsatzsteuer
= <u>Angebotssumme mit Umsatzsteuer</u>

Tab. 2: Gliederung der Kalkulation über die Endsumme (aus: [Drees02, S. 42])

⁶ Siehe in diesem Zshg. die Entwicklungen um Basel II: Neuordnung zur Behandlung von Kredit- und Betriebsrisiken bei Banken

⁷ Siehe [Mantsch04, S. 159, Tafel 17]: Unterschiedliche Verfahrensmerkmale einiger Kalkulationsmethoden

Tab. 3 zeigt die Methode zur Ermittlung der Kosten für eine Position eines Leistungsverzeichnisses (LV). Als Ergebnis erhält man einen Einheitspreis pro Mengeneinheit der betreffenden LV-Position. Der Gesamtpreis einer Position verhält sich direkt proportional zu der Gesamtmenge einer Position. Dies stellt eine starke Abstraktion dar, da davon ausgegangen wird, dass bei einer Erhöhung der Menge auch der Aufwand proportional steigt. Die in der Realität zu erwartenden produktionsrelevanten Arbeitsvorgänge werden auf höherer Detailstufe nicht betrachtet, sodass keine genaue Annäherung an den tatsächlich zu erwartenden Aufwand möglich ist.

Die unten dargestellte Methode wird im Rahmen dieser Arbeit dahingehend überarbeitet, dass die Ermittlung der Kosten nicht mehr pro Mengeneinheit einer Position erfolgt, sondern durch die interaktive Modellierung der Bauproduktionsprozesse auf der Detailebene der Arbeitsvorgänge. Die Ermittlung der Kosten erfolgt in Anlehnung an die Spezifikation des Bau-Solls in der virtuellen Realität der Baustellenumgebung.

Position-Nr.	Kurztext	kalkulierte Einheit (= Einheit aus LV-Position)	Arbeitszeit-Richtwert in h/Einheit	Lohn (bei einem Mittellohn von 26,50 €/h)	Stoff (benötigter Beton)	Gerät	NU ⁸	Einheitspreis der Position in €/m ³
01.01.0010	Auffüllung Stahlbeton C20/25	1 m ³	0,5 h/m ³	13,25 €/m ³	60,00 €/m ³	0,00 €/m ³	0,00 €/m ³	73,25 €/m³
Addition aller Kostenarten ⇒								
		(d. h. der Einheitspreis wird für 1 m ³ Füllbeton bestimmt)	Quellen zu Richtwerten, z.B. Arbeitszeit-Richtwerte Hochbau (ARH), [ARH05]	0,5 h/m ³ * 26,50 €/h = 13,25 €/m ³	Betonpreis pro m ³ lt. Einkauf der Firma			13,25 €/m ³ + 60,00 €/m ³ = 73,25 €/m ³

Tab. 3: Kalkulation der Einzelkosten mit den 4 Kostenarten Lohn, Stoff, Gerät und NU

Berücksichtigte Kostenarten

Bezüglich der Untergliederung der Einzelkosten in Kostenarten gibt es bei der heute meist angewandten Kalkulation über die Endsumme keine einheitliche Lösung⁹. Drees [Drees02] nimmt eine Untergliederung in bis zu sechs Kostenarten vor und weist darauf hin, dass diese Unterteilung von den Festlegungen in den einzelnen Bauunternehmen abhängig ist. Eine Unterteilung in die vier Kostenarten Lohn-, Stoff-, Gerätekosten und Nachunternehmerleistungen hat sich in der Praxis durchgesetzt. Je differenzierter die Unterteilung ist, desto komplizierter und langwieriger wird die Kalkulation, da die Einzelkosten für jede Kostenart getrennt bestimmt werden müssen. Der Vorteil dagegen ist, dass ein genaueres Controlling möglich wird. Die KLR Bau [KLR01] unterscheidet in bis zu acht Kostengruppen. Im Rahmen dieser Arbeit werden lediglich die Kostenarten Lohn-, Stoff- und Gerätekosten berücksichtigt. Die Ermittlung der Kosten erfolgt dabei auf der Grundlage des vom Anwender bestimmten Bauablaufs auf einer vergleichsweise hohen Genauigkeitsstufe. Es sind Auswertungen bis zu einzelnen Bauteilen, Kolonnen und Prozessarten möglich.

⁸ NU = Nachunternehmerleistungen

⁹ Siehe auch [Mantsch04, S. 159, Tafel 17]: uneinheitlicher Umgang mit der Anzahl der Kostenarten bei 13 untersuchten Kalkulationsverfahren

Computergestützte Baukalkulation

Die Grundsteine der computergestützten Baukalkulation wurden mit der Einführung von ersten AVA-Softwarelösungen in den 1970er Jahren gelegt¹⁰. Die bis heute andauernde Entwicklung bildet bestehende Prozesse der Ausschreibung und Baukalkulation digital ab und hat zur Entwicklung mächtiger Softwaresysteme geführt. Die Einführung von virtuellen 3D-Modellen in der Bauplanung ermöglicht heute die Mengenermittlung auf der Basis von 3D-Modellen. Die Mengenermittlung bildet eine erste Schnittstelle zwischen der zweidimensionalen AVA-Welt und der dreidimensionalen CAD-Konstruktion. Im Folgenden wird der heutige Status quo in der computergestützten Kalkulation kurz umrissen.

Die computergestützte Baukalkulation bietet gute Möglichkeiten der Zeiteinsparung im Kalkulationsprozess. Diesen Umstand hat man der Standardisierung von Beschreibungstexten und Dokumentenarten durch den Gemeinsamen Ausschuss für Elektronik im Bauwesen (GAEB) zu verdanken (Abb. 4).

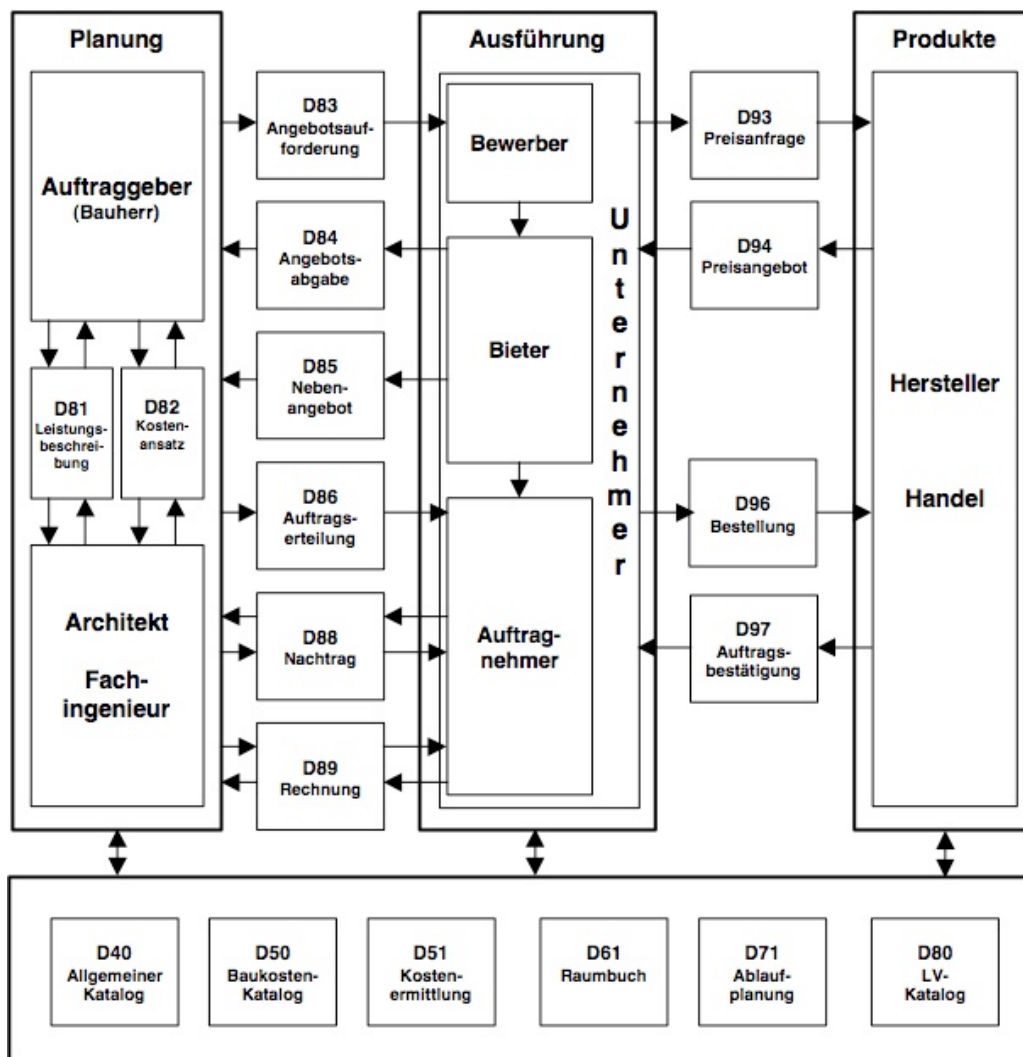


Abb. 4: Austauschphasen nach dem GAEB-Standard, aus [GAEB2000, S. 51]

¹⁰ z.B. Idealog von RIB im Jahre 1975, siehe <http://www.rib.de/> (16.02.06)

Am Anfang der Historie von standardisierten Leistungsbeschreibungen standen zwei papierbasierte Kataloge: das Standardleistungsbuch für das Bauwesen (StLB) und der Standardleistungskatalog für den Straßen- und Brückenbau (STLK). Beide nutzen Zahlenschlüssel als Zuordnungsprinzip. Heute verfügt die Branche über die computergestützte Weiterentwicklung dieser Kataloge, das StLB-Bau und die Dynamischen Baudaten [StLB-Bau05]. Dieses Textsystem hat den Vorteil, dass es den Nutzer interaktiv und unterstützend durch die Erstellung von Leistungsbeschreibungen führt. Es prüft dabei die Entscheidungen des Nutzers auf Plausibilität. Mit den Dynamischen BauDaten sind darüber hinaus auch 'automatische' Kalkulationen möglich, indem den vom Nutzer definierten Anforderungen vordefinierte Kalkulationsansätze zugeordnet werden und somit eine Kostenaussage möglich wird.

Grundlage für die computergestützte Baukalkulation stellen Software-Umgebungen dar, welche mit dem GAEB-Standard konform gehen. Der GAEB hat Standard-Schnittstellen entwickelt, die im gesamten Bauprozess einen durchgängigen Dokumentenaustausch ermöglichen. Das Basiskonzept der GAEB-Schnittstelle sieht keine direkte Integration von CAD-Daten oder virtuellen Produktbauteilen in die GAEB-Dateien vor. Wie Rösel und Riedel schreiben [Rösel04, S. 101], existieren bereits einige Softwaresysteme, bei welchen *'eine Übernahme der im CAD-Programm durchgeführten Mengenermittlung in das AVA-Aufmaß möglich'* ist. Eine breite Anwendung erfolgt bisher nicht, da nur wenige Bauprojekte gewerkeübergreifend komplett in 3D konstruiert werden. Dies ist jedoch Voraussetzung für eine komplette Mengenermittlung auf der Basis eines virtuellen 3D-Modells. Es gibt spezielle Anwendungen in der Fertighaus-Industrie, welche ein Leistungsverzeichnis direkt aus dem Modell generieren können. Andere Anwendungen sehen vor, Daten aus 3D-Schalungsmodellen für Mengenermittlungen zu nutzen. Diese herstellerepezifischen Werkzeuge geben Listen mit verwendeten Schalungsteilen für bestimmte Bauteile oder Bauteilgruppen aus. Es existieren nicht nur einige Insellösungen, sondern auch Erweiterungen für existierende CAD-Programme.

Mit der Einführung des StLB-Bau und der Dynamischen Baudaten wurde der Versuch gestartet, den Zeitaufwand für die Erstellung von Ausschreibungen und Baukalkulationen durch die Verwendung wiederkehrender Bestandteile und Prozesse zu minimieren. Der aktuelle Stand in diesem Bereich sieht die Entwicklung von branchen- und herstellerepezifischen Standardleistungsbüchern vor und steht der eigentlichen Idee der Standardisierung – der allgemeingültigen Formulierung von Leistungsbeschreibungen – entgegen. Weiterhin ist festzustellen, dass die fortführende Entwicklung von rein textlichen Beschreibungen dem heutigen Stand der Technik in den Bereichen 3D-CAD, Lebenszyklus-Systeme und Produktdatenkataloge (Kataloge mit virtuellen 3D-Objekten von realen Bauteilen zur Verwendung in CAD-Systemen) nicht mehr entspricht, da die auf Text allein reduzierte Information qualitativ nicht mit dem Gesamtpaket aus Text und 3D- und 4D-Informationen mithalten kann. Wie Lorenz [Lor03] im Rahmen einer Diplomarbeit untersucht hat, wäre eine intensivere Verknüpfung von CAD und Kalkulation möglich. Die grundsätzliche Frage ist dabei, wie die Systeme zu integrieren sind. Lorenz geht in der von ihm vorgeschlagenen Lösung den Weg der Integration der AVA-Daten in das CAD-System, da dort viele Parameter der zu beschreibenden Leistungen bereits definiert sind, z.B. Geometrien oder Materialien.

Die computergestützte Kalkulation ist in der Praxis heute umstritten. Nach einer Umfrage von Fayek et al. [Fayek99] zum Thema 'computerbasierte Kalkulation' sehen Unternehmen den Vorteil computerbasierter Kalkulation darin, dass der Kalkulationsprozess vereinheitlicht wird.

Die Gründe der Verweigerer zitiert er wie folgt:

- Die Anzahl der zu kalkulierenden Positionen ist zu klein; es ist keine Effizienzsteigerung durch Computereinsatz zu erwarten.
- Es wäre schwierig, ein Programm zu finden, welches allen Kalkulatoren im Unternehmen zusagen würde.
- Jeder Kalkulator hat seinen eigenen 'Stil'. Der Computereinsatz würde dazu führen, dass die Kalkulatoren das 'Gefühl' für das Projekt verlieren.

Das Bedürfnis nach sehr spezifischen Lösungen führt auch heute noch zu Insellösungen, die spezielle Anforderungen der Kalkulatoren berücksichtigen. Ein Beispiel ist die Implementierung von SmartEST durch Ruwanpura et al. [Ruw01, S. 39], die für die Stadt Edminton eine spezielle Lösung für den Tunnelbau implementiert haben. Auch allgemein gehaltene Lösungen erschrecken durch ihre Mächtigkeit. Es ist notwendig, die Prozesse im Bereich der Kalkulation einem Reengineering zu unterziehen, um sie schlanker und effizienter zu machen und neuen Technologien anzupassen [Allw96, S. 30]. Ein erster Schritt besteht darin, die Prozesse in diesem Bereich zu untersuchen und abzubilden. Ein Beispiel ist die formale und abstrahierte Darstellung der Bauauftragsrechnung bei Ziegler [Ziegl02]. Seine Arbeit untersucht und integriert im Vorfeld der Auswertungen auch existierende Modelle und Software-Anwendungen. Er nennt als Quellen Produktbeschreibungen der Firma RIB, welche mit ihrem Produkt ARRIBA in Deutschland zu den Marktführern im Bereich von AVA-Software gehört [Ziegl02, S. 207]. Nach der Auswertung schlägt Ziegler drei Anpassungen am analysierten Modell vor, die allesamt auf der Idee einer konfigurierbaren Prozessabbildung fundieren. Sinngemäß fordert Ziegler hier ein flexibles Workflow-Management-System für den Prozess der Bauauftragsrechnung. Ziegler stellt fest, dass eine Neuimplementierung der Bauauftragsrechnung insgesamt sinnvoll ist.

Die Untersuchungen zum Stand der Forschung bei der computergestützten Baukalkulation haben dazu geführt, in dieser Arbeit einen neuen Ansatz auf der Grundlage interaktiver 3D-Modelle zu verfolgen. Dabei soll die individuelle Auseinandersetzung des Kalkulators mit dem Projekt einen besonderen Stellenwert erhalten. Der persönliche und sogar emotionale Bezug zum Projekt ist eine nicht zu unterschätzende Komponente bei der Kalkulation [Fayek99, Girm01]. Dabei muss die persönliche berufliche Erfahrung des Kalkulators berücksichtigt werden. Aus der Sicht des Managements erscheint diese 'Personifizierung' uneffizient, aus ingenieurtechnischer Sicht kann man den Kalkulationsprozess sicher als 'kreative' Aufgabe bezeichnen, da die Festlegung des Produktionsablaufs von der persönlichen Erfahrung des Kalkulators abhängt. Daher ist eine Automatisierung des Kalkulationsprozesses nicht im Sinne einer technisch ausgefeilten Lösung, da die menschliche Entscheidungskomponente unterrepräsentiert ist. Umso wichtiger erscheint daher die Transparenz der Kostenermittlung zu sein, wenn man uneinheitliche, an einzelne Personen gebundene Kalkulationsmethoden favorisiert.

Zusammenfassend kann bei der Betrachtung der Grundlagen zur Kostenermittlung festgestellt werden, dass mit heute zur Verfügung stehenden Methoden eine grob angenäherte Ermittlung der Baukosten gut möglich ist. Detaillierte projektspezifische Randbedingungen müssen nicht zwingend berücksichtigt werden, wenn der Bauunternehmer in Zeiten guter Konjunktur mit kostendeckenden Preisen kalkulieren kann. In Zeiten schlechter Konjunktur sollten projektspezifische Randbedingungen genauer berücksichtigt werden, um risikoarme

von risikoreichen Projekten unterscheiden zu können. Dazu ist eine Betrachtung der zu erwartenden Arbeitsprozesse auf einer höheren Detailstufe notwendig, um die Komplexität der Prozesse besser erfassen und bewerten zu können. Der Ansatz, die Kosten im Hochbau über optimierte Dauern der Produktionsprozesse zu verringern, ist viel versprechend. Der Grund hierfür liegt in der Kostenverteilung in dieser Sparte, in welcher die Lohnkosten mit bis zu 50 % Anteil an den Gesamtkosten [Haide05, S. 32] noch viel Spielraum für Optimierungen bieten. Diese Optimierung sollte als Ideal den ununterbrochenen Produktionsprozess anvisieren. Dabei geht es nicht um Leistungssteigerungen beim Menschen, sondern um die Schaffung von Randbedingungen, die es den Ressourcen ermöglichen, ohne Zwangspausen zu arbeiten.

2.1.2 Zeitliche Bauablaufplanung

Im Zuge der Kalkulation eines Leistungsverzeichnisses werden für die in den Positionen beschriebenen Leistungen bei Bedarf Unterpositionen definiert, die in ihrer Gesamtheit das Arbeitsverzeichnis bilden. Die Unterpositionen beschreiben die Leistung genauer als dies der Text in einer Position vermag. So wird beispielsweise ein Erdaushub unterschieden in den Baggervorgang und den Transportvorgang durch den LKW. Das Arbeitsverzeichnis stellt bei der klassischen Bauablaufplanung die höchste Detailstufe der Prozessbetrachtung dar. Zur Erstellung eines zeitlichen Bauablaufs werden die Vorgänge im Arbeitsverzeichnis mit einem Anfangs- und Endtermin versehen. Fleischmann [Fleisch04, S. 19] weist darauf hin, dass zwischen den Dauern der Arbeitsvorgänge aus dem Arbeitsverzeichnis und den Dauern im Ablaufplan zu unterscheiden ist. Der Grund hierfür liegt darin, dass bei der positionsbasierten Kalkulation nicht alle Arbeitsvorgänge berücksichtigt werden können. Fleischmann nennt die Zeiten für diese Prozesse 'Randstunden'. In diesem Zusammenhang lässt sich die Zeitgliederung von Arbeiten durch Menschen wie folgt gliedern:



Abb. 5: Zeitgliederung beim Menschen, [REFA84, S. 122]

Dabei sind Randstunden diejenigen Gemeinkostenstunden, die bezogen auf das gesamte Bauwerk anfallen. Umlagestunden sind diejenigen Stunden, die als Gemeinkostenstunden für eine bestimmte Teilleistung erbracht werden. Das Problem besteht darin, dass aufgrund der fehlenden Berücksichtigung von einigen Arbeitsprozessen die tatsächliche Dauer verfälscht wird. Die fortschreitende Detaillierung der Prozesse lässt sich im Überblick wie folgt darstellen:

Dokumententyp	Verzeichnistyp	Detailstufe der Prozessgliederung
Ausschreibung	Leistungsverzeichnis	Position enthält alle Prozesse
Kalkulation	Arbeitsverzeichnis	Position wird in Unterpositionen untergliedert
Ablaufplan	Arbeitsverzeichnis	keine weitere Untergliederung vorgesehen

Tab. 4: Detailstufen der Prozesse bei der Spezifikation des Bau-Solls

Anhand der Tab. 4 erkennt man, dass ab der Detailstufe des Arbeitsverzeichnisses, der gewählten Gliederungsebene der Kalkulation, keine weitere Untergliederung der Arbeitsprozesse bei der Betrachtung der zu erwartenden Bauproduktionsprozesse stattfindet. Das Auslassen einer weiteren Untergliederung der Arbeitsprozesse geschieht aus Vereinfachungsgründen. Die Unterpositionen bilden in der Regel die Grundlage für die Vorgänge in einem Bauzeitplan. Fleischmann erläutert die Übernahme von Zeiten aus der Kalkulation in den Bauzeitplan wie folgt:

Grundsätzlich dürfen nur die Zeiten aus der Kalkulation übernommen werden, die in der Ablaufkette verbraucht werden, also keine Randstunden für Abladen, Vorbereiten, Säubern usw. Diese Randstunden haben normalerweise auf den Baufortschritt keinen Einfluss, sondern werden durch Hilfskräfte parallel, d.h. nebenbei verfahren. Bei der Produktionsanalyse muss natürlich zusätzlich Personal für die Erledigung der Randarbeiten bereitgestellt werden (...). [Fleisch04, S. 19]

Obiges Zitat unterstreicht die Annahme, dass die Randstunden keinen Einfluss auf den Baufortschritt hätten und dass Hilfskräfte diese parallel durchführen würden. Es wird davon ausgegangen, dass diese Randarbeiten nicht Teil der Ablaufkette sind. Untersuchungen von Werner [Wer02, S. 18-19] zeigen, dass diese Randarbeiten einen Einfluss auf den Bauablauf haben können, zum Beispiel bei Abladeproblemen. Diese Einflüsse machen sich erst bemerkbar, wenn man die Detailstufe in der Betrachtung erhöht und sich auf die Ebene der Produktionsprozesse oder Arbeitsvorgänge begibt.

Die Integration der menschlichen Komponente bei der Bestimmung von Dauern wurde in der Forschung auf einer groben Detailebene behandelt. AbouRizk behandelt [Abo93] die Problematik der Subjektivität von Einschätzungen zur Dauer von Prozessen auf der Projektebene. Wie er anführt, erfordern Unschärfen in der Bauzeitplanung die Berücksichtigung des subjektiven Wissensstandes derjenigen Person, welche die Bauzeitplanung durchführt. Aus diesem Grund schlägt er mit seinem System SIDES (= subjective and interactive duration estimation) eine Methode vor, wie man die – von ihm für Simulationszwecke favorisierte – rein stochastische Ermittlung von Dauern umgehen kann, indem der Bauzeitplaner einige subjektive Entscheidungen (z.B. zu erwartendes Wetter, Erfahrungen der Belegschaft, verfügbare Ausstattung etc.) interaktiv am Bildschirm fällt. Anhand dieser Eingaben wird dem Anwender dann ein Vorschlag für die Dauer des Vorgangs unterbreitet. Diese Arbeiten haben mit dazu geführt, dass im Rahmen der eigenen Arbeit eine Methode gewählt wurde, bei welcher der Anwender mit einer virtuellen Umgebung in Interaktion tritt. Halpin bezeichnet in einem Kommentar [Halp93] das von AbouRizk entwickelte Werkzeug als baustellentauglich, da es aufgrund der Interaktivität besonders einfach zu bedienen ist. Dies führt zu einer verbesserten Akzeptanz durch Baustellenpersonal.

Als Zwischenergebnis kann festgestellt werden, dass Einzelprozesse auf Baustellen bei der zeitlichen Ablaufplanung nicht berücksichtigt werden, obwohl deren Qualität direkt mit dem Projekterfolg verknüpft ist. Studien zur Optimierung baubetrieblicher Prozesse auf hoher Detailebene finden sich bei Alfeld [Alf88] und Oglesby et al. [Oglesby89, S. 533-554]. Des Weiteren sind Bestrebungen erkennbar, die subjektive menschliche Entscheidungskomponente bei der zeitlichen Ablaufplanung zu berücksichtigen. Im Folgenden werden einige Methoden zur zeitlichen Ablaufplanung kurz erläutert. Wesentliches Gestaltungsmerkmal dieser Methoden ist der in 2D abstrahiert dargestellte Vorgang.

Darstellung von Vorgängen auf Zeitachsen

Die heute angewandten Methoden zur Darstellung von Prozessabläufen auf Baustellen orientieren sich zum Großteil an der Darstellung von Arbeitsvorgängen über die Zeitachse. Dazu gehören Balkenpläne und Weg-Zeit-Diagramme. Wie Conlin und Retik [Conlin97] erwähnen, sind Baustellenprozesse entgegen der üblichen Darstellungen (z.B. Balkenplan) nicht fortlaufend. Sie kommentieren wie folgt:

Construction schedules cannot really identify the realities of actual site construction. This problem is caused by the construction planner or scheduler applying hard logic to a soft logic situation. This means that an activity has been scheduled as a logical, sequential operation but when it comes to carrying out the operation on site, the activity can be carried out in a variety of ways and sequences. Also, site operations are not always performed continuously. Work may move to other locations or activities at other parts of the project before a given activity is completed. [Conlin97 S. 109]

Die Autoren bemerken die fehlende Realitätstreue von Balkenplänen. Vor diesem Hintergrund sind Balkenpläne auch als Grundlage für 4D-Modelle kritisch anzusehen. Weg-Zeit-Diagramme können sich bei Linienbauwerken (z.B. Straßen oder Tunnel) an das Produktmodell anlehnen, indem die Geometrie der Baustelle (Grundriss oder Schnitt) über eine Achse gelegt wird. Werden die Vorgänge auf der Zeitachse untereinander über Regeln verknüpft, entsteht die Grundlage für die Netzplantechnik. Im Bauwesen übliche Netzpläne sind Vorgangsknoten-Netze, die über Knoten und Pfeile dargestellt werden. Ein Netzplan lässt sich auch als erweiterter Balkenplan darstellen, muss dann aber maßstäblich mit den Dauern der Vorgänge über die Zeitachse aufgetragen werden.

Aktuelle Forschungsarbeiten zu vorgangsbasierten Darstellungen in Zeitachsen wurden zur Integration der Simulation gefunden. Chahrour [Chah04] erwähnt ein Simulationswerkzeug namens PICASSO, welches eine Kombination zwischen der 'critical path method' (CPM = Netzplantechnik) und Simulation darstellt. PICASSO beseitigt Schwachstellen der CPM, darunter die Darstellung der gemeinsamen Nutzung von Betriebsmitteln und von sich wiederholenden Prozessen [Bol98]. Ein Ansatz zur Simulation des Bauablaufs auf der Grundlage der Monte-Carlo-Simulation findet sich bei Werner [Wer02]. Er präsentiert ein Add-In für MS-Project zur Risikobewertung und Risikoklassifizierung von Projekten in Bauunternehmen und koppelt dazu kalkulationsrelevante Daten mit Vorgängen im Balkenplan.

Petri-Netze

Carl Adam Petri [Petri62] entwickelte Bedingungs-Ereignis-Netze (BEN), nach denen ein Ereignis eintritt, wenn alle Bedingungen im Vorbereich eines Ereignisses erfüllt sind (schwarze Marke) und alle Bedingungen im Nachbereich nicht erfüllt sind. Diese Netze erfuhren in den darauf folgenden Jahren einige Erweiterungen. Aus den BEN wurden Stellen-Transitions-Netze (STN: mehrere schwarze Marken pro Stelle) und danach Prädikats-Transitions-Netze (PTN: zusätzliche Kantenvariablen, erweiterte Schaltregeln, Zeitverhalten). Petri-Netze können in Zustände (S) und Vorgänge (T) gegliedert werden. Beziehungen zwischen S und T werden über gerichtete Kanten abgebildet (Abb. 6). Die Dynamik wird erreicht, indem auf den Kanten Marken transportiert werden können. Petri-Netze sind Standardmodelle in der Informatik und der Steuerungstechnik. Sie eignen sich gut zur Entwicklung deterministischer Prozessreihenfolgen. Böhnlein [Böh04] nennt die Vorteile der Petri-Netze unter Verweis auf mehrere Quellen wie folgt:

- Klare und eindeutige Darstellungsmöglichkeit von Prozessstrukturen
- Modularität und Flexibilität der Modellierungen
- Einfache Erlernbarkeit und
- Mächtigkeit in Bezug auf das Analysieren dynamischen Systemverhaltens.

Gerade die Anwendung in der Steuerungstechnik zeigt, dass Petri-Netze dann gut funktionieren, wenn sich das System mit Vorgängen und Zuständen abbilden lässt. Dies ist bei Bauprozessen für repetitive Prozesse gut geeignet. Im Rahmen dieser Arbeit finden Prinzipien der Petri-Netze bei der Abbildung von Logiken Anwendung.

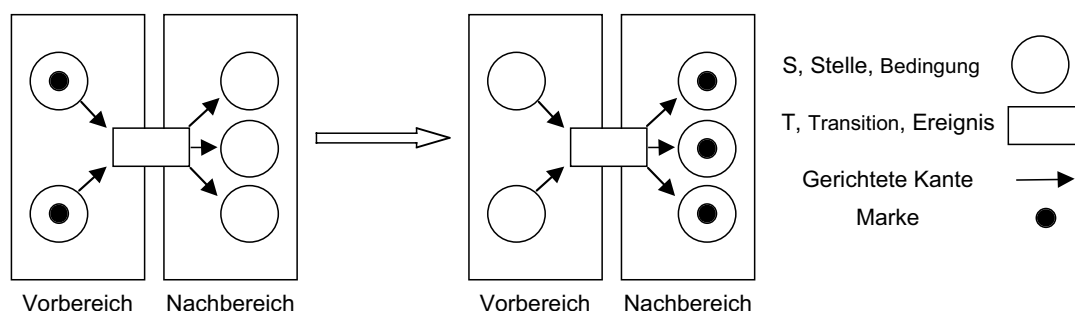


Abb. 6: Schalten eines Bedingungs-Ereignis-Netzes, aus [Böh04], S. 6/7

Zusätzlich zu Balken- und Netzplänen, Zycklogrammen und Petri-Netzen existieren weitere grafische Modellierungsmethoden zur Abbildung der zeitlichen Bauablaufplanung. Insbesondere im Bereich der Simulation wurden bauspezifische Werkzeuge entwickelt, auf die bei der Betrachtung der Prozesse tiefer eingegangen wird. Die oben genannten Methoden zur zeitlichen Bauablaufplanung grenzen sich von dieser Arbeit dadurch ab, dass sie keinen direkten Zusammenhang zur räumlichen Situation auf der Baustelle herstellen.

2.1.3 Unschärfen und Risiken

Im Folgenden werden Unschärfen und Risiken von heutigen Methoden zur Spezifikation des Bau-Solls erläutert. Stochastisch auftretende Risiken werden in die Betrachtung nicht einbezogen. Dazu gehört beispielsweise das Wetterrisiko [Bauch94, S. 13ff]. Die Berücksichtigung von statistischen Wetterdaten bietet hier eine mögliche Methode zur Ermittlung des Wetterrisikos.

Umgang mit Risiken

Der bisherige Stellenwert von Unschärfen und den daraus resultierenden Risiken bei der Definition von Soll-Vorgaben ist gering. Das Hauptargument für diese Haltung findet sich in der schwierigen Antizipation von Ereignissen bei Bauprojekten. Die Abdeckung von Risiken aus solchen Ereignissen erfolgt bisher über einen Zuschlag für Wagnis im Rahmen der Kostenermittlung. Floercke [BVMB05] sagt, dass die Risiken aus Wagnis nicht vorhersehbar sind und daher auch nicht kalkuliert werden können. Aufgrund der Vorbereitung von Basel II sollte die Behandlung von Risiken bei Baukalkulationen neu bedacht werden. Ein echter Paradigmenwechsel hinsichtlich der Behandlung von Risiken ist heute nicht abzusehen. Nußbaumer [Drees02]¹¹ beschreibt den Umgang mit Kostenrisiken wie folgt:

¹¹ Siehe [Drees02, S. 300]; Verweis auf einen Vortrag von Nußbaumer (Universität Stuttgart, 30.01.02)

Üblicherweise wird bei der Kalkulation ein Pauschalzuschlag „Wagnis und Gewinn“ angesetzt, der das unternehmerische Risiko, das Bonitätsrisiko des Auftraggebers und das technische Risiko der Bauausführung abdecken soll. Dieser undifferenzierte Zuschlag hat keine Steuerungswirkung, da ihm nur in wenigen Fällen eine Risikoanalyse vorausgeht. Bezeichnend ist, dass „Wagnis und Gewinn“ oft als reiner Gewinnzuschlag angesehen wird, der bei starker Konkurrenzsituation auch weggelassen werden kann, um ein preisgünstiges Angebot abgeben zu können. [Drees02, S. 300]

Obiges Zitat deckt auf, dass die Risikoanalyse nicht konsequent durchgeführt wird. Dabei wird eine Risikoanalyse alleine wegen der neuen Rating-Richtlinien in Zukunft fester Bestandteil der Unternehmen werden müssen, wenn diese kreditwürdig sein wollen.

Eine vergleichende Studie zwischen der Anlagenbauindustrie und der Bauindustrie von Pekrul und Seefeldt [Pekrul05, S. 17] ergab, dass nach Einschätzung von 90 % der Bauunternehmen das operative Risikomanagement auf die Angebotsphase ausgeweitet werden sollte. Risiken, die erst nach Beauftragung identifiziert würden, seien die häufigsten Gründe für verlustreiche Projekte. Weniger als die Hälfte der befragten Unternehmen haben derartige Maßnahmen erfolgreich umgesetzt. Bezüglich der Fertigung stimmen 95 % der Befragten überein, dass das Bewerten und Überwachen potentieller Risiken im Projektverlauf [Pekrul05, S. 20, Abb. 3] eine notwendige Maßnahme zur Prozessoptimierung sei. Zusammenfassend stellen die Autoren fest, dass die Bauindustrie von den Erfahrungen der Anlagenbauindustrie profitieren kann. Dabei sollten Potenziale im Bereich der Modularisierung (z.B. Fertigteile) besser genutzt und das Projektmanagement verbessert werden.

Hinsichtlich der Akquisitionsphase sind internationale Untersuchungen zum Bietverhalten von Bauunternehmern in Kanada interessant. Wie Fayek et al. [Fayek99] schildern, gaben 58 meist mittelständische Bauunternehmer – hauptsächlich tätig im Straßen-, Brücken-, Erd-, Industrie-, Kraftwerks- und Kläranlagenbau im Westen von Kanada – in einer Umfrage Auskunft über ihr Bietverhalten. In 53 % der Fälle werden Zu- und Abschläge für Risiken und Chancen mit der Gewinnmarge verrechnet. Dabei wird die Gewinnmarge in 74 % der Fälle als Prozentsatz auf die Projektkosten aufgeschlagen. In der Gewinnmarge sind dann bereits Wagnis und Allgemeine Geschäftskosten (AGK) eingerechnet. Diese Zahlen sind insofern überraschend, als dass nur 26 % der Unternehmen statistisch oder mathematisch unterstützte Bewertungsalgorithmen nutzen, um die Wettbewerbsposition zu evaluieren. Nur 12 % nutzen festgelegte Strategien für die Bewertung von Chancen und Risiken, nur 17 % nutzen dies bei der Bestimmung der Gewinnmarge.

Ein weiteres Paradoxon in Fayeks Untersuchung zeigt, dass nur 55 % der Befragten die Qualität ihrer Kalkulation als entscheidend ansehen, wenn es um den zu erwartenden Ausgang der Submission geht. Vielmehr halten 93 % den Typ des Projekts für entscheidend, 88 % die Anzahl der Wettbewerber und 86 % deren Identität. Die Tatsache, dass der Typ des Projekts wichtiger ist als die Qualität der Kalkulation deutet auf eine hohe Wichtigkeit der Präqualifikation der Kandidaten, d.h. die Firmen müssen ähnliche Projekte bereits erfolgreich umgesetzt haben. Die Tatsache, dass die Anzahl der Wettbewerber als wichtig bewertet wird, kann man mit der geringeren Wahrscheinlichkeit des Zuschlags bei einer hohen Anzahl an Wettbewerbern erklären. Bei der Identität spielt wiederum eine Rolle, ob der identifizierte Konkurrent bei einem bestimmten Projekttyp erfahrener ist als man selbst. Sicher sind hier auch weiche Faktoren zu berücksichtigen, z.B. gute Zusammenarbeit zwischen Auftraggeber und Bieter in früheren Projekten.

Untersuchungen in Deutschland zeigen, dass Unternehmen hinsichtlich der Vergabeverfahren in der Mehrheit nicht von fairen Wettbewerbsbedingungen ausgehen [Weeb01 S. 131]. Ebenso kritisch sind die hohe Anzahl der ungenauen Leistungsbeschreibungen von 50 % und die hohe Abweichung zwischen Auftragssumme und Abrechnungssumme von 19 % im Durchschnitt. Es ist auf dieser Grundlage verständlich, dass von einem hohen Nachtragspotenzial ausgegangen wird (71 %) und dass erweiterte Risiken aufgrund von ungenauen Leistungsbeschreibungen gesehen werden (71 %).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Bewertung von Risiken in Baubetrieben vorwiegend 'aus dem Bauch heraus' erfolgt. Eines der größten Risiken ist für Nußbaumer das Risiko aus Fehleinschätzungen der Kalkulationsansätze. Er weist darauf hin, dass zu prüfen ist, ob der Kalkulationslohn und die Baugeschwindigkeit zutreffend eingeschätzt wurden. Die Baugeschwindigkeit hat direkt mit den gewählten Ansätzen für Menschen und Maschinen zu tun. Die Risiken aus Leistungsbeschreibung, fehlerhaften Kalkulationsansätzen und falscher Einschätzung der Baugeschwindigkeit waren in dieser Arbeit die Triebfeder zur Entwicklung alternativer Lösungen.

Verwendung von Kalkulationsrichtwerten

Bei der Betrachtung von vordefinierten Ansätzen für die Soll-Spezifikation der Lohn-, Stoff- und Gerätekosten spielen zeitliche Aspekte vorwiegend bei den Lohn- und Gerätekosten eine Rolle. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf Richtwerte, welche auf historischen oder vordefinierten Daten beruhen. Es wird gezeigt, dass diese Ansätze heute aufgrund der unzureichenden Berücksichtigung projektspezifischer Randbedingungen zu Unschärfen bei der Spezifikation des Bau-Solls führen können.

Die Ermittlung von Richtwerten für Kalkulationsansätze anhand von Feldversuchen auf der Baustelle ist umstritten. Diese Methode ist kostspielig, da sie in der Regel externes Fachpersonal erfordert, welches mehrere Stunden oder Tage auf der Baustelle zubringen muss. Zudem führt die Wiederverwendung der gesammelten Daten nicht zwangsläufig zu korrekten Ansätzen. Schneider [Schneid90] nutzt für eine Fallstudie die Multimoment-Aufnahme. Beobachtet wurde eine Gruppe von Facharbeitern, insbesondere auch hinsichtlich der Verteilzeiten. Es wurden dabei bis zu elf Stufen unterschieden, darunter 'Warten auf Kollegen' oder 'Warten auf Gerät' usw. Das Ergebnis der Untersuchungen von Schneider zeigt jedoch, dass die vor Ort ermittelten Kalkulationsansätze deutlich von den betriebsspezifischen Vorgaben abweichen können (Tab. 5). Ebenso wichen alle innerbetrieblichen Werte von Standardrichtwerten [ARHHoch99, ARH05] ab. Nach seiner Aussage hätte ca. 10 % der Verteilzeit eingespart werden können.

Istzeitwert	2,72 h/m ³
Betriebsspezifische Akkordvorgabe	3,25 h/m ³
Tatsächlicher Akkordmehrverdienst	19,5 %
Gewählter ARH-Tabellenwert	3,00 h/m ³ (nach Korrektur 3,10 h/m ³)

Tab. 5: Vergleich innerbetrieblicher Richtwerte mit Standardwerten [Schneid90, S. 10]

Ein Beitrag von Haide [Haide05] untersucht Zusammenhänge zwischen Methoden der Richtwerterfassung und Zuschlags- bzw. Auftragserfolgen. Sie befragt klein- und mittelständische Bauunternehmen in Mecklenburg-Vorpommern nach der Strategie zur Ermittlung von

Richtwerten für Kalkulationen und nach dem Zusammenhang zwischen Zuschlagserfolg und gewählter Strategie. Interessant ist, dass 70 % der Unternehmen innerbetriebliche Werte bevorzugen. Die Methoden dazu sind vor allem die Arbeitszeitanalyse (14,7 %) und die Nachkalkulation (12 %). Die Standardwerte sind mit 10,8 % vertreten. Ebenso interessant ist, dass 8,2 % mit Schätzungen arbeiten. Im Zusammenhang mit dem Zuschlagserfolg sehen die Unternehmen die Nachkalkulation als wichtigsten Schlüssel zum Erfolg an. Hier zeichnet sich laut Haide die Tendenz ab, dass größere Unternehmen mehr zu Standardwerten und Schätzungen und kleinere Unternehmen eher zu Nachkalkulationen und Arbeitszeitanalysen tendieren. Beim Auftragserfolg stellt sich heraus, dass Kalkulationen mit Werten aus Arbeitszeitanalysen am zuverlässigsten zum Erfolg führen.

Fleischmann [Fleisch04, S. 17] sieht im Richtwert eine Notwendigkeit, weist jedoch darauf hin, dass *‘man sich immer über die ihm anhaftenden Unsicherheiten im Klaren sein’* sollte. Weiter führt er aus, dass man in *‘jedem Einzelfall versuchen (sollte), möglichst viele kalkulatorische Voraussetzungen zu klären’*. Fleischmann verweist auf eine Forschungsarbeit [Oehme82], welche ähnliche Industriebauten, die alle von demselben Büro geplant und vergeben wurden, hinsichtlich der Vergleichbarkeit von Einheitspreisen geprüft hat. Als Ergebnis führt er an, dass die Einheitspreise der ähnlichen Maßnahmen sich erst nach einer Korrektur durch Einflussfaktoren miteinander vergleichen ließen. Als Einflussfaktoren ergaben sich dabei:

- der objektbedingte Schwierigkeitsgrad bei der Herstellung des Elementes sowie sein Anteil am Gesamtauftrag und
- die allgemeinen Arbeitsbedingungen, wie die räumlichen Baustellenverhältnisse, die Baugrundverhältnisse sowie jahreszeitliche Einflüsse.

In dieser Arbeit werden insbesondere die Veränderungen der räumlichen Baustellenverhältnisse im Zuge der fortschreitenden Bauproduktion in der virtuellen 3D-Umgebung der Baustelle in die Betrachtung einbezogen. Fleischmann verweist auf eigene Beiträge [Fleisch02], in welchen er die Einheitspreise als Grundlage für Kostenrichtwerte negiert und Preise für einzelne Gebäudeelemente auf der Grundlage von Kalkulationswerten ermittelt. Die Tendenz zu elementbasiertem Denken zeigt sich hier ebenso wie beim StLB-Bau, wo mittlerweile auch Bauteilgruppen, wie z.B. Dächer, mit allen Einzelementen überschläglich kalkuliert werden können. Ein weiterer Hinweis auf Risiken durch standardisierte Kalkulationsansätze findet sich bei Werner. Er weist darauf hin, dass diese Werte für ein effizientes Risikomanagement nicht brauchbar sind, da sie *‘betriebliche Organisation und Qualifikation’* nicht berücksichtigen [Wer02, S. 19-20]. Die Untersuchungen von Fleischmann und Werner zeigen, dass standardisierte Daten nur nach eingehender Prüfung der Randbedingungen im Einzelfall verwendet werden sollten. Weiterhin rückt das Bauteil oder die Bauteilgruppe bei der Kostenermittlung in den Mittelpunkt der Betrachtung.

Beschreibung von Leistungen

Leistungsbeschreibungen mit Leistungsverzeichnissen auf der Basis von Texten können Verbindungen zu geometrischen Informationen der beschriebenen Leistung nur unzureichend herstellen. Beschreibungen wie *‘Herstellen einer Betonwand mit einer Höhe zwischen 3 und 5 m’* geben nicht genügend Aufschluss über die Randbedingungen bei der Herstellung der Wand. Eine Analyse der Geometrie wäre auf der Basis von 2D-Plänen zwar möglich, jedoch müsste der Kalkulator vorerst in den Planunterlagen nach den in Frage kommenden

Wänden suchen. Dieser Prozess macht die Kalkulation langwierig. 2D-Informationen berücksichtigen die sich ändernde Baustellengeometrie während des Bauablaufs nicht und vermögen so kaum, die Bauleistungen realitätsnah zu beschreiben.

Die Vergabe- und Vertragsordnung (VOB) definiert unter § 9 VOB/A [Kapell05, S. 224] ebenso wie das Vergabehandbuch [VHB99] Anforderungen an Leistungsbeschreibungen. Unterzieht man diese Anforderungen einer genauen Prüfung, dann ist zu erkennen, dass sie mit 2D-Methoden (Text und Plan) eigentlich nicht zu erfüllen sind. Wie Keil et al. [Keil01, S. 116] ausführen, muss die Leistung nach VHB, Punkt 1.2 *‘eindeutig, vollständig, technisch richtig und ohne gewöhnliche Wagnisse für die Bieter beschrieben werden.’* Die VOB/A geht sogar noch einen Schritt weiter, indem sie in § 9 fordert, dass die Leistung eindeutig und so erschöpfend zu beschreiben ist, *‘dass alle Bewerber die Beschreibung im gleichen Sinne verstehen müssen (...).’* Die Formulierung *‘verstehen müssen’* deutet auf die Absicht der formulierten Anforderungen, Missverständnisse auszusräumen. Betrachtet man vor diesem Hintergrund die heute verfügbaren technischen Möglichkeiten zur Leistungsbeschreibung, dann führt der Weg zukünftig zu höher entwickelten visuellen Kommunikationsmethoden als Komplementär zu Text und 2D Plänen. Es ist aus heutiger Sicht nicht nachvollziehbar, warum visuelle Methoden bei Ausschreibungen nicht explizit gefordert werden, wenn andererseits dem Bieter aufgebürdet wird, die Ausschreibung verstehen zu müssen. Sowohl die VOB/A als auch das Vergabehandbuch können die verlangten Ansprüche nicht rechtfertigen, wenn nicht im gleichen Zug in diesen Werken verlangt wird, dass die verwendeten Medien dem neuesten Stand der Technik entsprechen. Eine Novellierung dieser Werke hinsichtlich des Umgangs mit modernen Medien ist dringend notwendig.

Auch der Anspruch auf Vollständigkeit setzt zu hohe Ziele, die in der Praxis kaum erreicht werden können. Nach Keil [Keil01, S. 117] ist die Leistungsbeschreibung vollständig, wenn sie *‘alle für die Herstellung des Werks spezifischen Bedingungen und Anforderungen darstellt’*. Dies würde bedeuten, dass der Ausschreibende bei der Ausschreibung jedes kleinste Detail *‘darstellt’*. Es wäre sinnvoller, im Zuge des Ausschreibungsprozesses *‘entschiedene’* Details von den *‘offenen’* Details (*‘weiße Flecken’*) zu trennen, d.h. das Wissen über etwaige verborgene Risiken offen zu legen. Dies würde auch der Forderung genügen, dass die Leistungsbeschreibung dem Bieter keine ungewöhnlichen Risiken aufbürden darf.

Obige Schilderungen werden durch ein Gutachten des Bundesrechnungshofes bestätigt [BaySt04]. Dort wird auf Mängel bei der Ausschreibung von Leistungen der öffentlichen Hand hingewiesen:

- Widersprüche in den Vorbemerkungen und in den Einzelpositionen des LV
- Die Art der Ausführung, die Qualität der Baustoffe und der Beanspruchungsgrad der Leistung sind nicht zweifelsfrei festgelegt
- Die Leistungen sind nicht vollständig beschrieben und die Mengenansätze sind unzutreffend

Die obigen Beschreibungen belegen, dass die Ansprüche der VOB selbst im öffentlichen Bereich nicht erfüllt werden können. Wie die Grafik (Abb. 7) zeigt, stieg die Zahl der Vergabenachprüfungsverfahren in den letzten Jahren bei öffentlichen Vergabeverfahren stark an, welche die Schwellenwerte der EU erreichen oder überschreiten.

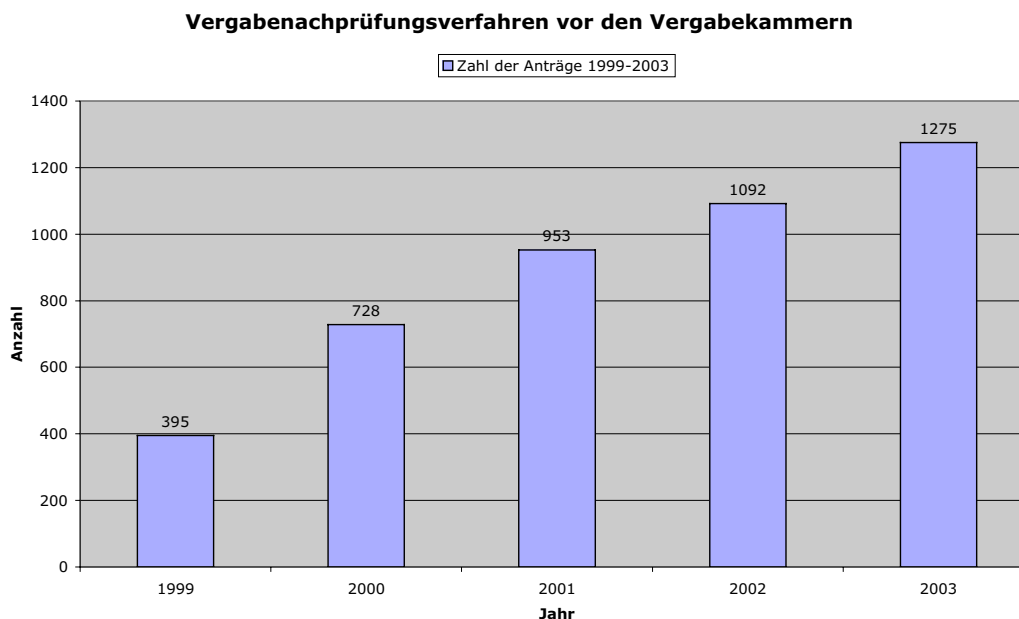


Abb. 7: Zahl der Vergabenachprüfungsverfahren von 1999-2003, [Baublatt05]

Diese können auf Antrag in einem formellen Verfahren vor den Vergabekammern auf ihre Rechtmäßigkeit geprüft werden. Insgesamt wurden zwischen 1999-2003 mehr als 4400 Verfahren beantragt. 44 % wurden zurückgezogen, 15 % waren unzulässig oder wurden zugunsten der AG entschieden und 13 % waren erfolgreich. Dies ist ein Indiz für die steigende Skepsis an der Korrektheit der Verfahren, ist aber sicher auch auf die harte Konkurrenz im betrachteten Zeitraum zurückzuführen.

Drees und Paul [Drees02] nennen im Hinblick auf Vereinheitlichungstendenzen bei Ausschreibungen – sie erwähnen beispielsweise den Standardleistungskatalog für den Straßen- und Brückenbau (StLK) – Unterschiede, die man zwischen verschiedenen Leistungsverzeichnissen immer wieder vorfinden kann (Tab. 6). Es ist ersichtlich, dass die Gliederung von Leistungsverzeichnissen nicht nach eindeutigen Regeln erfolgt. Wie Drees [Drees02, S. 144-149] schildert, kann der unterschiedliche Aufbau des Leistungsverzeichnisses in Bezug auf die Behandlung von Nebenleistungen – als einzelne LV-Positionen oder als Bestandteil der Gemeinkosten – zu teilweise erheblichen Abweichungen von bis zu 25 % bei den Einheitspreisen führen. Aus der Sicht des Bauherrn können strategische Überlegungen dazu führen, dass Nebenleistungen in Positionen gefasst werden oder nicht. Ebenso kann es im Gegenzug für den Bauunternehmer wichtig sein, zu wissen, ob er Leistungen auf der Basis von Aufmaßen geltend machen kann oder ob er sie verdeckt in die Gemeinkosten einzukalkulieren hat.

Es ist zusammenfassend festzustellen, dass die Leistung nicht so eindeutig und erschöpfend beschrieben wird, dass dem Bauunternehmer keine erheblichen Wagnisse bei der Ablaufplanung und Kostenermittlung entstehen. Die Leistungsbeschreibung mit Leistungsverzeichnis birgt Risiken für den Bauunternehmer, da Leistungen und Prozesse mit Text beschrieben sind, aber von unterschiedlichen Beteiligten je nach Kenntnisstand und Erfahrungswerten unterschiedlich interpretiert werden können.

Lohnnebenkosten	sind teilweise getrennt auszuweisen
Stoffkosten	sind teilweise in der zugehörigen Leistung, teilweise in besonderen Teilleistungen als reine Lieferung ausgeschrieben. Manchmal werden wesentliche Stoffe vom Auftraggeber geliefert.
Gerätekosten	sind teilweise zu trennen in Kosten für das Einrichten und Räumen der Baustelle, die über gesonderte Positionen vergütet werden, und in die Vorhalte- und Betriebsstoffkosten der Geräte, die in die Einheitspreise der zugehörigen Teilpositionen einzurechnen sind. Manchmal sind die Kosten für Vorhalten und Betrieb der Geräte in einer gesonderten Position ausgeschrieben. In beiden Fällen ist es von Vorteil, wenn Abschreibung, Verzinsung und Reparatur der Geräte als besondere Kostenart getrennt von den Betriebsstoffkosten und den Lohnkosten des Geräteführers und der Beihilfe aufgeführt werden.
Baustelleneinrichtung	Die Kosten der Baustelleneinrichtung sind in einer ausgeschrieben Position zu kalkulieren oder in den Gemeinkosten der Baustelle zu berücksichtigen, da sie eine Nebenleistung ¹² sind

Tab. 6: Unklare Zuordnung von Kosten in Leistungsverzeichnissen, [Drees02, S. 46]

Weiterhin werden einige Leistungen gar nicht beschrieben, sondern lediglich grob und pauschal geschätzt. Diese Vorgehensweise führt beim Bieter leicht zu Missverständnissen beim Bewerten der beschriebenen Leistung. Der Umgang mit Schätzwerten ist auch Gegenstand der folgenden Betrachtung zu zeitlichen Aspekten.

2.2 Bauteile

Ein wichtiger Aspekt bei der Betrachtung von Kalkulationsmethoden auf der Basis von 3D-Modellen ist die Bauteilorientierung. Das Funktionsprinzip der Bauteilorientierung besteht in der flexiblen Gliederung von Bauteilen eines 3D-Modells. Aus Einzelbauteilen werden hierarchische Gruppen gebildet, die im Gegensatz zu positionsbasierten Betrachtungsweisen die örtliche Lage von Bauteilen im 3D-Modell der Baustelle berücksichtigen. Bauteile können aufgrund ihrer örtlichen Nähe untereinander zu Bauteilgruppen zusammengefasst werden. Um die Bauteilorientierung für die Baukalkulation nutzbar zu machen, muss auch für die Ausschreibung ein bauteilorientierter Ansatz verfolgt werden. Hierzu werden im Folgenden Ansätze aus Forschungsarbeiten vorgestellt.

2.2.1 Bauteile in Ausschreibung und Kalkulation

Gehri [Geh92] und Wiederkehr [Wied96] haben die Problematik der Bauteilorientierung näher untersucht und empfehlen aus baubetrieblicher Sicht die Hinwendung zu modularen Betrachtungsweisen von Gebäuden bei der Ausschreibung und Kalkulation und eine Abkehr von rein nach LV-Positionen gegliederten Leistungsbeschreibungen. Im Unterschied dazu werden bei der Bauteilorientierung die einzelnen Bauteile des Gebäudes in Anlehnung an Technologien aus dem Maschinen- und Anlagenbau (PLM-/PDM-Systeme) über flexible

¹² Nebenleistungen nach DIN 18299, Abschnitt 4.1

Strukturen hierarchisch gliedert. Das Ergebnis einer derartigen Betrachtungsweise eines Bauwerks ist ein Bauteilkatalog (Abb. 8), der alle beschreibenden Parameter der Bauteile enthält und die Grundlage der Kalkulation darstellt. Er bildet die Voraussetzung, um mit virtuellen 3D-Modellen kalkulieren zu können [Barg03, Barg04].

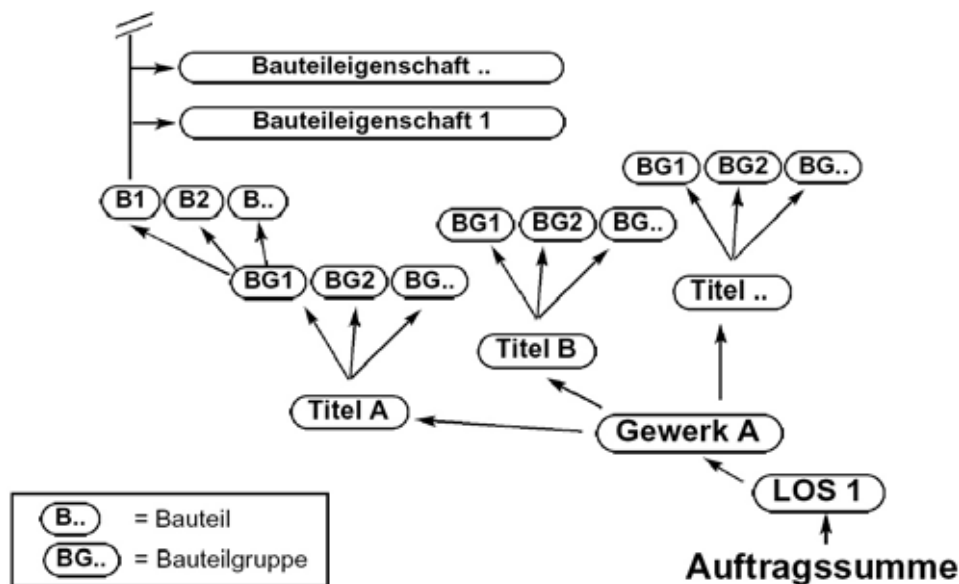


Abb. 8: Struktur eines Bauteilkataloges analog zu PLM/PDM-Systemen, aus [Barg03]

Moderne CAD-Applikationen im Bauwesen¹³ bieten ebenfalls eine solche Sicht auf die Daten, wenn ein 3D-Modell konstruiert wurde. Ein Beitrag zur bauteilorientierten Kostenbetrachtung findet sich bei Henrichsén [Henr03]. Er verweist auf eine am Lund Institute of Technology in Schweden entwickelte Lösung namens SYRE, welche Daten aus einem CAD-System importiert und mit Kosten- und Zeitinformationen versieht. Dadurch werden Kostenkalkulationen ebenso wie Bauzeitberechnungen und erste 4D-Modelle ermöglicht. Die Entwicklung von SYRE begann Anfang der 90er Jahre. Eine Methode für die bauteilorientierte Ausschreibung entwickelte Brumme im Rahmen seiner Diplomarbeit [Brum02]. Zusammen mit der Diplomarbeit von Lorenz [Lor03] bilden diese Konzepte die theoretische Grundlage für die Kalkulation auf der Basis von virtuellen 3D-Modellen.

Gehri [Geh92] entwickelt ein bauteilorientiertes Kontroll- und Steuerungssystem für Baustellen. Das Kernstück des Systems bildet das 'Job-Konzept', welches Arbeitspakete aus Bauteilgruppen bildet. Die Aufteilung der Baustelle in 'Jobs' ermöglicht Gehri eine Brücke zwischen dem bauteilorientierten Produktionsablauf und dem positionsorientierten Leistungsverzeichnis. Die Verknüpfung sieht er wie folgt vor:

Jobs können im Sinne von nicht zu komplexen Bauteilen gebraucht werden (z.B. Ausgang Nord, Annexgebäude XY), sie brauchen aber nicht unbedingt mit physisch abrechenbaren Baukörpern verknüpft zu sein (z.B. Wasserhaltung, Spundwände, Baustellenaufsicht). Alle Jobs werden mit dem Leistungsverzeichniss (LV) derart verknüpft, dass ein gewisser Prozentsatz einer LV-Position mit dem Job verknüpft wird. [Geh92, S. 104]

¹³ vgl. zum Beispiel ArchiFM von Graphisoft

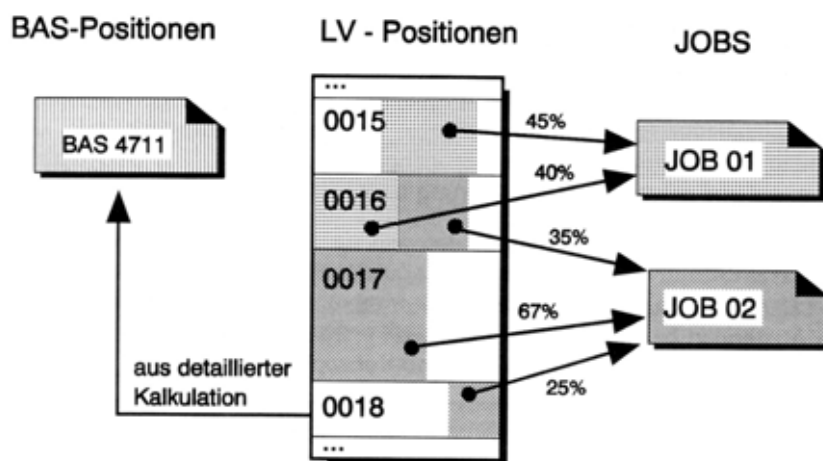


Abb. 9: Verknüpfung von 'Jobs' mit LV-Positionen, [Geh92, S. 105]

Bei der Erstellung von 'Jobs' auf der Grundlage der LV-Positionen werden diejenigen Positionen des Arbeitsverzeichnisses (BAS-Positionen, BAS = Bauarbeitenschlüssel), die zu den entsprechenden Bauteilen gehören, aus der LV-Position übernommen. Gehri ist aus baubetrieblicher Sicht ein Meilenstein, da er die computergestützte bauteilorientierte Angebotskalkulation unabhängig vom Bautyp propagiert. Er bezieht sich wie folgt auf den Zusammenhang zwischen Ausschreibung und Kalkulation:

Zu diskutieren wäre eine Vergabemöglichkeit, die sich zwischen Pauschal- und Einzelpositionsaufträgen finden würde: Der Bauherr würde auf (...) Bauteilebene ausschreiben, der Unternehmer (...) auf Jobebene anbieten. [Geh92 S. 125-126]

Die vollständige Loslösung von Leistungsverzeichnissen vollzieht Wiederkehr [Wied96] aufbauend auf der Arbeit Gehris vier Jahre später mit seinem 'Leistungs- und Verknüpfungsinformationssystem (LEVIS)':

Die Verfahren und Abläufe für Ausschreibung, Kalkulation und Vertragswesen (...) werden auf eine objektorientierte Basis übertragen und (...) vereinfacht. Ausgangs- und Einstiegspunkt der Überlegungen ist stets ein Bauteil, unter anderem für die Preisbildung und die Gliederung der Ausschreibung. [Wied96 S. 168]

Wiederkehr bezieht sich bei seiner objektorientierten Spezifikation des Bauwerkmodells auf standardisierte Leistungsbeschreibungen¹⁴ und Kostenkennwerte¹⁵. Er integriert auch die Normvorschriften in sein Modell. Bezüglich der Kalkulation äußert er sich wie folgt:

Der Unternehmer offeriert im allgemeinen nicht mehr Preise auf der Ebene der Einzelleistungen (...) sondern einen Preis je Bauteil. [Wied96 S. 206]

Dazu fordert Wiederkehr die konsequente Zuordnung von Objekten der Realität zu EDV-Objekten sowohl alphanumerisch als auch grafisch. Er sieht die Kalkulation am 3D-Modell 1996 noch als Zukunftsvision.

¹⁴ Der schweizerische Normpositionen-Katalog (NPK) entspricht dem deutschen StLB-Bau; zur bauteilorientierten Kalkulation siehe auch [Lor03]

¹⁵ Den schweizerischen Baukostenkennwerte-Katalog (BKK) kann man in Deutschland mit dem Bauteile-Paket der Dynamischen BauDaten, dem BKI (Baukosten-Informationsdienst) oder Heinze BauOffice vergleichen

Zusammengefasst legt die Analyse bauteilorientierter Konzepte im Bauwesen offen, dass eine starke Anlehnung an Ideen aus dem Maschinen- und Anlagenbau erkennbar ist. Dort geht man bereits einen Schritt weiter, indem selbst Kommunikationsprozesse von Dokumenten losgekoppelt und an Parameter von Bauteilen angehängt werden [Schmitt02]. Es werden nur Änderungen von einzelnen Parametern am 3D-Modell unter den entsprechenden Beteiligten kommuniziert. Vor dem Hintergrund solcher Entwicklungen wird offensichtlich, dass ein bisheriges Grundprinzip der ingenieurtechnischen Darstellung – der 2D-Plan – immer stärker in Frage gestellt wird, da er bei der Nutzung von 3D-Modellen als Abfallprodukt des Modells zu betrachten ist. Die Notwendigkeit der Änderung bestehender Geschäftsprozesse und deren Anpassung an das Arbeiten mit 3D-Modellen werden auch auf internationaler Ebene gefordert. Wie Olofsson et al. [Olof05] betonen, ist eine Anpassung auch in der Bauindustrie notwendig:

The business processes the construction industry is using today are developed to produce documents and 2D drawings, these procedures also have to change when implementing model-based design methods. [Olof05, S. 689]

Er verweist auf mehrere Projekte der European Information Society Technology (IST) – wie OSMOS¹⁶, eConstruct¹⁷, Divercity¹⁸, eLegal¹⁹ – die alle zum gemeinsamen Ziel haben, neue IT-Werkzeuge und modellbasierte Methoden im Bauwesen einzuführen.

2.2.2 Integrierte Produktmodelle

Bauteilorientierte Methoden bei Ausschreibung und Kalkulation verlangen nach Werkzeugen zur Beschreibung der Bauteile. Analog zu GAEB-basierten Leistungsbeschreibungen sind Spezifikationen notwendig, um 3D-Bauteile zu beschreiben. Die Entwicklung eines 3D-Modells in einem CAD-Werkzeug gründet auf Spezifikationen eines Produktmodells. Im Folgenden werden einige Spezifikationen kurz vorgestellt. Dies ist notwendig, um den Zusammenhang zwischen bestehenden Spezifikationen und den Anforderungen an virtuelle Umgebungen herzustellen. Produktmodellldaten aus CAD-Anwendungen können nicht ohne weiteres in virtuelle Umgebungen integriert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Thematik nicht weiter vertieft. Es wird davon ausgegangen, dass die Bauteile des CAD-Modells zur Verwendung in der virtuellen Umgebung vorliegen.

Spezifikationen im Bauwesen

Die Entwicklung von Standards für den Datenaustausch im Bauwesen hat eine lange Geschichte, deren komplette Aufarbeitung an dieser Stelle nicht notwendig ist. Die Entwicklungen der letzten Jahre brachten neue Standards hervor, die sich in der Praxis behaupten müssen. Der Austausch von Produktdaten erfolgte bisher vorwiegend über 2D-Informationen. Neuere Schnittstellen erlauben eine domänenübergreifende Integration der Daten in einem zentralen 3D-Modell.

Effiziente Schnittstellen können zu großen Zeiteinsparungen führen. Olofsson verweist hier auf einen Bericht [NIST04] aus den USA, nach dem durch unsachgemäße Interoperabilität jährlich rund 15.8 Mrd. Dollar verloren gehen können. König weist in seiner Dissertation

¹⁶ <http://cic.vtt.fi/projects/osmos/main.html> (16.02.06)

¹⁷ http://www.econstruct.org/6-Public/bcXML_CD/index.html (16.02.06)

¹⁸ <http://www.nicve.salford.ac.uk/divercity/> (16.02.06)

¹⁹ <http://cic.vtt.fi/projects/elegal/public.html> (16.02.06)

[König04, S. 3] darauf hin, dass Prozess- und Produktinformationen stark voneinander abhängen. Beide Bereiche verzeichnen bis heute eine rege Entwicklung, die von König unter Angabe von zahlreichen Referenzen dokumentiert wird. Im Bereich der integrierten Produktdatenmodelle für das Bauwesen sind die beiden Initiativen um die Definitionen STEP (Norm ISO 10303 Standard of Exchange of Product Model Data) und IFC (Industry Foundation Classes) vorrangig zu nennen. Zusätzlich wurden in der Vergangenheit mehrere spezielle Schnittstellen entwickelt, die von größeren Konsortien aus der Industrie unterstützt wurden. Als Beispiel mag eine Initiative der Bundesvereinigung Bausoftwarehäuser e.V. gelten, welche die Integration von Statik, Produktionsplanung und CAM für Bewehrungsteile unterstützt. Hier können die Produktionsdaten von Bewehrungsteilen direkt aus der Planungssoftware an eine Maschine gesandt werden, welche diese Teile automatisch herstellt. Dafür wurde eigens eine Schnittstelle spezifiziert [BVBS95].

Es bleibt festzuhalten, dass die Forschung im Bereich der Produktmodelle sehr umfangreich ist. Für vorliegende Arbeit genügt der Verweis auf einige aktuelle Quellen, welche zahlreiche Referenzen zu aktuellen entwicklungsrelevanten Forschungsarbeiten enthalten. Die abzulebende Tendenz führt zur Entwicklung von integrierten Produktmodellen zur zentralen oder verteilten Datenhaltung in Netzwerken und somit zu einer stets verfügbaren Dateninfrastruktur für verschiedene Applikationen. Kritisch bleibt anzumerken, dass Anwender bereits seit langer Zeit nach funktionierenden Schnittstellen verlangen, diese sich jedoch aus marktpolitischen Gründen nur langsam durchzusetzen scheinen, und es bei Initiativen immer wieder zu Gegeninitiativen kommt. Im Rahmen dieser Arbeit ist eine Betrachtung der Schnittstellen notwendig, um den Stand der Forschung bei der Integration virtueller Umgebungen darzulegen.

Standard for the Exchange of Product Model Data (STEP)

Das STEP-Projekt (STEP = Standard for the Exchange of Product Model Data)²⁰ stellt einen Versuch dar, eine allgemeine Schnittstelle für das Bauwesen zu definieren. STEP ist in der Norm ISO 10303 spezifiziert, wo auch die objektorientierte Beschreibungssprache EXPRESS definiert ist. Niestroj analysiert in seiner Dissertation [Nies93] die Schnittstelle zwischen Objektplanung und Tragwerksplanung und entwickelt ein objektorientiertes Schema auf der Basis von STEP-2DBS, einem Subset von STEP für das Bauwesen. Schneider [Schneid00] weist darauf hin, dass zum Mapping der Schnittstellen zwischen domänenspezifischen Partialmodellen eine Person, ein 'Integrator', notwendig werden kann und unterstützt diesen mit einer vorgeschlagenen Integrationssoftware. Auf die Problematik des Mappings weist auch Willenbacher [Will02] hin. Im Januar 2005 haben sich mehrere große und mittelständische Bauunternehmen in einem Memorandum für den Standard auf der Basis von STEP bekannt [STEP05].

Industry Foundation Classes (IFC)

Die Industry Foundation Classes (IFC) bauen auf STEP auf und sind eine Initiative der 'Industrie Allianz für Interoperabilität (IAI) e.V.' oder 'International Alliance for Interoperability (IAI)'. Auch die IFC sind mit EXPRESS beschrieben. Die IFC berücksichtigen in ihrem Klassenmodell spezielle Ebenen für Aspekte der Interoperabilität und der fachlichen Domänen.

²⁰ STEP-2D-Building-Subset ist eine vom Arbeitskreis DIN-NAM 96.4.3-Bau entwickelte Schnittstelle für den Datenaustausch speziell im Bauwesen, siehe auch <http://www.steptools.com> (16.02.06)

Schätzungen ergaben, dass die Mehrarbeiten, die durch Informationsverluste bei der Weitergabe anfallen, bis zu 20 % der Baukosten betragen können [König04, S. 40]. Zur Vertiefung der IFC wird auf König [König04] und Willenbacher [Will02] verwiesen.

Es wurden keine Quellen gefunden, welche eine sukzessive Übernahme von Bauteilinformationen aus einem Produktdatenmodell in eine VR-Umgebung beschreiben. Dass CAD und virtuelle Umgebungen integrierbar sind, zeigen einige Forschungsarbeiten. Ein interessanter Ansatz zur Integration von CAD und VR findet sich bei Maher et al. [Maher03]. Sie schlägt einen agentenbasierten Ansatz vor, um Daten aus CAD in VR zu integrieren. Die Architektur des Systems sieht vor, dass intelligente Agenten den Datenabgleich automatisch durchführen. Zwischen die VR-Umgebung und das CAD-Modell ist eine Datenbank geschaltet, welche die Daten aus dem CAD über IFC einliest. Der Abgleich findet nur zwischen der Datenbank und der VR-Umgebung statt und nicht zwischen der VR-Umgebung und CAD direkt. Ein bidirektionaler Abgleich zwischen CAD und VR ist nicht vorgesehen. Diese Arbeit untermauert die aktuellen Bemühungen um die Integration von VR und CAD über die IFC. Ebenso von Belang ist eine Forschungsarbeit, die CAD mit einer Game Engine integriert [Shira01].

Das Fazit aus den Recherchen zur Integration von bestehenden Produktmodelldaten mit virtuellen Umgebungen hat ergeben, dass die Daten aus bauspezifischen CAD-Anwendungen heute noch manuell importiert werden müssen. Aktuelle Forschungsarbeiten haben die Problematik erkannt und bemühen sich um integrative Ansätze. Im Maschinen- und Anlagenbau hat diese Integration bereits stattgefunden.

2.2.3 Der Raum als Bauteil

Im Bauwesen ist das Produktmodell um den Aspekt der Baustellensituation zu erweitern. Das eigentliche Bauwerk wird als 3D-Modell in eine sich verändernde Baustellenumgebung gesetzt. Beide zusammen bilden in ihrer Gesamtheit das Produktmodell. Man kann daher nicht davon ausgehen, dass alle Bauteile nacheinander 'gebaut' werden. Vielmehr hat man es mit andauernden Veränderungen der räumlichen Situation auf der Baustelle zu tun, z.B. Hilfskonstruktionen kommen temporär hinzu oder Erdmassen werden hin- und her bewegt. Der zur Verfügung stehende dreidimensionale Arbeitsraum auf virtuellen Baustellen sowie dessen Disposition ist in den letzten Jahren unter dem Begriff des 4D-Modeling zum Forschungsgegenstand geworden.

Aktuelle Forschungsarbeiten sehen die Verknüpfung von zeitlichem Ablaufplan und 3D-Modell vor [Chern91, Dhar95]. Als Ergebnis dieser Entwicklungen entstand das 4D-Modeling. 4D-Modelle stellen auf den ersten Blick den Bauablauf als Animation von Bauteilen dar. Eine tiefer gehende Beschäftigung mit 4D-Modellen zeigt, dass die ursprüngliche Absicht der 4D-Modellierung nicht darin bestand, etwas darzustellen. Vielmehr ging es um die Zuordnung von Räumen zu Vorgängen des Prozessmodells. Bei einem Ansatz von Akinici [Akinici97] geht es darum, die Produktivität der Arbeiter auf der Baustelle durch eine optimierte Zuteilung von Arbeitsraum zu steigern und so die Kosten zu senken. Ziel ist es, Überschneidungen bei der Nutzung von Arbeitsräumen auf der virtuellen Baustelle zu vermeiden. Dazu stellen Fischer und Staub [Fisch98] den Ansatz des 'constructability reasoning' vor (Abb. 10).

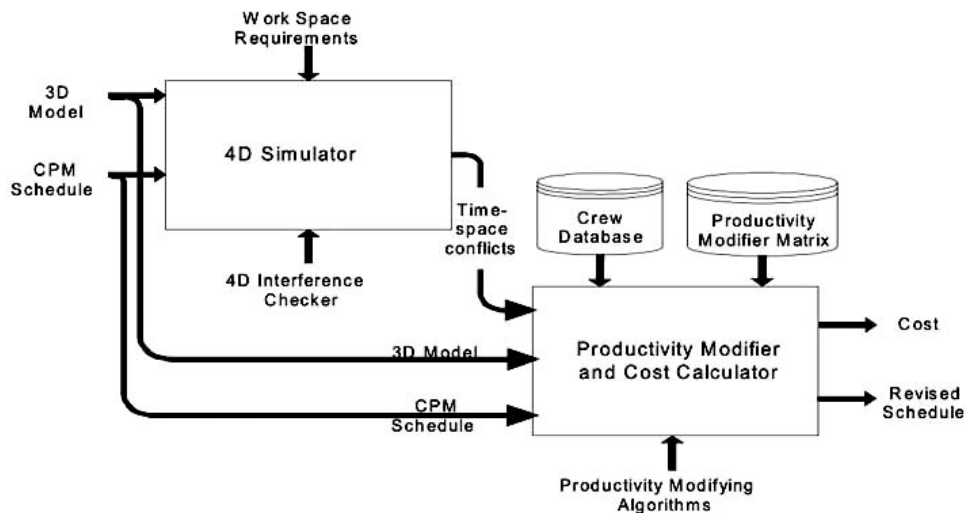


Abb. 10: 4D Analysis of Cost and Productivity, [Fisch98, S. 6]

Die Hauptelemente sind der '4D Simulator' und der 'Productivity Modifier and Cost Calculator'. Zu Beginn werden ein Netzplan und ein 3D-Modell eingegeben und als Ergebnis erhält man einen korrigierten Zeitplan sowie die Kosten. Eventuelle Kollisionen zwischen Vorgängen werden im '4D Simulator' vom '4D Interference Checker' aufgedeckt. Die aufgedeckten Zeit-Raum-Konflikte ('Time-space conflicts') werden durch den 'Productivity Modifier and Cost Calculator' optimiert und es entsteht ein neuer Zeitplan mit neuen Kostenaussagen. Unklar bleibt an dieser Stelle, wie die Algorithmen zur Modifizierung der Produktivität aussehen. Dazu werden keine näheren Angaben gemacht. Aus der Perspektive des Poliers oder Bauleiters ist anzumerken, dass bereits bei der Einteilung der Kolonnen oftmals sehr spontan gehandelt wird. Die in Abb. 10 erwähnte Definition der 'Work Space Requirements' ist für sich sehr komplex und kaum im Voraus zu bestimmen. Die Entwicklungen um 4D-Modeling unterstreichen die Berücksichtigung örtlicher Veränderungen auf Baustellen über die Bauzeit. Der Begriff des Ortes als temporäre Arbeitsstelle erhält dadurch große Bedeutung.

Eine Weiterentwicklung des 4D-Ansatzes im Sinne einer automatisierten Generierung von Arbeitsräumen für Vorgänge stellt Akinci später vor [Akinci02]. Ähnliche Ansätze finden sich bei Winch [Winch03] ebenso wie bei Mallasi und Dawood [Mall04]. Letztere definieren eine Methode zur Berechnung eines Faktors für das Maß von potenziellen Zeit-Raum-Konflikten auf Baustellen, den 'critical space-time analysis value (CSA)'. Sie teilen dazu die Baustelle in Cluster von Vorgängen ein und bestimmen Überschneidungen (Abb. 11).

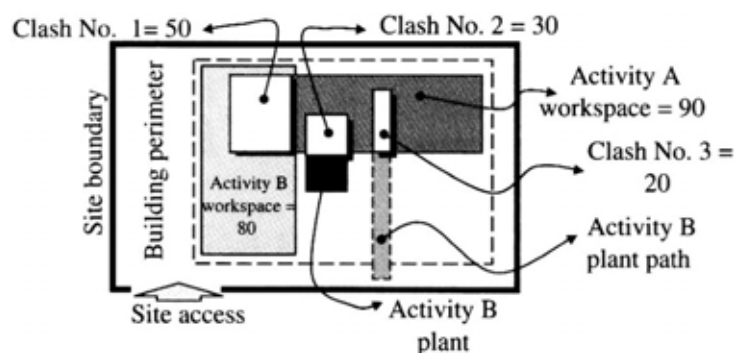


Abb. 11: Allokation und Bewertung von Zeit-Raum-Konflikten, [Mall04, S. 268]

Zur Bestimmung der Dimensionen der Arbeitsräume schlägt Mallasi die manuelle Definition eines Raumes um das Bauteil bzw. die Bauteilgruppe vor. Sind beispielsweise mehrere Kolonnen gleichzeitig in einem engen Raum tätig, wird es ab einer bestimmten Anzahl an Arbeitern zu Behinderungen kommen. Um diese zu identifizieren, wird der Arbeitsraum einer Ressource zusätzlich zur eigenen Geometrie der Ressource 'um diese herum modelliert'. Es entsteht ein Luftraum, der einem virtuellen Bauteil entspricht. Dieser kann auf Kollision mit anderen Lufträumen untersucht werden. Überschneiden sich Lufträume, kann dies dem Anwender kommuniziert werden. Diesen Raum bezeichnet Mallasi als 'Approximation Envelope (AE)' (Abb. 12). Er besteht aus dem 'above space', dem 'below space' und dem 'surrounding space'. Damit kann ein Bauteil nicht nur über seine tatsächlichen geometrischen Maße definiert sein, sondern zusätzliche produktionsrelevante Informationen, z.B. den zur Herstellung notwendigen Arbeitsraum, enthalten.

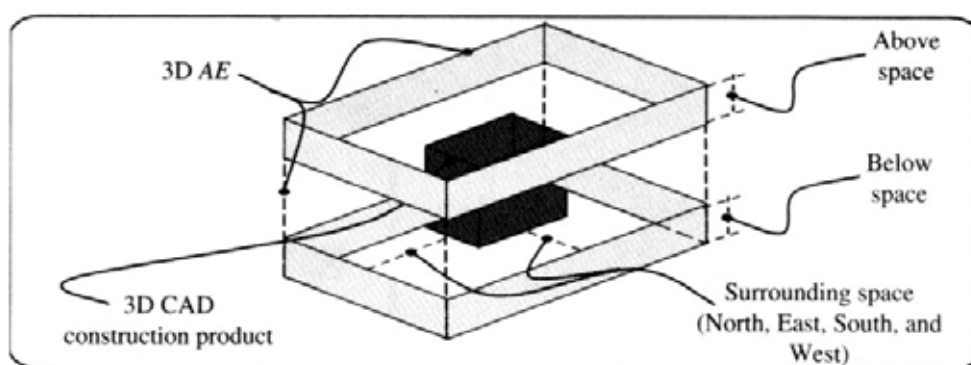


Abb. 12: Die drei Raumdefinitionen um ein virtuelles Bauteil, [Mall04, S. 269]

Die Idee der Vermeidung von sich überschneidenden Arbeitsräumen führt aus baubetrieblicher Sicht zu dem Wunsch nach einer Disposition der Kolonnen auf der virtuellen Baustelle. Diese Disposition soll jedoch im Unterschied zu Fischer, Staub und Akinci nicht an eine Vorgabe (z.B. Prozessmodell) geknüpft sein, sondern vom Anwender interaktiv vorgenommen werden. Ein Fachmann würde angesichts der interaktiven Methode verschiedene Kolonnen auf der virtuellen Baustelle so einsetzen, dass deren Arbeitsprozesse sich untereinander örtlich nicht überlagern. Damit zielt die interaktive Modellierung auch auf die klassische Tätigkeit eines Poliers, der Kolonnen auf der realen Baustelle disponiert. Die Auswirkungen der Entscheidungen des Poliers auf die Effizienz des zeitlichen Bauablaufs sollen durch die interaktive Modellierung simuliert werden. Der Einsatz derartiger Werkzeuge auf der Baustelle ermöglicht auch nicht spezialisiertem Personal den oft geforderten, einfachen und schnellen Einstieg in den Themenkomplex der Simulation.

2.2.4 Virtuelle Baustellen

Bei Bauprojekten wird heute oft eine Trennung von Planung und Ausführung vorgenommen. Eine Datenintegration ist aufgrund von strategischen Interessenslagen nicht immer erwünscht. Nur wenn der Planer auch der Ausführende ist, entsteht Spielraum zur Anwendung durchgängiger Informationslösungen. Vor diesem Hintergrund können die Entwicklungen in der Automobilbranche als Vorbild dienen. Digitale Fabriken stellen Prototypen für integrierte 3D-Modelle dar, da das Bauwerk und die Produktionsanlagen eng miteinander verknüpft sind und in einem Zug in 3D modelliert werden. Sie sind Vorbilder für virtuelle Baustellen und sollen im Folgenden kurz erläutert werden.

Die Baustelle als `Digitale Fabrik`

Der VDI-Fachausschuss `Digitale Fabrik` definiert den Begriff `Digitale Fabrik` wie folgt:

Definition: `Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen - u.a. Simulation und 3-D-/VR-Visualisierung - die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden. Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Prozesse und Ressourcen der Fabrik in Verbindung mit dem Produkt`. [IITB05, S. 37]

Digitale Fabriken umfassen Modelle und Methoden und stellen damit einen Bezug zur interaktiven Prozessmodellierung dar. Sie sind in der Lage, den Entstehungsprozess eines Produktes zu simulieren, ohne dass der Bau von realen Modellen im Vorfeld notwendig wäre. Dazu ist die Integration von Planungsprozessen mit Produktionsprozessen notwendig. Bezüglich integrierter IT-Umgebungen betont Böhnlein unter Verweis auf Graf und Putzlocher [Gra02] die Notwendigkeit der „ganzheitlichen Betrachtung und Koordination der Kernprozesse in den Bereichen Produktentwicklung, Produktentstehung, Kundenauftragsmanagement und Materialbeschaffung.“ Seiner Meinung nach deuten Begriffe wie `Digital Mock-Up` und `Digitale Fabrik` [Bra02] in Richtung der „Integration der Entwicklungssysteme mit Anwendungssystemen im Fertigungsbereich.“ Digitale Fabriken haben demnach das Ziel, möglichst den gesamten Lebenszyklus eines Produktes digital abzubilden. Die Automobil- und Anlagenindustrie ist ein Vorreiter bei der Entwicklung digitaler Fabriken. Li et al. 2003 [Li03] verwenden zur Darstellung von Avataren auf virtuellen Baustellen mit DELMIA ein Werkzeug, welches verbreitete Anwendung in diesen Industrien findet.

Es ist heute Standard, dass die Produktentwicklung in der Automobilindustrie zum Großteil durchgängig digital und mit virtuellen 3D-Modellen erfolgt. Wie eine Studie über PDM/PLM aussagt, ist das Marktvolumen von 571 Mio EUR in 2003 auf 671 Mio. EUR in 2004 und damit um 17,5 % gewachsen [VDINach04]. Dies wird dadurch unterstützt, dass 87 % der Automobilzulieferer sich bei der Wahl des Systems an dem oder den Großkunden orientieren [VDINach04a]²¹. Neben den digitalen Modellen (`Digital Mock-Up` oder DMU) geht man in der Automobilindustrie bereits einen Schritt weiter und zielt darauf, die Gestalt des Produktes mit seinen Funktionen zu verbinden. Riel und Brenner [Riel04] postulieren, dass der virtuelle Produktentstehungsprozess eine Infrastruktur verlangt, „die die Bereiche der Konstruktion, Berechnung und Produktion enger und konsequenter miteinander verbindet.“ Sie zeigen eine Erweiterung des DMU um ein Verhaltens-Mock-Up (`Behavioral Mock-Up` oder BMU), um auch die funktionalen²² Eigenschaften des korrespondierenden physikalischen Mock-Ups (PMU) abzudecken. Damit soll es möglich sein, `über die äußere Form einer Komponente (d.h. des einzelnen Bauteils oder Zusammenbaus) zu allen Modellen zu navigieren, die das Verhalten dieser Komponente nachbilden, und diese dazu zu benutzen, die Funktion einer Komponente (bei Bedarf in Echtzeit) zu simulieren`. Die Autoren weisen darauf hin, dass dieses Konzept völlig generisch ist, obwohl ihr Beitrag die Automobilindustrie fokussiert. Eine Integration des BMU in die verstärkt integrierten CAx, PLM/PDM und ERP Systeme bei den Automobilherstellern ist notwendig. Die Idee, Verhalten an virtuelle Objekte zu binden, ist

²¹ lt. der Studie `Benefits of PLM` des Lehrstuhls für Maschinenbauinformatik (ITM) der Ruhr-Universität Bochum zusammen mit IBM Business Consulting Services, vorgestellt auf der Fachmesse CAT.Pro

²² Siehe auch [König04, S. 7] zu Featureorientierten Produktmodellen

im Rahmen dieser Arbeit wichtig, um die Intelligenz einzelner virtueller Objekte abzubilden. Für den Bauprozess würde dies bedeuten, dass die virtuellen Objekte im Produktmodell des Architekten bereits Verhaltensregeln besitzen. Die Verhaltensregeln zur Produktion (z.B. Qualitätsanforderungen) müssen dann nach Weitergabe des Produktmodells an den ausführenden Bauunternehmer von ihm berücksichtigt werden. Zusätzlich kann er Objekte mit eigenen Verhaltensregeln in die virtuelle Umgebung einsetzen (z.B. Maschinen).

Virtuelle Baustellen

Erste Ansätze zur Nutzung von virtuellen Fabriken im Bauwesen werden bei Olofsson et al. [Olof05] geschildert, die ein aus CAD importiertes 3D-Gebäudemodell in einer VR-Umgebung nutzen, um mit Hilfe eines Avatars den Entwurfsprozess zu überprüfen und dem Bauherrn nahe zu bringen. Es handelt sich um eine industrielle Anlage zur Produktion von Holzpellets in Schweden. Die Anwendung von VR bezieht sich in diesem Fall auf die Visualisierung der Anlage, um Risiken zu minimieren (z.B. durch das Begehen des virtuellen Modells mit dem Avatar) und die Anschaulichkeit für den Bauherrn im Vorfeld von Entscheidungen zu maximieren. Virtuelle Baustellen stellen aus der Sicht des Bauunternehmers ein Medium dar, über welches Risiken analysiert und bewertet werden können. Das Produktmodell dient als Baukasten für die bauteilorientierte Produktion des gesamten Bauwerks.

Obwohl die Entwicklungen zu virtuellen Baustellen nicht so weit fortgeschritten sind wie im Automobil- und Anlagenbau, existieren einige Forschungsarbeiten, welche die Potenziale auch im Bauwesen erahnen lassen. Hinsichtlich der Anwendung von Virtueller Realität im Bauwesen weisen Olofsson et al. [Olof05] darauf hin, dass VR heute vorwiegend zu Visualisierungszwecken [Woks01] eingesetzt wird. Sie kann aber auch als universelles Interface für andere Applikationen dienen [Aouad97, Issa99, Rod05, Poesch04] und die Auswertung des 3D-Modells hinsichtlich Funktion, Kosten und Ästhetik ermöglichen [Issa99a, Barg02, Blick03]. Darüber hinaus meint Woksepp, dass sich VR auch sehr gut für kollaborative Ansätze oder zum besseren Verständnis der Produktionsprozesse eignet [Woks04]. Eine ähnliche Anwendung mit einer Open Source Game Engine für die kollaborative Planung zeigen Shiratuddin und Thabet [Shir03]. Sie nutzen die Möglichkeit der verteilten Erkundung eines 3D-Modells durch verschiedene Parteien (Spieler). Woksepp untermauert seine These mit einer unter Baubeteiligten durchgeführten Umfrage in einem realen Bauprojekt, dem 'Centralhuset' in Göteborg. Bauarbeiter und Bauleiter waren dabei mit 37 % bzw. 13 % am häufigsten vertreten. Dieses Projekt wurde mit ca. 10.000 Objekten aufgebaut. Die aufgewandten Ressourcen belaufen sich auf ein Desktop-VR-System, insgesamt fünf verschiedene 3D-Software-Applikationen und ca. 350 Mannstunden, die ca. 35.000 EUR Kosten verursacht haben. Die wesentlichen Ergebnisse der Umfrage belegen, dass die Verständlichkeit von Details der Bauwerksgeometrie bei VR wesentlich einfacher als bei 2D Plänen ist. Bei der Frage nach Kooperation hat sich bestätigt, dass gerade Probleme außerhalb des eigenen Komplexes mit VR leichter verständlich gemacht werden können. Die meisten Befragten wünschen sich in Zukunft mehr 3D und VR, fordern aber auch Nachweise der Wirtschaftlichkeit über Pilotprojekte und Berechnungen. Woksepp verweist diesbezüglich auf Josephson²³, der die Einsparpotenziale auf 10 % der Gesamtkosten beziffert. Die Kosten des VR-Modells belaufen sich bei dem geschilderten Projekt auf 2 ‰ der Gesamtkosten.

²³ auf Schwedisch

Kamat und Martinez untersuchen das Verhalten von Objekten auf virtuellen Baustellen [Kamat00, Kamat03] und liefern wertvolle Beiträge zum Problem der Detaillierung. Ihr Anliegen ist es, die Bewegung von Objekten – in ihrem Beispiel ein Dozer in einem hügeligen Gelände – möglichst realitätsnah darzustellen. Dazu implementieren sie unterschiedliche Geschwindigkeitsprofile für den Dozer in Abhängigkeit von seiner Position im Gelände. VITASCOPE (Visualization of Simulated Construction Operations) ist in der Lage, Simulationsmodelle in einer virtuellen Umgebung zu visualisieren. Dazu wird zuerst eine Ablauffolge (‘animation trace of events’) aus dem Simulationsmodell generiert. VITASCOPE interpretiert diese Ablauffolge und verbindet sie mit 3D-Objekten, die sich dann automatisch in einer virtuellen Umgebung bewegen. Dazu wurden Befehle (‘statements’) implementiert, z.B. MOVE, ROTATE oder SCALE. Wie Kamat und Martinez [Kamat04] erwähnen, ist hier das Problem der Detaillierung aufgetreten. VITASCOPE arbeitet mit diskreten Simulationsmodellen, welche nur zu bestimmten Zeitpunkten (zu den ‘discrete events’) Kommunikation erlauben. Damit die Befehle zu einem dieser Zeitpunkte an die 3D-Bauteile weitergegeben werden können, muss ein solcher Zeitpunkt existieren. Die Simulationsmodelle sind so angelegt, dass sie die ‘discrete events’ nur bei ‘wichtigen’ Schritten erlauben. Da im 3D-Modell alle Prozesse sichtbar sein sollen, muss also das Simulationsmodell auf einer wesentlich höheren Stufe – den ‘elemental motions’ – angelegt werden:

Simulation models are often created at high levels of abstraction where each building block (i.e. activity) in the model represents a basic construction task (e.g. Load Dirt) and not elemental motions (Swing empty, Lower boom, Scoop dirt, Lift boom etc.). [Kamat04, S. 1231]

Das bedeutet, dass keine lückenlose Animation zustande kommt, wenn nicht genügend ‘events’ existieren. Als Lösung zu diesem Problem schlagen die Autoren die Inverse Kinetik vor, die in der Robotik Anwendung findet²⁴. Das Simulationsmodell bleibt auf einer groben Detailstufe, jedoch werden die Zwischenschritte in 3D automatisch generiert. Dies bedeutet, dass z.B. nur die Stelle angegeben werden muss, an der gebaggert werden soll, die Animation des Auslegers wird automatisch durchgeführt. Die Definition der Stelle erfolgt über die händische Eingabe von Koordinaten. Diese Vorgehensweise ist bei größeren Projekten nicht sinnvoll. Die Arbeit von Kamat und Martinez zeigt, dass Simulationsmodelle auf der Basis einer graphischen 2D-Syntax zu grob für eine Simulation in 3D sind. Daher ist die Kopplung bestehender grafischer Simulationssysteme mit virtuellen Umgebungen problematisch, weil die Detailstufen bei beiden Betrachtungsweisen nicht zusammen passen. Die Abstraktion im 3D-Modell ist zu niedrig und im grafischen 2D-Modell zu hoch. Die Analyse der Arbeit von Kamat und Martinez führte zur Schlussfolgerung, dass eine konsequent auf interaktive 3D-Modelle ausgerichtete Methode neue Erkenntnisse auch im Zusammenhang mit dem Detaillierungsproblem bringen könnte. Der Detaillierungsgrad in VR muss den Anforderungen des jeweiligen Problems angepasst werden [Barg05]. Ein weiteres Problem ist der Umgang mit der Animationszeit bzw. Simulationszeit und der Abspielzeit der Prozesse in 3D. Die von Kamat und Martinez vorgeschlagene Lösung sieht eine Raffung der Abspielzeit (physikalische Echtzeit) vor [Kamat02, S. 240-243]. Dabei werden jedoch nur die Bilder der diskreten Zeitzustände gerendert. Dies widerspricht der Anforderung an eine kontinuierliche Visualisierung der Einzelprozesse. Es ermöglicht andererseits eine starke Raffung der Zeit

²⁴ Die Inverse Kinematik ist seit einigen Jahren fester Bestandteil von High-End Visualisierungs- und Animationswerkzeugen, wie z.B. Maya

und damit die Verkürzung der Abspielzeit. In genanntem Beispiel konnte die simulierte Zeit um den Faktor 6 verkürzt werden.

Erste Anwendungen für virtuelle Baustellen unterstützen Maschinenführer bei ihrer realen Tätigkeit. Cohrs [Cohrs04] berichtet von einem System, welches die Nutzung eines Geländemodells zum Zweck der Navigationsunterstützung des Maschinenführers erlaubt. Er zitiert bei der Beschreibung der Funktionsweise auch die Idee des 'Computerspiels':

Dabei wurden vom Landschaftsarchitekten entworfene digitale 3-D-Geländemodelle in den Bordcomputer des mittels GPS und Bordelektronik 3-D-gesteuerten Tieföffelbaggers eingelesen. Der Fahrer musste dann, wie bei einem PC-Spiel, den Bagger nur noch durch seine „virtuelle 3-D-Realität“ steuern. [Cohrs04, S. 26]

Wenn Objekte auf realen Baustellen mit Ortungssystemen ausgestattet werden, können die Positionsdaten in virtuelle Modelle fließen, die an die globalen Koordinatensysteme angelehnt sind [Barg04d]. Durch diese Kopplung lassen sich Bewegungen von realen Objekten auf einer realen Baustelle automatisch in eine virtuelle Baustellenumgebung übertragen. Diese Anwendung ermöglicht Analysen der Prozesse der realen Objekte über die computerbasierte Auswertung der Bewegungsdaten der Objekte auf der virtuellen Baustelle, ohne dass aufwendige Feldstudien notwendig werden. Ein weiteres Anwendungsszenario in diesem Bereich schildert Wenk [Wenk04] für Walzen im Straßenbau. Meßsysteme erfassen über Sensoren die Verdichtungsdaten des überfahrenen Untergrundes und melden diese an ein 3D-Modell weiter. Durch die Verknüpfung der Verdichtungsdaten mit dem 3D-Modell entsteht ein virtuelles 3D-Verdichtungsprofil des Bodens. Dabei werden die Bewegungsdaten der Walze mitgeschrieben, z.B. die Anzahl der Überfahrten. Auch die Optimierung des Kran-einsatzes kann über virtuelle Baustellen erfolgen [Barg04b].

Computerspiel-Technologien

Echtzeit-Anwendungen werden heute auf professioneller Ebene vor allem für Trainings- und Ausbildungszwecke eingesetzt [Schuma04]. Technologietreiber ist die Computerspiel-Industrie, die in den letzten Jahren die Authentizität von Echtzeit-Anwendungen stark verbessert hat. Im Rahmen dieser Arbeit werden Konzepte und Ideen aus Computerspielen für den Lösungsansatz verwendet. Der Einsatz von Computerspielen im Bauwesen ist nicht neu. Um den Begriff des 'Planspiels' wurden vor allem in der Betriebswirtschaft Simulationen für wirtschaftliche Zusammenhänge entwickelt. Gold und Pray [HAB90] nennen in einem Beitrag verschiedene Spiel-Ansätze vor allem aus dem Bereich des Managements. Sie definieren selbst Empfehlungen für die Modellierung eines Produktionssystems unter Beachtung von Ineffektivitäten, unproduktiver Arbeit und dem Verlust von Rohmaterial. Ein weiterer Beitrag behandelt das Thema 'Supply Chain Management' anhand eines Spiels [BDG02]. Das 'Beer Distribution Game' ist ursprünglich eine Entwicklung der Sloan School of Management am Massachusetts Institute of Technology (MIT). Weitere Forschungsansätze zu Spielen finden sich unter [Gab95, Boers93, Fisch02, Schäf95]. Planspiele berücksichtigen menschliche Verhaltensweisen bei betriebswirtschaftlichen Entscheidungen. Auch im Bauwesen haben Forscher Modelle für Spiele im Bereich des Construction Management vorgeschlagen oder diese Technologien für Visualisierungszwecke genutzt [Au69, Maher03, Shira01, Barg04c]. In dieser Arbeit wurde eine Game Development Engine zur Umsetzung eines Prototyps verwendet. Computerspiel-Technologien werden nur aus der Sicht des Anwenders und nicht auf wissenschaftlicher Ebene betrachtet.

2.3 Ressourcen

Die Disposition der Ressourcen am interaktiven 3D-Modell ist in dieser Arbeit ein wichtiges Element bei der Spezifikation des Bau-Solls. Dies macht insbesondere eine Analyse des Faktors 'Mensch' notwendig. Es stellt sich die Frage, wie Leistungen des Menschen bei der interaktiven Modellierung der Bauproduktion am 3D-Modell behandelt werden sollen. Die Betrachtung von Geräteleistungen²⁵ scheint aufgrund des gut abbildbaren physikalischen Verhaltens von Maschinen einfacher. Im Folgenden wird der Umgang mit Menschen und Maschinen als Ressourcen näher erläutert. Zunächst wird auf einige allgemeine Aspekte von Ressourcen in Simulationsumgebungen eingegangen.

2.3.1 Ressourcen in Simulationsumgebungen

Der Begriff 'Ressource' wird in der Bauprozessforschung nicht einheitlich definiert. Seeling spricht von Betriebsmitteln und zählt in diesem Zusammenhang *'Maschinen, Personal oder Finazmittel (Kosten) usw.'* auf [Seeling72, S. 1897]. Er lässt die Liste bewusst offen. In seinem Beitrag behandelt er Reihenfolgeprobleme in Netzplänen. Er verweist auf einige Voraussetzungen und Vereinfachungen, die er bei der Klassifikation der Problemstellungen vorgenommen hat, z.B. ein konstanter und über die Vorgangsdauer kontinuierlicher Betriebsmitteleinsatz oder veränderbare Vorgangsdauern durch Unterbrechungen bzw. veränderten Betriebsmitteleinsatz. Für letzteren Fall geht er auf die Behandlung von Ressourcen (1, 2 oder 3 Bagger) bei vier Varianten eines Netzplans ein [Seeling72, S. 1898]. Den Zweck seines Ansatzes sieht er nicht in der Optimierung des Betriebsmitteleinsatzes (Optimale Auslastung der Betriebsmittel), sondern in der Bauzeitverkürzung (Bestimmung des kürzesten Weges). Der technologisch kürzeste Weg ist aus baubetrieblicher Sicht nicht immer der wirtschaftlichste. Die im Netzplan abgebildeten Abhängigkeiten sind zu simpel, um alle Faktoren bei der Entscheidung über den einzuschlagenden Weg zu berücksichtigen. Dennoch stellt es einen erheblichen Mehrwert für den Entscheider dar, wenn er sieht, dass einer der vier Netzpläne unter Berücksichtigung der Randbedingungen der günstigste ist.

Martinez [Mart96a, S. 19] definiert im Vergleich zu Seeling eine höhere Zahl an Ressourcen. Er nennt konkret Maschinen, Raum, Material, Arbeit und Genehmigungen und lässt ebenso wie Seeling weitere Möglichkeiten offen. Das an erster Stelle genannte Ziel bei Martinez besteht darin, die Vielfalt der Ressourcen mit ihren spezifischen Eigenschaften abzubilden. Weiterhin möchte er die Methode zur Auswahl von Ressourcen für einen bestimmten Prozess möglichst realitätsnah an die Vorgehensweise auf Baustellen anlehnen [Mart96a, S. 15]. Er weist in seiner Arbeit auf die Problematik der Abgrenzung hin. Er unterscheidet zwischen 'discrete resources' (in sich abgeschlossene Bauteile, z.B. Fertigteile) und 'bulk resources' (Massengüter, z.B. Kies) [Mart96a, S. 19-20]. Martinez erweitert mit seinem grafischen 2D-Simulationssystem 'Stroboscope' die Reihe der diskreten Simulationswerkzeuge um eine Lösung, welche Belange von Ressourcen sehr genau abbildet. Erst in neueren Arbeiten integrieren Martinez und Kamat Technologien wie Virtuelle Realität [Kamat04].

2.3.2 Menschen auf virtuellen Baustellen

Zur Ermittlung von Lohnkosten werden heute Aufwandswerte (z.B. h/m^2) verwendet, die den zeitlichen Aufwand für eine Mengeneinheit einer bestimmten Leistungsmenge definieren. Für

²⁵ Bei Richtwerten für Geräteleistungen spricht man von Leistungswerten, bei Richtwerten für menschenbezogene Leistungen von Aufwandswerten

Leistungen existieren vordefinierte Aufwandswerte in der Literatur, z.B. die Arbeitszeit-Richtwerte [ARH05]. Bauunternehmen führen in der Regel eigene Listen mit firmeneigenen Richtwerten für die Kalkulation. Die Bemessung der Aufwandswerte erfolgt nach Methoden der Arbeitswissenschaft.

Verwendung von Aufwandswerten beim Menschen

Die VDI-Richtlinie 3633 definiert für Personal verschiedene Zeitarten in Anlehnung an die REFA-Lehre (Abb. 13). Der Begriff 'REFA' leitet sich von einer 1924 in Berlin als „Reichsausschuss für Arbeitszeitermittlung“ gegründeten Institution ab. In vorliegender Arbeit werden in Anlehnung an diese Zeitarten Vereinfachungen vorgenommen. Die Berücksichtigung von störungsbedingten oder persönlich bedingten Unterbrechungen oder des Erholens macht aufgrund des stochastischen Vorkommens bei einer interaktiven Modellierung wenig Sinn. Diese Faktoren können in einer externen Datenbank eingerechnet werden.

Haupttätigkeit	$\sum t_{MH}$	t_t Tätigkeitszeit	t_g Grundzeit	t_e Zeit je Einheit	$t_a = m * t_e$ Ausführungszeit	$T = t_r + t_a$ Auftragszeit
Nebentätigkeit	$\sum t_{MN}$					
Ablaufbedingtes Unterbrechen der Tätigkeit	$\sum t_{MA}$	t_w Wartezeit				
Zusätzliche Tätigkeit	$\sum t_{MZ}$	t_s sachliche Verteilzeit	$t_v = t_g * \frac{z_v}{100\%}$			
Störungsbedingtes Unterbrechen der Tätigkeit	$\sum t_{MS}$		t_v Verteilzeitprozentatz			
Persönlich Bedingtes Unterbrechen der Tätigkeit	$\sum t_{MP}$	t_p persönliche Verteilzeit				
Erholen	$\sum t_{ME}$	$t_{er} = t_g * \frac{z_{er}}{100\%}$ z_{er} Erholungszuschlag				
				*		
				m Auftragsmenge		
				t_r Rüstzeit (Gliederung analog zur Zeit je Einheit)		

Abb. 13: Gliederung menschbezogener Zeitarten, in Anl. an [VDI3633, Blatt 6, Punkt 5.1]

Die heute üblichen Methoden zur Ermittlung von Aufwandswerten machen Feldstudien am realen Objekt erforderlich. Bei Multimoment-Aufnahmen werden die Ablaufarten klassifiziert und deren Häufigkeiten ermittelt. Im Gegensatz zu individuell ermittelten Prozessdauern sind die so ermittelten Aufwandswerte stets abstrahierte Werte für eine bestimmte Leistung, wie sie beispielsweise in der Position eines Leistungsverzeichnisses beschrieben ist. Die REFA-Lehre definiert Arbeitssysteme auf Mikro- und Makroebene [REFA91, S. 43] und dringt dabei je nach Branche auf sehr hohe Detailstufen vor. Ein Vorgangselement ist beispielsweise de-

finiert als *‘der Abschnitt eines Arbeitsablaufs, der weder in seiner Beschreibung noch in seiner zeitlichen Erfassung weiter unterteilt werden kann’*. Die Dauern von atomaren Vorgangselementen können zwischen 0,001 bis 0,01 Minuten liegen.

In Tab. 7 sind verschiedene Zeitarten mit den dazugehörigen Tätigkeiten und den Aufwandswerten pro Mengeneinheit aufgeführt. Es handelt sich bei diesem Beispiel um den Aufwandswert zur Herstellung eines Quadratmeters einer Großflächenschalung (GFS).

Ablauf-/Zeitart	Tätigkeit	Ansatz	Std/m ²
Haupttätigkeit	Umsetzen und Reinigen der GFS-Elemente		0,20
Nebentätigkeit	Setzen von Aussparungen, Abschaltungen usw.		<u>0,05</u>
Tätigkeitszeit	(nach Einarbeitung)		0,25
Wartezeit	Warten auf Turmdrehkran	4 % von 0,25 =	0,01
Verteilzeit	störungs- und persönlich bedingte Unterbrechungen	20 % von 0,25 =	0,05
Erholungszeit		10 % von 0,25 =	<u>0,025</u>
			0,335
	mittlerer Einarbeitungszuschlag bei 15 Einsätzen	10 % von 0,335 =	<u>0,035</u>
	Zeit für „Umsetzen“		0,37
Rüstzeit	Montage und Demontage der Elemente		
	0,75 Std., verteilt auf 15 Einsätze =		<u>0,05</u>
Istzeit			0,42
	erwarteter Mehrlohn	ca. 20 % von 0,42 =	<u>0,08</u>
Sollzeit			0,50

Tab. 7: Aufbau eines Vorgabewertes für eine Großflächenschalung, [Fleisch04, S. 43]

Die Detailstufe der Vorgangselemente ist für die Spezifikation des Bau-Solls nicht zweckmäßig. Nach REFA wird die Arbeitsstelle als kleinste organisatorische Einheit definiert, der eine oder mehrere Teilaufgaben zugeordnet sind. Auf Baustellen sind das mehrere, da sich der Arbeitsplatz der Arbeiter mit dem Baufortschritt verändert. Von dieser Detailstufe wird im Rahmen dieser Arbeit ausgegangen.

Im Zusammenhang mit dieser Arbeit finden Aufwandswerte bei der Bestimmung der Dauern einzelner Prozesse auf hoher Detailstufe Anwendung. Bisher wurden Aufwandswerte für eine Mengeneinheit einer Leistungsmenge definiert, um die Dauer des Prozesses für die gesamte Leistungsmenge zu bestimmen. In dieser Arbeit findet der Wechsel zu einer höheren Detailstufe bei der Definition von Aufwandswerten statt. Wurde bisher beispielsweise eine Mauerwerkswand *‘bis 3 m Höhe’* ausgeschrieben, fand der entsprechende Aufwandswert pro Mengeneinheit in Abhängigkeit von weiteren Parametern (z.B. Steinformat, Mörtelgruppe) Anwendung. Damit wurde eine Wand von 1,5 m Höhe ohne Gerüst vom Aufwand her genauso bewertet wie eine Wand mit 3 m Höhe mit Gerüst. Bei der interaktiven Modellie-

runge werden Aufwandswerte für Einzelprozesse auf höherer Detailstufe verwendet, z.B. Setzen und Ausrichten eines Steins im Mörtelbett oder Aufstellen eines Gerüsts. Die Gesamtprozessdauer für eine Mengeneinheit ergibt sich aus der Summe der Dauern der Einzelprozesse unter Berücksichtigung von zurückzulegenden Wegen am Arbeitsplatz. Der Unterschied besteht damit in der Berücksichtigung von örtlichen Arbeitsbedingungen bei der Bestimmung der Prozessdauern. Der Anwender hat die Möglichkeit, die Bedingungen zu verbessern, indem er durch interaktive Eingriffe (z.B. das Bewegen von Ausrüstungsgegenständen) für kurze Wege am virtuellen Arbeitsplatz sorgt.

Umgang mit Personal im interaktiven Produktionsmodell

Bezüglich des Umgangs mit Personal verweist Zülch in einem Beitrag zur Menschmodellierung [Zülch04] auf die VDI-Richtlinie 3633, Blatt 6 zur Abbildung von Menschen in Simulationsmodellen aus dem Jahre 2001 [VDI3633]. Die Ansätze in vorliegender Arbeit gründen nach Abb. 14 auf 'personalorientierten Simulatoren', da insbesondere der Aspekt der Zuordnung von Personal zu Arbeitsvorgängen eine wichtige Rolle spielt.

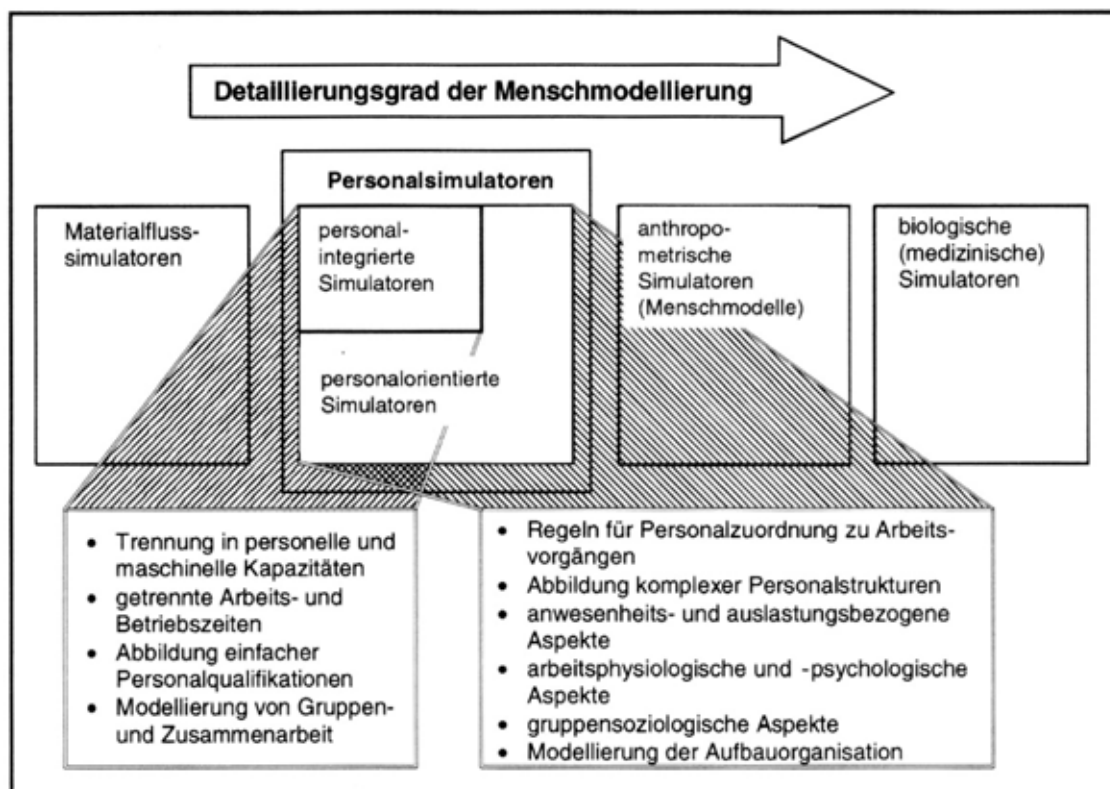


Abb. 14: Personal in der Simulation, nach [VDI3633, Blatt 6, S. 2]; aus [Zülch04, S. 4]

Wie Abb. 14 zeigt, hat der VDI Voraussetzungen für die Modellierung von Menschen in Simulationsumgebungen geschaffen. Alle Eigenschaften sowohl der personalintegrierten als auch der personalorientierten Simulatoren sind aus baubetrieblicher Sicht von Interesse. Die Abbildung einfacher Personalqualifikationen bis hin zu komplexen Personalstrukturen ist möglich. Zülch geht in seinem Beitrag jedoch noch weiter und greift aktuelle Entwicklungen im Bereich der Virtuellen Realität auf, die auf den Themenkomplex 'Virtuelle Fabrik' zurückgehen. Er führt wie folgt aus:

Die Leistungsfähigkeit moderner Rechnersysteme erlaubt es heute bereits, in Planung befindliche Arbeitssysteme nicht nur rechnerintern zu modellieren und zu simulieren, sondern die Ergebnisse auch in einer virtuellen Welt zu visualisieren. Die Möglichkeiten reichen dabei von einer dreidimensionalen Ansicht über das visuelle Eindringen in ein realitätsnahes Rechnermodell bis hin zur Animation der darin befindlichen Objekte, also z.B. der Maschinen, Fördermittel und Arbeitsgegenstände. Gleichfalls lassen sich auch Menschmodelle in virtuellen Produktionssystemen bewegen (...). [Zülch04, S. 4]

Er weist weiter darauf hin, dass diese Entwicklungen von einem Beitrag der REFA-Zeitwirtschaft profitieren können:

Diese neuen Planungsmethoden lassen sich in der betrieblichen Praxis nur dann nutzbringend anwenden, wenn nicht nur die darin enthaltenen Arbeitsprozesse und Produktionsressourcen in einem geeigneten Detaillierungsgrad modellierbar sind. Für deren zeitdiskrete Simulation und gegebenenfalls zur zeitsynchronen Animation der Arbeitsvorgänge ist eine geeignete zeitwirtschaftliche Datenbasis erforderlich. Nur wenn diese Datenbasis und das Modell der interagierenden Objekte in einer ausreichenden Näherung der Realität entspricht, (...) können die aus den Simulationsuntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse zielführend (...) genutzt werden. [Zülch04, S. 4]

Die Tatsache, dass Zülch bei seinen Ausführungen die 'Digitale Fabrik' als Referenzobjekt sieht, schafft eine Verbindung zur Bauproduktion. Die Begriffe 'zeitdiskrete Simulation' und 'zeitsynchrone Animation' unterstreichen die Idee der Integration von zeitwirtschaftlichen Daten in Simulationsumgebungen und zur Animation der Abläufe. Eine wichtige Aussage trifft Zülch mit der Forderung nach einer ausreichend realitätsnahen Abbildung des Interaktionsmodells der Objekte in der virtuellen Umgebung.

2.3.3 Maschinen auf virtuellen Baustellen

Während die Dauern menschbezogener Prozesse mit Aufwandswerten bestimmt werden, greift man bei Maschinen auf den Begriff des Leistungswerts (z.B. m^3/h) zurück. Die Gliederung der Zeitarten bei Maschinen unterscheidet sich von den menschbezogenen Zeitarten (Abb. 15). Der wichtigste Unterschied besteht in der gesonderten Ausweisung von Erholzeiten beim Menschen.

Die Bestimmung von Leistungswerten bei Baumaschinen ist entweder durch mechanische Zwänge vorgegeben (z.B. max. Hublast beim Kran) oder erfolgt empirisch über Feldstudien. Leistungswerte und andere Parameter, die auf das physikalische Verhalten von Baumaschinen Einfluss nehmen, können vordefiniert werden. Martinez hat für das Beispiel eines Scrapers eine solche Parametrisierung auf hoher Detailstufe vorgenommen [Mart96a, S. 185]. Er berücksichtigt hier u.a. Rollwiderstand und Geländeneigung. Das physikalische Verhalten eines Baggers kann über Verhaltensalgorithmen in einer Computerspiel-Entwicklungsumgebung teilweise abgebildet werden. Es besteht jedoch die Gefahr, dass man sich bei der physikalischen Analyse in Details verliert. Als Beispiel für die Problematik der Detaillierung steht eine Arbeit von Perdomo [Perd01], in der Leistungsdaten eines Baggers untersucht werden. In Abhängigkeit von der Übersetzung werden unterschiedliche Lastkurven erreicht. Die Detailstufe entspricht Arbeiten, wie sie aus dem Maschinenbau bekannt sind. Zur Vertiefung sei auf Arbeiten an der TU Dresden verwiesen, welche sich mit interaktiven Simulatoren für Baumaschinen beschäftigen [Kunze02]. Im Rahmen dieser Arbeit werden Bewegun-

gen von Ressourcen nicht so genau dargestellt, dass Verzögerung, Beschleunigung, Steigung oder Gefälle realitätsgetreu simuliert werden. Es findet eine Vereinfachung dahingehend statt, dass stets von fahrbaren Bedingungen ausgegangen wird.

Hauptnutzung	$\sum t_{BH}$	t_h Haupt- nutzungs- zeit	t_{gB} Betriebs- mittel- Grundzeit	t_{eB} Betriebs- mittelzeit je Einheit	$t_{aB} =$ $m * t_{eB}$ Betriebs- mittel- Ausfüh- rungszeit	$T_{bB} =$ $t_{rB} + t_{aB}$ Bele- gungs- zeit
Nebennutzung	$\sum t_{BN}$	t_n Neben- nutzungs- zeit				
Ablaufbedingtes Un- terbrechen der Nut- zung	$\sum t_{BA}$	t_b Brachzeit				
Erholungsbedingtes Unterbrechen der Nutzung	$\sum t_{BE}$					
Zusätzliche Nutzung	$\sum t_{BZ}$	$t_{vB} = \frac{z_v}{100\%} (t_{gB} - \sum t_{BE})$		*		
Störungsbedingtes Unterbrechen der Nutzung	$\sum t_{BS}$	Betriebsmittel- Verteilzeit				
Persönlich bedingtes Unterbrechen der Nutzung	$\sum t_{BP}$	z_v Verteilzeit- prozentsatz				
m Auftragsmenge						
t_{rB} Betriebsmittel-Rüstzeit (Gliederung analog zur Be- triebsmittelzeit je Einheit)						

Abb. 15: Gliederung betriebsmittelbezogener Zeitarten, nach [VDI3633, Blatt 6, Punkt 5.1]

2.4 Prozesse

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein interaktiver Ansatz zur Modellierung der Prozesse verfolgt. Das Prozessmodell des gesamten Bauproduktionsprozesses wird nicht komplett vordefiniert, sondern entsteht schrittweise während eines interaktiven Simulationsprozesses zwischen dem Anwender und der virtuellen Baustellenumgebung. Dabei werden Entscheidungen des Menschen mit automatisch getroffenen Entscheidungen kombiniert. Im Folgenden werden Forschungsarbeiten zur Simulation und Prozessmodellierung umrissen. Dabei wird in zwei Methodenkomplexe unterschieden, die zum einen auf 2D und zum anderen auf 3D aufbauen. Am Anfang steht eine Einführung in die Grundlagen der Simulation.

2.4.1 Grundlagen der Simulation

Einen allgemeinen Überblick zum Thema Simulation gibt Böhnlein [Böh04]. Er nennt verschiedene Simulationskonzepte und deren Anwendungsbereiche und diskutiert abschließend Aspekte der Modellierung und Simulation in integrierten IT-Umgebungen. Anhand seines Beitrags wird die Bauprozessmodellierung als technologisch ausgerichtete Simulation in bestehende allgemein gehaltene betriebswirtschaftliche Simulationskonzepte eingeordnet. Er definiert Simulation wie folgt:

„Simulation ist das systematische Durchspielen des Verhaltens von geplanten, sich in der Entwicklung befindlichen oder (...) existierenden Systemen.“ [Böh04, S. 1]

Der Begriff des Systems wird näher erläutert. Unter Verweis auf Bossel [Bos92] empfiehlt er eine Systemanalyse zur Schaffung einer besseren Entscheidungsgrundlage für Eingriffe in ein gegebenes System. Voraussetzung hierfür sei *„eine genaue Beschreibung des Systems und der darin ablaufenden Prozesse.“* Böhnlein zeigt eine Grafik nach Law und Kelton [Law00], in welcher nach einer Unterteilung des 'Systembegriffs' in 'Experiment am realen System' und 'Experiment am Systemmodell' das letztere lediglich in zwei weitere Klassen unterteilt wird: das 'Physische Modell' und das 'Mathematische Modell' (Abb. 16). Auf dieser Ebene wird eine Erweiterung der Unterteilung um den Begriff des 'Interaktiven 3D-Modells' vorgenommen. Dieses ist hier als Symbiose aus den beiden anderen Begriffen zu verstehen, da interaktive 3D-Modelle Eigenschaften von realen, physischen Systemmodellen haben können (z.B. Interaktion, Walkthru). Gleichzeitig wird das Verhalten der Objekte jedoch mit mathematischen Methoden (Algorithmen) berechnet.

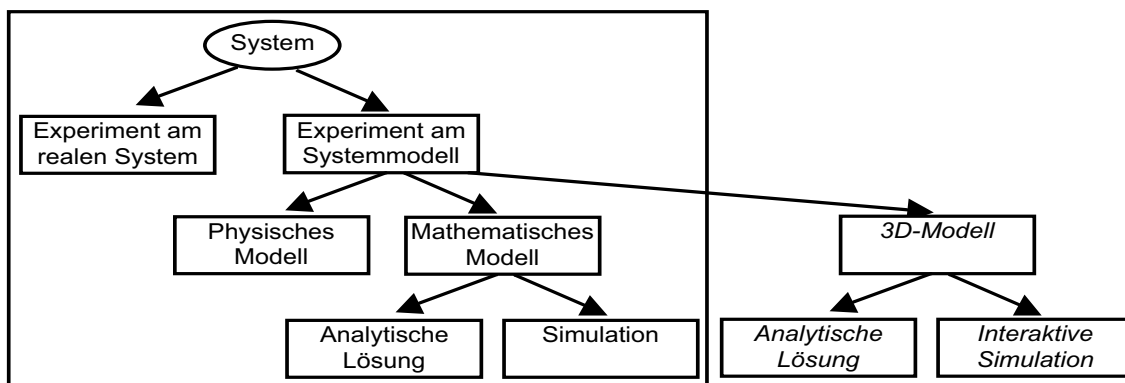


Abb. 16: Erweiterung der Experimentiermöglichkeiten, in Anlehnung an [Böh04, S. 2]

Böhnlein führt weiter aus, dass das Systemmodell die Grundlage für eine Simulation bildet. Das Systemmodell soll die *„Struktur und das Verhalten des realen Systems im Modell so exakt wie möglich“* abbilden und nachvollziehbar machen. Der Unterschied zwischen Systemmodell und Simulationsmodell besteht darin, dass letzteres *„formalisiert und durch spezielle Simulationssoftware ausgeführt“* wird. Insbesondere der Begriff der 'Formalisierung' ist aus baubetrieblicher Sicht näher zu betrachten. Um das Simulationsmodell rechnergestützt abbilden zu können, bedarf es einer Formalisierung durch Algorithmen. Diese Formalisierung führt jedoch zu einer Einschränkung der Flexibilität beim Treffen von Entscheidungen im Simulationsmodell, da nicht alle Entscheidungsvarianten bei der Formalisierung betrachtet werden können. Da bauproduktionstechnische Entscheidungen oft situationsabhängig, spontan und unscharf sind, eignen sich autonom ablaufende Simulationen nicht uneinge-

schränkt für bauproduktionstechnische Prozesssimulationen. Sie können angewendet werden, wenn Teilbereiche von Problemkomplexen zu simulieren sind, deren Prozesslogik sich formalisieren lässt. Auf einer hohen Detailstufe (z.B. Bewegungsprozesse von Maschinen) lassen sich Logiken wesentlich leichter definieren als auf einer groben (z.B. Folge der Prozesse im Arbeitsverzeichnis).

Simulationsmodelle lassen sich in statische und dynamische Modelle untergliedern. Statische Modelle bilden ein System und dessen Eigenschaften unveränderlich ab. Aufgrund der damit einhergehenden Inflexibilität finden diese Modelle in der baubetrieblichen Prozessforschung kaum Anwendung. Eine Möglichkeit der Klassifikation von Simulationsansätzen ist in Abb. 17 dargestellt. Demnach sind im *deterministischen* Modell alle Größen, die in das Simulationsmodell eingehen, vorgegeben. Dies resultiert darin, dass das Ergebnis eindeutig bestimmbar ist und keine Unsicherheit herrscht. Bei der *stochastischen* Simulation gehen auch zufallsabhängige Größen in das Modell ein. Die stochastische Simulation gilt als realitätsnah, da sie von Unsicherheit geprägt ist [Bauch94, S. 4]. Im Fall von diskontinuierlichen Zustandsübergängen (sprunghafte Änderungen der Parameterwerte zu bestimmten Zeitpunkten, z.B. in der Lagerhaltung) spricht man von *diskreter* Simulation. Die *kontinuierliche* Simulation ist geprägt von sich stetig ändernden Werten (z.B. Temperaturanstiege). Die *dynamische* kann im Gegensatz zur *statischen* Simulation Zustandsänderungen innerhalb bestimmter Zeiträume abbilden.

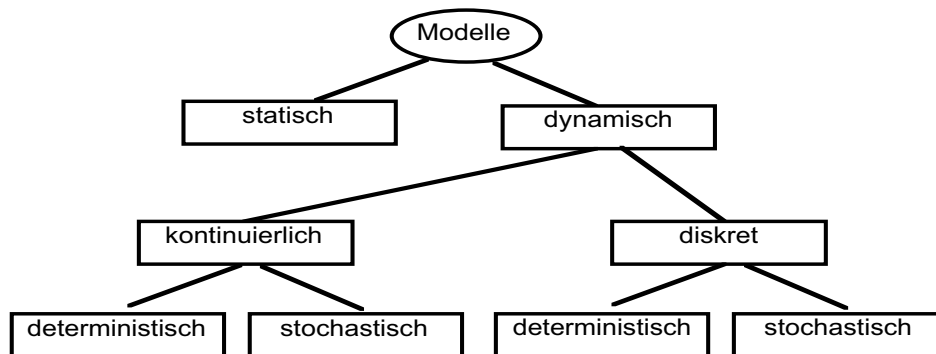


Abb. 17: Klassifikation der Simulationsmodelle, aus: [Böh04, S. 5]

Bei der Identifikation verschiedener Simulationsansätze nennt Böhnlein in Anlehnung an Law und Kelton [Law00] Simulationssprachen und Simulatoren und erweitert diese beiden Ansätze um die Modellsprache der Petri-Netze. Simulationssprachen (z.B. niedrig: Simula, SimScript; höhere: GPSS, SIMAN, SLAM II; systemorientierte: SIMFACTORY, ILMAOS) erlauben über vordefinierte Bausteine auch ohne Programmierkenntnisse eine schnelle und effiziente Entwicklung von Simulationen. Simulatoren bieten zusätzlich eine grafische Oberfläche mit intelligenter Benutzerführung (z.B. eM-Plant von Tecnomatix). In den letzten Jahren haben sich interessante Erweiterungen in diesen Bereichen vollzogen, die zur Kombination von Simulatoren und interaktiven virtuellen Umgebungen geführt haben. Das Ergebnis sind Entwicklungsumgebungen für Simulationen, die ihre Prozesse innerhalb von virtuellen Welten unter Einbezug des Anwenders visualisieren können. Diese neuen Werkzeuge werden unter anderem für Schulungszwecke, Präsentationen und vor allem in der Computerspiel-Entwicklung verwendet, wo der Anteil der Interaktion zwischen Anwender und System sehr hoch ist. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass im Zuge der Diskussion des Begriffs 'Simulation' sehr oft der Ausdruck 'Durchspielen' fällt, so auch bei Böhnlein. Unter

Verweis auf Oberweis [Obe99] zählt er mehrere Simulationszwecke auf, darunter auch das „Durchspielen des Verhaltens real existierender Systeme.“ Er weist darauf hin, dass hier die Animation zur Veranschaulichung des Systemverhaltens im Vordergrund steht. Weitere Zwecke steigern die Anforderungen an die Simulationsmethoden. So kann mit Simulation eine Systemstruktur visualisiert werden, die eine gezielte Kommunikation über geplante bzw. existierende Prozesse ermöglicht. Weiterhin kann validiert werden, ob sich ein System wie geplant verhält. Eine nächste Komplexitätsstufe wird erreicht, wenn das Systemverhalten antizipiert werden soll. Schließlich kann die Reaktion eines Systems auf externe Einflüsse oder Änderungen untersucht werden. Im Bereich des Business-Process-Reengineering (BPR) werden im Rahmen von Geschäftsprozess-Analysen Prozesse in VR untersucht. Hier sind insbesondere Arbeiten von Leinenbach und Scheer zu erwähnen, die ein 2D-Prozessmodellierungswerkzeug mit einer VR-Umgebung verknüpfen. Sie weisen darauf hin, dass es nicht ausreichend ist, die Prozesse zu visualisieren, und fordern die aktive Ausführung von Prozessen in VR [Lein96, S. 76]. Zur Vertiefung der Simulation wird auf weitere Literatur verwiesen [Hohm03].

Im Bauwesen sind erste Ansätze zur Anwendung von Simulationstechniken bei Teicholz im Jahr 1963 zu finden [Teicho63]. Er simuliert die Auswahl der technischen Ausstattung für Bauprojekte. Im Jahr 1972 greift Gehbauer [Gehb72] mathematische Lösungsalgorithmen aus dem Bereich des Operations Research auf und untersucht deren Einsatz für Transportfolgeprobleme im Erdbau. Ein Beispiel für die Anwendung stochastischer Methoden für Erdbauprozesse bei der Simulation veröffentlicht Gehbauer wenig später [Gehb74]. Weitere Arbeiten zur Anwendung von Methoden des Operations Research auf baubetriebliche Problemstellungen finden sich bei Seeling, der Reihenfolgeprobleme in Netzplänen untersucht [Seeling72] und einen umfassenden Überblick über mathematische Verfahren in der Prozessforschung gibt [Seeling78]. In letzterem Beitrag klassifiziert Seeling die Methoden grob in Lineare Planungsrechnung²⁶, Dynamische Planungsrechnung, Warteschlangentheorie, Simulation und Heuristische Verfahren [Seeling78, S. 10]. Seeling sieht insbesondere in der Simulation und Heuristischen Verfahren das größte Potenzial. Exakte Verfahren, wie die Vollenumeration, sieht er aufgrund des hohen Rechenaufwands kritisch. Eine jüngere Arbeit zur Anwendung mathematischer Methoden findet sich bei Schopbach [Schopb02]. Er gibt einen umfassenden Überblick über die Lösungsverfahren des Operations Research [Schopb02, S. 13] und widmet sich Anwendungen in der Arbeitsvorbereitung eines Baubetriebs. Ein mathematischer Ansatz aus der Spieltheorie findet sich bei Kubica und Beißwenger [Kub82].

Im Rahmen dieser Arbeit kommt der Methode der Visuellen Interaktiven Simulation (VIS) nach Hurrion [Bell95, S. 1018] eine besondere Bedeutung zu, da sie eine Modifikation des laufenden Simulationsmodells durch den Anwender erlaubt. Dabei wird die Grundlage zur Entscheidung über die Modifikation durch visuelle Informationen aus dem laufenden Simulationsmodell gebildet. Bei Bell und O’Keefe [Bell95, S. 1025] bestehen diese visuellen Informationen aus einem grafisch animierten 2D-Simulationsmodell und einem Histogramm der gerade erzielten Ergebnisse. Der Anwender kann dann ‘by trial and error’ seine Eingriffe ins Simulationsmodell überprüfen und anpassen. In einem Experiment zeigte sich, dass alle Anwender das Histogramm zu mehr als 60 % der Zeit offen hatten, um die getroffenen Ent-

²⁶ wird synonym mit ‘Optimierung’ und ‘Programmierung’ verwendet

scheidungen zu prüfen [Bell95, S. 1030]. Dies zeigt den Wunsch des Anwenders nach Interaktion mit dem Modell im Gegensatz zum 'Blackbox'-Charakter eines deterministischen Modells. Hinsichtlich der Qualität der Ergebnisse wurde jedoch kein signifikanter Zusammenhang zum Einsatz des Histogramms hergestellt [Bell95, S. 1029]. In dieser Arbeit wird dennoch die visuelle interaktive Methode für das Bauwesen verfolgt, obwohl die Methode unter Simulationsexperten umstritten ist [Bell95, S. 1019]. Im Jahre 1995 waren die grafischen Möglichkeiten noch sehr eingeschränkt, es bestand kaum Interaktionsmöglichkeit mit 3D-Objekten in VR. Weiterhin betrachtete das Experiment nur eine spezifische Warteschlangenproblematik und keine parallelen Prozesse unabhängiger Ressourcen. Den Einsatz visueller Medien zur Bewertung und Optimierung des Bauablaufs zeigen Gehbauer [Gehb72a, S. 407] und Flade [Flade78] bereits in den 70-er Jahren.

Zusammenfassend zeigen die Anfänge der Simulation die Nutzung von zweidimensionalen Methoden und mathematischen Konzepten zur Entwicklung von Systemen und zur Berechnung von Simulationsmodellen. Einen neueren Überblick über verschiedene Simulations-sprachen und Entwicklungen auf internationaler Ebene gibt Martinez [Mart96a, S. 7-15]. Mit der Entwicklung und Verbreitung von virtuellen 3D-Modellen werden auch Modellierungen im 3D-Bereich möglich. Es werden Methoden ohne und mit räumlichen Modellen untersucht.

2.4.2 Modellierung ohne räumliche Modelle

Bei der Betrachtung der Prozessmodellierung kann in die reine Prozessebene und in die Prozessebene unter Einbeziehung der Produktdatenebene [Firm02] unterschieden werden. Dabei sind modellbasierte Ansätze aufgrund hardwaretechnischer Einschränkungen erst vor einigen Jahren in den Blickpunkt gerückt. Bei der Modellierung ohne räumliche Modelle werden die Abhängigkeiten über mathematische Modelle formuliert und grafisch in 2D dargestellt. In der stationären Industrie werden die Abhängigkeiten in Referenzmodellen abgebildet, die je nach Detaillierungsgrad eine sehr komplexe Struktur erreichen können [Binn01]. Dies ist aufgrund des niedrigen Anteils an nicht repetitiven Prozessstrukturen nicht uneingeschränkt auf das Bauwesen übertragbar. Zusammenhänge unter Prozessen im Bauwesen lassen sich bereits über Vorgänge auf Zeitachsen gut darstellen und dort auch nach Methoden der Netzplantechnik berechnen. Um komplexere Zusammenhänge zu untersuchen, wurden spezifische Modellsprachen entwickelt, die zusätzliche Aspekte bei der Prozessmodellierung integrieren. Dabei wurde die Detailstufe bei den Prozessen angehoben. Dies macht die Betrachtung des Ressourceneinsatzes auf einer höheren Detailstufe notwendig. Ebenso wurde die Variantenbildung in die Prozessmodelle integriert. Im Folgenden werden diese erweiterten Modellierungskonzepte mit vorliegender Arbeit in Zusammenhang gebracht.

Halpin [Gar79] hat mit dem speziell auf das Bauwesen ausgerichteten Simulationsmodell CYCLONE eine wichtige Grundlage gelegt. Er entwickelt dabei eine eigene Modellsprache, die mit deterministischen oder stochastischen Dauern für Arbeitsprozesse simuliert. Er nimmt eine Unterteilung in vier hierarchische Ebenen vor, um Prozesse in Bauunternehmen zu kategorisieren. Diese sind die Unternehmensebene, die Projektebene, die Produktionsprozessebene und die Arbeitsvorgangsebene. Die Frage nach der Detailstufe bei der Betrachtung von Prozessen im Bauwesen wird angerissen. Hinsichtlich der Arbeitsvorgangsebene äußert sich Halpin wie folgt:

„Auf der Arbeitsvorgangsebene werden die einzelnen Arbeitsvorgänge im Detail geplant, beschrieben und bestimmten Produktionseinheiten zugewiesen. Eine Zerlegung von Arbeitsvorgängen in weitere untergeordnete Mikroebenen ist möglich (...). Diesbezügliche Untersuchungen machen die Anwendung von REFA-Verfahren notwendig.

Hinsichtlich des Informationsinhaltes, der zur Beschreibung von Bauprozessen notwendig ist, erweist sich der Arbeitsvorgang als genügend detailliert. Eine weitere Zerlegung in einzelne Arbeitsvorgangskomponenten erscheint daher für die Beschreibung von Bauprozessen als nicht notwendig.“ [Gar79, S. 1]

Im Zusammenhang hierzu bildet Böhnlein in Anlehnung an Georgijevic [Geo04] vier Simulationsebenen, die von einer groben in eine feine Detailstufe übergehen. Diese sind als höchste Ebene die Makroebene (gesellschaftliche Systeme und Prozesse), danach die Unternehmensebene (große Wirtschaftssysteme und übergreifende Aufgabenstellungen in Unternehmen), die Abteilungsebene (ökonomische und technische Systeme) und schließlich die Arbeitsplatzebene, welche technische Systeme analysiert. Diese kann mit der Arbeitsvorgangsebene nach Halpin verglichen werden. Böhnlein ordnet die in der ASIM-Arbeitsgruppe „Simulation in der Betriebswirtschaft“ zwischen 1993 und 2004 erarbeiteten Anwendungen diesen Ebenen zu und stellt fest, dass nur zwei Simulationen auf Arbeitsplatzebene erfolgt sind. Keine der von Böhnlein aufgeführten Anwendungen behandelt baubetriebliche Fragestellungen.

Die Praxis zeigt, dass gerade aufgrund der hohen Abstraktion der Simulationsmodelle deren Ergebnisse zu ungenau für einen ernsthaften Einsatz auf Baustellen sind. Kleine Fehler oder Potenziale in der Prozessfolge können einen großen Einfluss auf die Dauer eines Prozesses haben. Die Existenz neuer Medientechnologien macht es erforderlich, die Frage nach dem Detaillierungsgrad neu zu diskutieren. Es sollte das Ziel sein, die Detailstufe unter Ausnutzung der neuen Technologien so hoch wie möglich zu treiben, ohne dabei die Wirtschaftlichkeit aus den Augen zu verlieren. Halpin unterscheidet für die vier Ebenen auch vier Planungszeiträume. Während die Unternehmensebene in Jahren denkt, bevorzugt man auf der Projektebene Monate, auf der Produktionsprozessebene (Bauleitung) Wochen und auf der Arbeitsvorgangsebene (er nennt explizit den Polier als `Vordenker` des Arbeitsvorgangs) bis zu zehn Tage. Im Rahmen dieser Arbeit gibt die Arbeitsvorgangsebene die Randbedingungen für die Prozessmodellierung vor.

Halpin sieht nicht die Notwendigkeit für eine übermäßige Genauigkeit, da *„die Imponderabilien in der Bauwirtschaft wesentlich größer als in anderen Industrien sind.“* Die von ihm als wesentlich bezeichneten Modelle – Balkendiagramm und Netzplantechnik – diskutiert er hinsichtlich ihres Einsatzes im Bauwesen. Für ihn haben Netzpläne den Vorteil, dass die Abhängigkeiten der einzelnen Vorgänge dargestellt werden können. Er favorisiert Netzpläne daher für langfristige und komplexe Projekte auf der Projektebene, hält sie jedoch für die Bauprozessplanung für ungeeignet:

„Die Netzplantechnik verwendet für kurzfristige Projekte, (...), in der Regel den Tag oder die Woche als Planungszeiteinheit. Für mittelfristige und langfristige Projekte werden für Detailpläne in der Regel die Woche (...) und für Grobpläne der Monat festgesetzt. Für eine Bauprozessplanung erweisen sich diese Zeiteinheiten als zu grob. Stunden, Minuten, manchmal sogar Sekunden erwiesen sich hier als notwendige Planungszeiteinheiten.“ [Gar79, S. 3]

Diese Erkenntnis von Halpin hat wesentlichen Einfluss auf die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Lösung. Das Vordringen auf eine Detailstufe, wo Zeiteinheiten im Sekundemaß bestimmt werden, hat zur Entwicklung eines virtuellen Zeitmessers zur Bestimmung von Prozessdauern geführt.

Eine weitere Kernaussage von Halpin ist, dass sich Bauprozesse nur auf der Detailebene der Bauproduktionsprozesse wiederholen. Er unterscheidet dabei zwischen den Vorgängen des Netzplans und den eigentlichen Bauproduktionsprozessen auf der Baustelle. Vorgänge bezeichnen demnach „*meist Zwischen- oder Endprodukte des Gesamtprojekts und sind daher vom Charakter her einmalig, d.h. sie kommen nur einmal in einem Netzplan vor und müssen nur einmal durchgeführt werden.*“ Bauproduktionsprozesse werden durchgeführt, um diese Zwischen- oder Endprodukte zu erstellen und sind sich wiederholende Abläufe. Halpin definiert den Bauproduktionsprozess wie folgt:

„Ein Bauproduktionsprozess kann als eine Menge von Arbeitsvorgängen definiert werden, die, bestimmt durch eine technologische Struktur (ein Bauverfahren), Beziehungen zueinander haben. Die Planung von Bauprozessen beinhaltet die Gliederung eines Bauprozesses in einzelne Arbeitsvorgänge und die Festlegung der Reihenfolge des Ablaufes dieser Vorgänge, die Bestimmung des zur Anwendung gelangenden Bauverfahrens und die Festlegung der einzusetzenden Produktionseinheiten.“ [Gar79, S. 5]

Halpin weist darauf hin, dass die Entscheidungen zum Einsatz von Bauverfahren von einem Team aus Kalkulatoren, Terminplanern und Ingenieuren der Arbeitsvorbereitung nach Abwägung verschiedener Möglichkeiten gemeinsam nach Diskussion getroffen werden. Dies unterstreicht die in dieser Arbeit vertretene Position, dass die Wahl von Bauverfahren – und damit die Entscheidung für eine bestimmte Kostenstruktur der dazugehörigen Arbeitsprozesse – ein kreativer Prozess ist. Da Bauproduktionsprozesse in der Praxis nur selten ausreichend geplant werden, sehen sich Bauleiter oftmals veranlasst, „*ad-hoc-Lösungen zur Durchführung von Bauproduktionsprozessen zu finden.*“ Diese Lösungen hängen stark vom Profil des Bauleiters ab. Nach Aussage von Halpin stehen dem „*Bauleiter (...) bisher keine formalen Methoden zur Verfügung.*“ Halpin verfolgt das Ziel, durch eine standardisierte und formalisierte Beschreibung der Bauprozesse Erfahrungen von der Baustelle festzuhalten und zu dokumentieren. Er beklagt, dass diese Erfahrungen meist nur einem kleinen Kreis zugänglich gemacht werden und im Gesamtunternehmen nicht kommuniziert werden.

Das Konzept von CYCLONE

CYCLONE leitet sich von `CYCLic Operations NEtwork` ab. Das Modell beschreibt zyklisch auftretende, sich wiederholende Bauproduktionsprozesse (operations), die in Form von Netzplänen (networks) dargestellt werden. Halpin analysiert den Bauproduktionsprozess und seine besonderen Eigenschaften sehr gründlich, indem er versucht, Prinzipien in der Prozessreihenfolge zu definieren, welche unabhängig vom angewandten Verfahren sind. So sieht er beispielsweise bei Maurerarbeiten „*Arbeitsvorgänge, die in jeder Maurerarbeit vorgefunden werden können, wie z.B. Ziegellieferung, Ziegellagerung, Mörtelaufbereitung, Gerüstaufbau und Ziegelverlegung.*“ Aus heutiger Sicht erscheint dieser Versuch kühn ob der sehr hohen Anzahl an verfügbaren Produktionsverfahren. Halpin bringt ein Beispiel für die Methode zur Beschreibung eines Bauproduktionsprozesses. Er schlägt eine dreistufige Herangehensweise vor:

- Bestimmung des Bauverfahrens
- Bestimmung der Arbeitsvorgänge und deren Folge
- Bestimmung der einzusetzenden Produktionseinheiten

Die von Halpin verfolgte Strategie hat das Konzept der in dieser Arbeit vorgeschlagenen Methode maßgeblich beeinflusst. Ein wesentlicher Unterschied besteht darin, dass Halpin das Prozessmodell vordefiniert und nicht interaktiv bestimmt. Des Weiteren besteht keine Verbindung zwischen Simulationsmodell und Produktmodell. Der Grundansatz von CYCLONE ist das Flussnetzwerk mit Flusseinheiten, ein grafisches Vorgangsknotennetz, welches die Logik und die Abhängigkeiten der einzelnen Arbeitsvorgänge visualisiert (Abb. 18).

Die Dauern der einzelnen Elemente werden durch historische Daten bestimmt. Sie können konstant (deterministisch) oder variabel (stochastisch) sein. Hinsichtlich der Flusseinheiten orientiert sich Halpin an den bei Kalkulationen üblichen Kostenarten (Arbeitskräfte, Maschinen, Materialien) und fügt diesen noch den 'Raum' und 'Informationen oder Bewilligungen' hinzu. Die Flusseinheit 'Raum' berücksichtigt die Verfügbarkeit von Lagerräumen und Arbeitsräumen. Deren Verfügbarkeit kann Bedingung zur Durchführung von Arbeitsvorgängen sein. Mit 'Informationen oder Bewilligungen' schafft Halpin die Möglichkeit, die Einhaltung von organisatorischen Regeln im Modell abzubilden. Halpin verfolgt bei der Modellierung der Logik einen holistischen Ansatz, indem er folgende Behauptung aufstellt:

Bei Vereinigung der Flussstrukturen werden alle logischen Abhängigkeiten eines Arbeitsvorganges festgestellt. [Gar79, S. 29]

Diese Aussage ist kritisch zu sehen, da sie der Komplexität von Bauprozessen nur schwer gerecht werden kann. Die logischen Abhängigkeiten sind zu zahlreich und zu variabel. Hinzu kommt, dass ein Arbeitsvorgang nicht isoliert betrachtet werden sollte, sondern stets im Zusammenhang mit vielen anderen Vorgängen. Das macht die Entwicklung einer maschinenlesbaren Logik für Bauprozesse nur in wenigen Ausnahmesituationen möglich. Aus dem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit die Logik im Bauablauf in einem interaktiven Entscheidungsvorgang zwischen Mensch und Maschine entwickelt.

Zur Simulation der Dynamik der CYCLONE-Modelle verwendet Halpin eine Simulationsuhr. Die 'SIM-UHR' rückt vor, wenn ein oder mehrere Arbeitsvorgänge beendet sind. Über die Dauern der Vorgänge und deren Abhängigkeiten lässt sich die 'SIM-ZEIT' berechnen.

Halpin sagt selbst, dass die Handsimulation mit CYCLONE mühevoll und zeitaufwendig ist. Zusammenfassend stellt er fest, dass CYCLONE sich für repetitive und kapitalintensive Prozesse gut eignet. Mit CYCLONE lassen sich vorerst statische Modelle eines Bauprozesses entwickeln. Die Dynamik entsteht, indem man dieses statische Modell simuliert, d.h. es in einen 'Fluss' versetzt. Die spontane Komponente bei der Erstellung des Prozessmodells ist nicht Gegenstand der Forschung, das Prozessmodell ist starr. Vielmehr will Halpin ein Werkzeug schaffen, das die Produktivität eines ganz bestimmten Prozessmodells bewertet. Durch statistische Analysen möchte er dann prüfen, wo Optimierungspotenziale existieren, und diese in einem überarbeiteten Prozessmodell verifizieren. Seine Methode eignet sich für Prozessmodelle, in welchen regelmäßige Änderungen größeren Ausmaßes nicht zu erwarten sind, und deren Abhängigkeiten sich gut abbilden lassen.

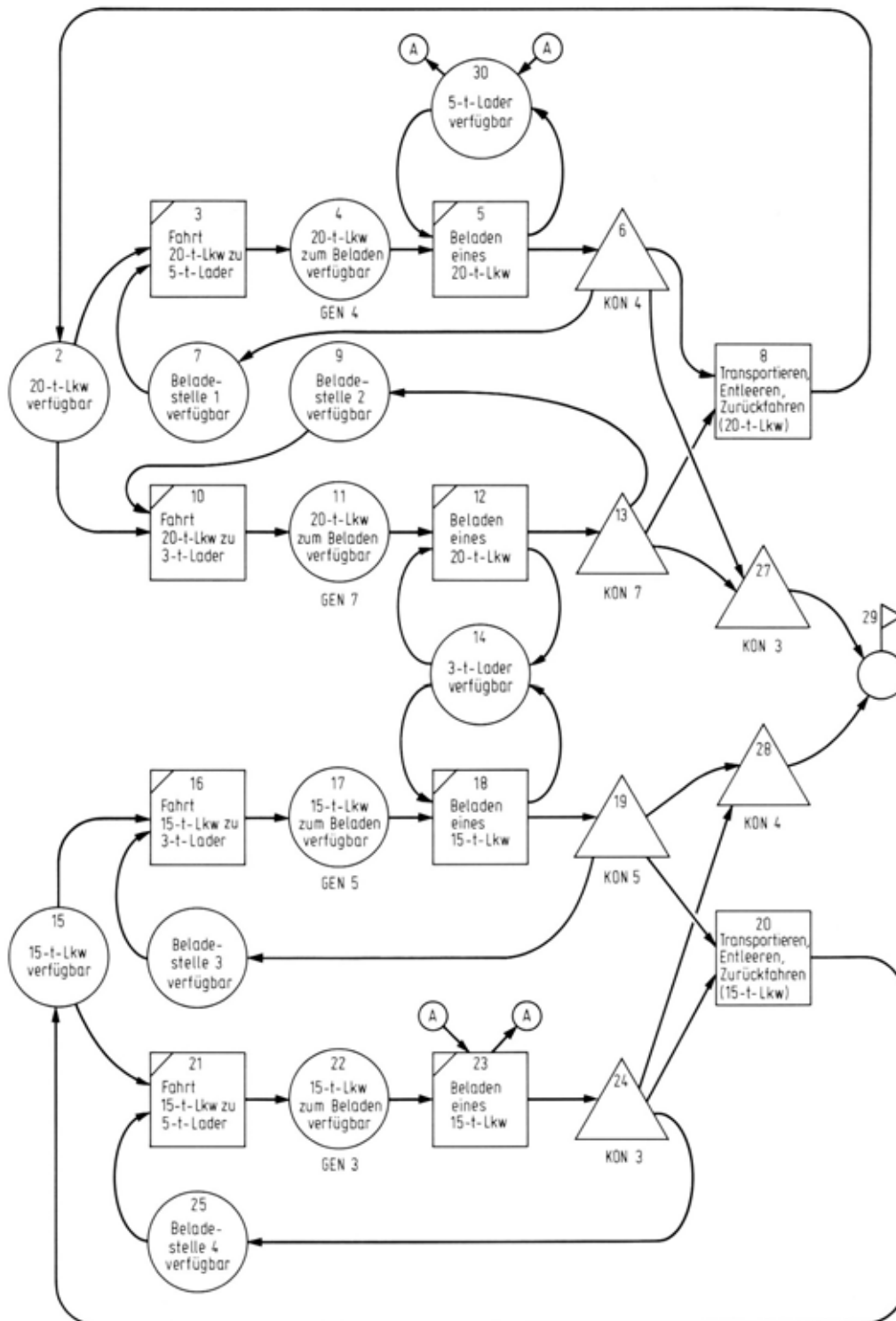


Abb. 18: Erdbauprozess in CYCLONE, aus [Gar79, S. 73]

Seit der Entwicklung von CYCLONE entstanden bis in die heutigen Tage zahlreiche Adaptationen und Erweiterungen, welche ganz spezifische Probleme behandeln, z.B. INSIGHT [Pauls87] mit interaktivem Interface oder RESQUE [Chang87] mit erweiterten Fähigkeiten zur Betriebsmittelbehandlung oder STROBOSCOPE [Mart96]. Sawhney et al. [Sawh98] behandeln das Problem der Simulation von mehreren simultan ablaufenden Prozessen mit

CYCLONE. Sie führen in Anlehnung an Halpin zwei neue Elemente ein, um zum einen den Ressourceneinsatz flexibel managen zu können – bei Halpin konnte man Ressourcen zuordnen, aber nicht wieder freisetzen – und zum anderen Prozessabhängigkeiten – Vorgänger und Nachfolger – einzubauen. Die Weiterentwicklung der Ideen aus CYCLONE wurde in den folgenden Jahren von mehreren Forschern vorangetrieben. Insbesondere Arbeiten um AbouRizk und Martinez sind zu erwähnen. Shi and AbouRizk [Shi97] beschreiben eine betriebsmittellorientierte Modellierungsmethode, das sog. `resource based modeling` (RBM). Dabei werden die Vorgänge der aktiven Betriebsmittel als `atomare Modelle` definiert und in einer Modellbibliothek gespeichert. Diese Modelle werden durch definierte Verbindungsstrukturen zu einem Modell für das ganze Projekt verknüpft. Ihre Ansätze verfolgen das Ziel, spontane Simulationen für spezifische Problemstellungen (`special purpose simulation` oder SPS) im Bauwesen auch für Nicht-Simulationsexperten zu ermöglichen. Dabei wurde auch ein Konzept zur Simulation von Erdbewegungen vorgestellt [Haj96]. Wie Hajjar und AbouRizk erwähnen, hat sich die Entwicklung von Prototypen für spezifische Problemstellungen als wenig wirtschaftlich herausgestellt [Haj99], sodass ein flexibleres und bedienungsfreundlicheres Werkzeug namens SIMPHONY (Abb. 19) entwickelt wurde. Die Anforderungen wurden dabei wie folgt spezifiziert:

- Grafische Darstellung und Manipulation der Modellstruktur
- Der Modellierungsprozess soll die domänenspezifischen Anforderungen unterstützen; der durchschnittliche Anwender soll von im Hintergrund ablaufenden abstrakten Methoden ferngehalten werden
- Das Werkzeug muss variierende Komplexitäten in den Bauverfahren darstellen können
- Ergebnisse der Simulation sollen sofort verfügbar sein und intuitiv präsentiert werden
- Integration mit existierenden Applikationen
- Austausch von Modellen aus verschiedenen Simulationsanwendungen
- Wiederverwendbarkeit von entwickelten Simulationsmethoden
- Entwicklung sollte in kurzer Zeit und mit standardisierten Methoden möglich sein

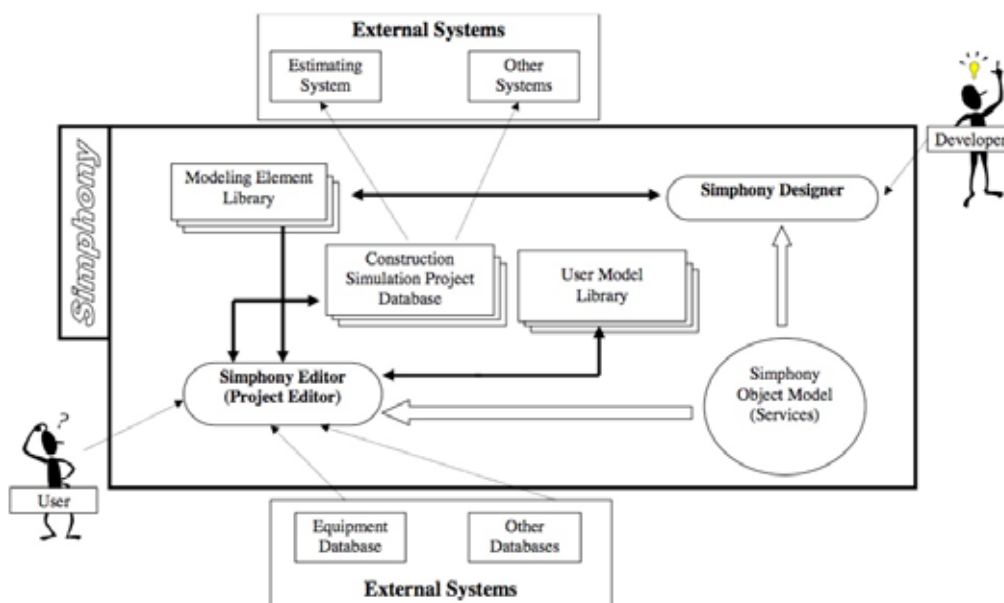


Abb. 19: Konzept der Simulationssoftware SIMPHONY, [Haj99, S. 999]

Aus der Sicht dieser Arbeit sind insbesondere die ersten beiden Punkte relevant. Hajjar und AbouRizk verlangen die Abkehr von stark abstrahierenden Methoden, da diese in der Bau-branchen aufgrund ihrer fehlenden Nachvollziehbarkeit durch Baustellenpersonal nur wenig Anklang finden. Des Weiteren wird bei ihrem Konzept vorgesehen, externe Systeme – sie weisen auf das Kalkulations- und Gerätemodul hin – an SIMPHONY anzudocken, sie jedoch nicht direkt zu integrieren. Mit ihrem Tool lassen sich SPS-Vorlagen entwickeln, die in einer Bibliothek aufbewahrt werden und vom Anwender aufgerufen und wieder verwendet werden können. Damit befürworten sie die Ablage von Wissen in Form von Simulationsmodellen. Zur vollständigen Nutzung von SIMPHONY sind Programmierkenntnisse notwendig. Die Integration von 3D-Modellen bei der Entwicklung von Simulationsmodellen sehen Hajjar und AbouRizk bei SIMPHONY im Jahr 1999 noch nicht vor. Erst ein Jahr darauf folgen Arbeiten um AbouRizk, die diesen Gedanken einführen [Abo00]. Als Methode schlägt er eine Zerlegung des Modells in einzelne Teile (*'subgrids'*) vor, die eine Verlagerung der Arbeitsstelle im Laufe des Prozesses berücksichtigt. Auch andere Aspekte, wie zum Beispiel die sich ändernde Bodenbeschaffenheit von *'subgrid'* zu *'subgrid'* und die damit verbundene schwankende Leistung des Baggers, können so berücksichtigt werden. Diese Forschungsarbeiten unterstützen die Forderung nach einer Erhöhung der Detailstufe bei der Prozessmodellierung und rücken Orte auf virtuellen Baustellen in den Blickpunkt der Betrachtung. AbouRizk und Mather zeigen, dass CAD und Simulation miteinander verknüpft werden können, auch wenn dies mit erheblichem Implementierungsaufwand verbunden ist. Ihr Ansatz integriert jedoch lediglich Daten [Abo00, S. 480, Tabelle 2] aus dem CAD, nicht das CAD-Modell selbst. Es besteht also keine einfache oder visuelle Möglichkeit der Prüfung dessen, was im Simulationsmodell abgelaufen ist. Der von Hajjar und AbouRizk im Jahre 1999 geforderte geringere Abstraktionsgrad [Haj99] konnte ein Jahr später noch nicht zufrieden stellend erreicht werden. Eine parallele Entwicklung zu AbouRizk und Mather stellt die Arbeit von Xu et al. [Xu03] dar, die – unter Bezugnahme auf aktuelle Entwicklungen im Bereich 4D – das CAD-Modell in Anlehnung an die bei AbouRizk und Mather [Abo00] konzipierten *'subgrids'* in *'product atomic components (PAC)'* aufgliedern [Xu03, S. 450]. So wie bei 4D die Bauteile des 3D-CAD-Modells mit den Vorgängen aus dem zeitlichen Bauablaufplan zu neuen Objekten zusammengefügt werden, so werden hier automatisch generierte kleinste zu bearbeitende Komponenten (PAC) aus dem 3D-CAD-Modell mit Simulationsroutinen – hier entnommen aus SIMPHONY – verknüpft [Xu03, S. 458]. Das Ergebnis ist ein an das Produktmodell angelehntes Simulationsmodell auf einer hohen Detailebene. Auch bei dieser Arbeit besteht keine einfache oder visuelle Möglichkeit der Prüfung dessen, was im Simulationsmodell abgelaufen ist.

Petri-Netze

In der Bauforschung wurde die Anwendung von Petri-Netzen für die Prozessmodellierung erforscht [Kantel97, Rüp04]. Wie König [König04, S. 5] hinweist, widmet sich in Deutschland eine seit 1996 von der DFG geförderte Forschergruppe dem Thema *'Konzeption, theoretische Fundierung und Validierung einer anwendungsbezogenen Petrinetz-Technologie'*. König entwickelt in seiner Dissertation ein relationales Prozessmodell für die Gebäudeplanung unter Anwendung von Petri-Netzen. Gegenüber früheren Ansätzen mit vordefinierten Prozessmodellen [Halp77] geht König von dynamischen Ansätzen bei der Erstellung des Prozessmodells aus. Er schreibt:

Zu Beginn der Planung liegen die Organisationsstruktur, die Gebäudestruktur und die Prozessstruktur noch nicht vor. Die drei Teilmodelle werden im Zuge des Planungsprozesses dynamisch aufgebaut und angepasst. [König04, S. 12]

Diese Vorgehensweise ist auch für baubetriebliche Problemstellungen sinnvoll. Aus Königs Arbeit wird auch ersichtlich, wo Petri-Netze ihre Grenzen erreichen, wenn es um die formale Beschreibung von Planungsprozessen geht. Die Aussage von König [König04, S. 12], es ließen sich *‘auf der Grundlage des relationalen Prozessmodells (...) geeignete Methoden für das Prozessmanagement formal definieren’*, lässt sich nicht auf baubetriebliche Problemstellungen übertragen. Das von ihm aufgeführte Beispiel behandelt Planungsaufgaben auf der Projektebene [König04, S. 128]. Insofern kann man sagen, dass sich Petri-Netze für die Projektsteuerung gut eignen, doch für die Verfolgung von Detailplanungen mit einer hohen Zahl und einer komplexen Ausprägung der Relationen keine Ideallösung darstellen.

Franz untersucht in seiner Dissertation [Franz89] die Eignung von höheren Petri-Netzen für die Analyse und Simulation komplexer Bauprozesse. Er wendet sich von Stellen-Transitions-Netzen (STN) aufgrund der eingeschränkten Anwendbarkeit ab [Franz89, S. 37] und favorisiert die höher entwickelten Prädikats-Transitions-Netze (PTN) zur Abbildung des Prozessmodells. Ebenso wurde die Methode für Fertigteilmontagen [Franz98] und in der stationären Bauindustrie [Franz98a] für Betonpflastersteinproduktion erforscht und angewandt. Eine andere Anwendung fanden Petri-Netze bei der Bestimmung von Terminen für späteste Planlieferungen. Dabei wurden die Termine für alle Planer sowie für alle Geschosse und Bauteile gesondert berechnet [Franz97]. Chahrour [Chah04] unterzieht zwei auf Petri-Netz-Technologien aufbauende Werkzeuge (eM-Plant von Tecnomatix und PACE von IBE) einem Eignungstest für eine baubetriebliche Anwendung im Erdbaubereich. Sie geht dabei von einem Zusammenspiel zwischen Bagger bzw. Lader und LKW aus und definiert jeweils zwei Systemmodelle. Die Eingabe der Parameter (Bagger, Lader, LKW, Geometrie der Baustelle) erfolgt über Dialogmasken. Die Anzahl der Fahrzeuge wurde bei jedem Simulationslauf erhöht, um die optimale Ausstattung der Baustelle zu bestimmen. Schwerpunkt der Untersuchung war – in Analogie zu Halpin – die Optimierung eines Prozessmodells und nicht der Modellierungsprozess selbst. Das Modell erlaubt, eine Baustelle auf einfache Weise zu modellieren und *„dabei einen Zugriff auf das kleinste Detail und auf jede Vorgangangabe zu behalten.“* Chahrour gibt zu, dass eine *„dermaßen realitätsgetreue Visualisierung (...) eine sehr detaillierte Modellierung und eine ständige Aufnahme aller Einzelbewegungen jeder Maschine“* erfordert. Beim zweiten Werkzeug (PACE von IBE) wurde ein Petri-Netz entwickelt. Der Vergleich ergab, dass die Handhabung schwieriger ist, da die Parametrisierung nicht so anwenderfreundlich ist. Die symbolische Visualisierung hält Chahrour für wenig anschaulich. Sie bemerkt außerdem kritisch, dass bei der ersten Modellierungsmethode *„die Anordnung der programmierten Bausteine in einem Grundriss mit großen Einschränkungen verbunden ist, die man bei Petri-Netzen nicht hat.“* Chahrour bemerkt zu Recht, dass beide Methoden keine geeignete Visualisierung für Baustellen darstellen, deren Layout sich während des Baufortschritts ständig ändert. Dies unterstreicht auch die Auffassung, dass örtliche Veränderungen einen wichtigen Einfluss auf die Modellierung haben.

Agentensysteme

Die untersuchten Modellierungssprachen verursachen aufgrund der komplexen Syntax einen erheblichen Aufwand beim Aufsetzen des Prozessmodells bzw. Simulationsmodells. Es ist daher ein erklärtes Ziel, sich wiederholende Prozessbausteine über wieder verwendbare

Algorithmen abzubilden. In diesem Zusammenhang spielen Agentensysteme eine Rolle, da sie Objekte mit autonomem Verhalten ermöglichen, die proaktiv reagieren können [Stork02]. Ein Überblick über die Funktionsweise von Agenten findet sich bei Maher et al. [Maher03]. Sie beschreiben die Verwendung von Agenten bei der Integration von Daten aus CAD in eine VR-Umgebung. Sie zeigen auch eine anschauliche Darstellung zum Funktionsprinzip eines Agenten (Abb. 20):

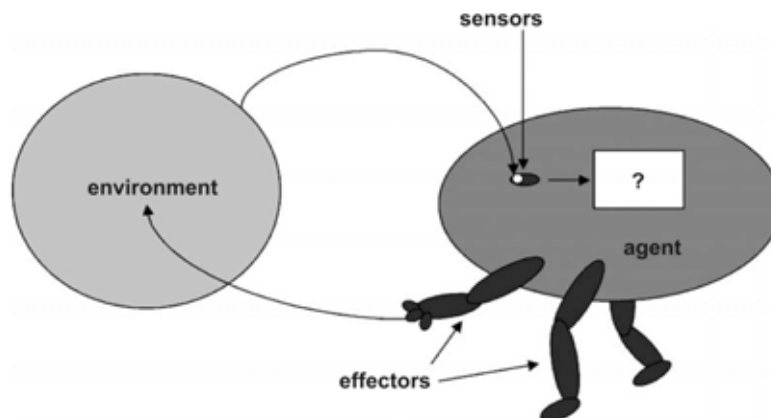


Abb. 20: Agenten interagieren über Sensoren und Effektoren, [Maher03, S. 49]

Agenten sind so konzipiert, dass sie das Verhalten der Realität einschließlich des Menschen bestmöglich abbilden. Die Anwendungsmöglichkeiten reichen dabei von der Abbildung physikalischer Zusammenhänge (z.B. Schwerkraft, Festigkeit) bis hin zur Abbildung menschlicher Gefühle (z.B. Neid, Eifersucht). Die Sensoren sind mit den menschlichen Wahrnehmungssinnen vergleichbar und die Effektoren lösen die entsprechenden Handlungen aus. Dazwischen liegt eine künstliche Intelligenz, die über die Module 'Interpretation', 'Hypothesen' und 'Aktion' gesteuert wird. Hier unterscheidet Maher zwischen drei Arten von Agenten: den reflexiven, den reaktiven und den reflektiven (Abb. 21). Die reflexiven stellen die einfachste Form dar und reagieren reflexartig mit einer Aktion auf eine Sensornachricht. Die reaktiven Agenten interpretieren vor der Aktion die Information des Sensors aufgrund hinterlegter Verhaltensregeln, die komplexere Logik beinhalten. Die reflektiven Agenten können in Anlehnung an den Menschen Muster erkennen und darauf eine entsprechende Aktion einleiten. Sawhney et al. [Sawh03] geben einen umfassenden Überblick über die Entwicklung von Simulationssystemen und reihen auch agentenbasierte Systeme darunter ein. Weitergehende Ausführungen zu Agenten-Systemen sind bei Wooldridge und Jennings [Wooldr95] zu finden.

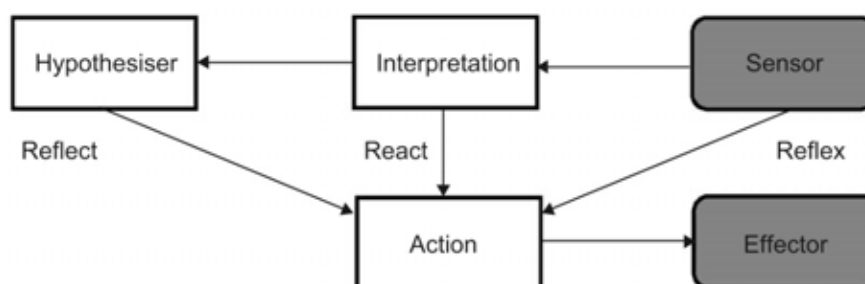


Abb. 21: Das Modell eines Agenten, [Maher03, S. 50]

Intelligenzen in Agenten können über Regeln implementiert werden, die kausale und konditionale Bedingungen abbilden. Agentensysteme stellen aufgrund der Autonomie der Agenten einen Versuch dar, die Denkweise in grafischen Prozessmodellen zu überarbeiten. Sie gehen nicht von chronologischen Abläufen aus, sondern von zeitlich losgelösten Zusammenhängen (Grundregeln). Man kann auch von einer Logik sprechen. Diese Logik lässt sich bei physikalischen Gesetzmäßigkeiten des Bauens gut abbilden. Deshalb konzentriert sich die Forschung um Agentensysteme verstärkt um konstruktive Aspekte, wo physikalische Gesetze wirken. Im Rahmen dieser Arbeit ist von Interesse, wie Baustellenprozesse mit Agenten abgebildet werden können. Die Entwicklung von Logikbausteinen mit 'Grundregeln' für technische Bauproduktionsprozesse auf hoher Detailebene ist nicht ausreichend erforscht.

Agentensysteme finden heute in verschiedenen Forschungsszenarien Anwendung. Willenbacher entwickelt in seiner Dissertation [Will02] einen agentenbasierten Ansatz zur Integration von domänenspezifischen planerischen Partialmodellen in ein Gesamtmodell. Er sieht dabei auch die Integration des Anwenders beim Aufbau der Verknüpfungen unter den Partialmodellen [Will02, S. 88] vor und weist auf die interaktive Komponente hin. Anhand seiner Arbeit wird klar, dass auch beim Einsatz von Agenten eine völlige Autonomie im System nur schwer erreichbar ist. Ebenso nennt er als Vorteile der Agenten deren Autonomie, Reaktionsfähigkeit, Proaktivität sowie deren soziales und intelligentes Verhalten. Bierlaire et al. [Bier03] verwenden Agenten zur Simulation von Fußgängern. Dabei stellt jeder Fußgänger einen Agenten dar, der sich anhand seiner Verhaltenslogik autonom bewegt. Aktuelle Arbeiten [Moh05] von Mohamed und AbouRizk betrachten Bauprozesse hinsichtlich der Entwicklung von Entscheidungslogik. Sie weisen dabei auf die Dualität zwischen Mensch und Maschine bei der Entscheidungsunterstützung hin:

Mathematical techniques (e.g., optimization algorithms) can be used to automate numeric modifications; however, human decisions usually govern topological modifications of the model. [Moh05, S. 277]

Sie präsentieren ein Rahmenkonzept für intelligente Simulationswerkzeuge, die banale Entscheidungen vom Anwender fernhalten sollen und verstärkt die menschliche Entscheidungskomponente unterstützen. Sie entfernen sich dabei explizit von statischen Ansätzen und Flussdiagrammen (z.B. CYCLONE oder Visual SLAM²⁷) und verlangen Objekte, die sich intelligent und autonom verhalten können. Die Methode, welche sich hinter den autonomen Objekten verbirgt, ist auf Petri-Netze zurückzuführen, da auch hier zwischen 'states' und 'events' (Zustände und Ereignisse) unterschieden wird. Sie definieren 'production rules', mit welchen sie die Transitionen der Zustände kontrollieren:

By controlling the state transition of an element using production rules (...), autonomy can be built into the element in choosing the simulation behaviour to follow when certain states exist. [Moh05, S. 279]

Das von ihnen vorgestellte Rahmenkonzept sollte folgende Anforderungen erfüllen:

- Funktionale Sicht: Die Elemente des Simulationsmodells sollten die 'Funktionen' ihrer Pendanten im realen System repräsentieren können, um ihren Selbstzweck interpretieren zu können

²⁷ Grafische Simulationssprache, Weiterführende Informationen unter: Pritsker, A.B., O'Reilly, J., Laval, D.K.: Simulation with Visual SLAM and AweSim, Wiley, New York, 1997

- SPS-Konzepte ('special purpose simulation') mit Modellierungselementen, die dem gewählten Bauverfahren entsprechen
- Autonomie: Elemente sollten sich autonom verhalten können
- Flexible strukturelle Änderungen während der Laufzeit, z.B. Hinzufügen, Entfernen

Das vorgestellte Rahmenkonzept (siehe Abb. 22) unterscheidet zwischen zwei Detailstufen, einer SPS-basierten Sicht für den Ingenieur mit Darstellung der Elemente in Anlehnung an die reale Welt – jedoch nur als Bilder und nicht als virtuelle 3D-Objekte – und einer abstrahierten Sicht für den Simulationsexperten. Es lehnt sich damit an das Konzept von SIMPHONY [Haj99] an.

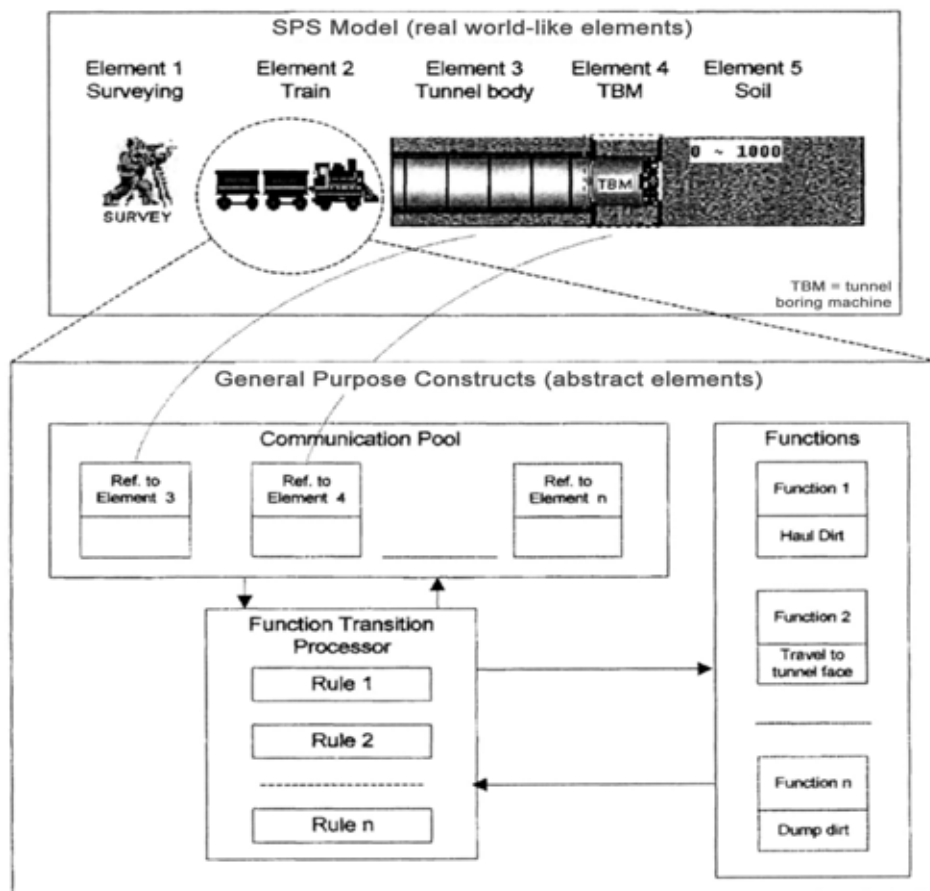


Abb. 22: Elemente einer funktionsbasierten Simulationsumgebung, [Moh05, S. 280]

Die abstrahierte Sicht besteht dabei aus drei Komponenten: den Funktionen, dem Funktion-Transition-Prozessor sowie der Kommunikationseinheit. Funktionen beschreiben das Verhalten ('behaviors')²⁸ der Elemente in der Simulation, z.B. ein LKW fährt zur Ladestelle. Wie Mohamed und AbouRizk sagen, besteht hier ein wesentlicher Unterschied zu Modellsprachen wie z.B. CYCLONE. Bei letzteren werden Ressourcen und Funktionen in einem Element vereint. Hier sind die Funktionen von den Ressourcen getrennt, d.h. sobald eine Ressource fürs Beladen frei ist und eine Funktion 'Beladen' aufgerufen wird, ist die Ressource besetzt. Dies bedeutet, dass der Produktionsprozess mit weniger Wartezeiten verbunden

²⁸ Mohamed und AbouRizk lehnen sich hier an Svaransky [Sva00] und Dell'Isola [Dell'Is97] an

sein kann. Es wird aus baubetrieblicher Sicht jedoch auch darauf verwiesen, dass es hier zu 'sinnlosem' Verhalten kommen kann, z.B. wenn ein LKW nach Aufruf einer Funktion 'Beladen' aus einer Warteschlange ausbricht, um am anderen Ende der Baustelle einen Prozess auszuführen. Es wäre hier also im Einzelfall zu prüfen, welche Priorität die aufgerufene Funktion hat.

Vorliegende Arbeit deckt sich teilweise mit den Ansätzen von Mohamed und AbouRizk, indem ebenfalls autonomes Verhalten von Ressourcen gefordert wird. Es wird auch davon ausgegangen, dass funktionsbasierte Simulationsansätze zu verfolgen sind. Es ist jedoch noch nicht klar, welche Entscheidungen mit Funktionen abgebildet werden können und welche nicht. Die Entscheidungen im Tunnelbau, eine zweite Transportressource oder einen vertikalen Zwischenschacht automatisch einzuführen, sind problematisch, da nur eine eingeschränkte Zahl von Bauverfahren als Lösungsalternativen implementiert wurde. Darauf weisen die Autoren auch in der Diskussion hin [Moh05, S. 290, Punkt 4]. Ein vertikaler Zwischenschacht mag bei einem Straßentunnel in der Stadt sinnvoll sein; er kann bei einem Tunnel durch einen Berg jedoch weniger sinnvoll oder gar unmöglich sein. Es wird auch hier auf den Zusammenhang zwischen Simulationsmodell und detaillierter Geometrie der Baustelle hingewiesen.

2.4.3 Modellierung mit räumlichen Modellen

Die Modellierung von Bauprozessen am 3D-Modell nutzt die Visualisierungspotenziale dieses Mediums aus und stellt eine Erweiterung zu Modellierungsmethoden ohne räumlichen Bezug dar. Die visuelle Kommunikation mit dem Anwender stellt das wichtigste Argument für den Einsatz des 3D-Modells dar. Zusätzlich sind in letzter Zeit interaktive Ansätze und Echtzeit-Lösungen untersucht worden, die heute als Stand der Forschung im Bereich der Bauprozessmodellierung gelten. In vielen Bereichen sind Bemühungen um die Integration des Produktmodells in die Prozessmodellierung vorzufinden.

Am Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen an der TH Darmstadt verwendet Theiß [Theiß02] Agentensysteme, um das 3D-Modell mit Wissen aus dem Brandschutz zu verknüpfen. Er betrachtet dabei den Planungsprozess und stellt autonome Regeln auf, die über ein Expertensystem unterstützend in die Planung einfließen. Die Arbeit untersucht die Integration von Agenten und 3D-Modellen. Eine weitere Forschungsarbeit behandelt die Simulation von Straßenbaustellen. Castro und Dawood [Castro04] stellen mit ROADSIM ein Werkzeug zur Simulation von Straßenbaustellen vor. Sie bilden dazu ein Referenz-Prozessmodell für den Straßenbau ab. Ein weiterer Ansatz zur Verbindung von Produktmodellen mit Prozessmodellen findet sich bei Vad et al. [Vad02]. Grundlage für den Zugriff zwischen beiden Modellen bildet ein Kennzeichnungssystem, das im Bezug zur DIN 6779²⁹ steht (Abb. 23).

Derartige Überlegungen bilden die Grundlage für Arbeiten, die zum Ziel haben, Prozesse mit den Produktdaten zu verknüpfen. Neuere Ansätze in der Simulation von Bauprozessen fordern die Integration von visuellen 3D-Technologien. Conlin und Retik [Conlin97, S. 116] ebenso wie AbouRizk und Hajjar [Abo98, S. 605] fordern, dass ein Simulationswerkzeug unbedingt eine visuelle Schnittstelle anbieten sollte.

²⁹ Siehe DIN 6779 'Kennzeichnungssystematik für technische Produkte und Produktdokumentationen', Teil 12 'Bauwerke und technische Gebäudeausrüstung' (Stand: Juli 2003)

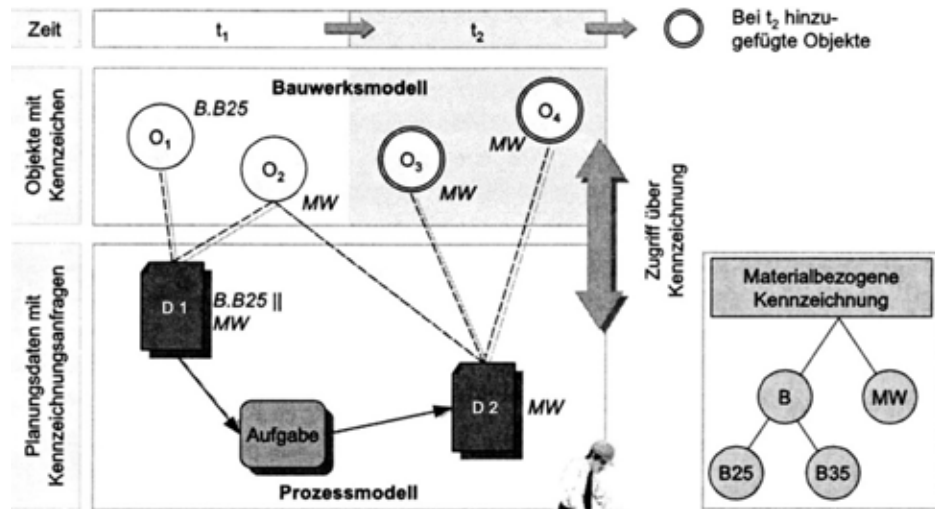


Abb. 23: Verbindung von Prozess- und Produktmodell, [Vad02, Abb. 2]

Während Lösungen wie CYCLONE oder SIMPHONY mit stark abstrahierten Darstellungen bzw. mit Icons arbeiten, favorisieren andere die volle Integration des 3D-Produktmodells in die Prozessmodellierung und Simulation. Erste Ideen zur Nutzung von virtuellen Umgebungen für Baustellen finden sich bei Cleveland [Clev89]. Er schlägt Echtzeit-Technologien vor, um Bauprozesse zu 'animieren'. Es ist korrekt, dass es sich beim Aufbau von Prozessabläufen in VR ebenso wie bei 4D nicht um Simulationen im ursprünglichen Sinn handelt. Bei 4D spricht man von '4D-Modeling' und bei VR spielen Interaktivität und Echtzeit die tragende Rolle. Bei Retik finden sich zahlreiche Forschungsarbeiten zum Thema 'Virtual Reality in Construction' [Retik90]. Obwohl er auch Arbeiten zum Thema 4D-Modeling verfasst hat, orientiert er sich verstärkt an virtuellen Umgebungen und stellt die Möglichkeiten zur Interaktion mit dem Modell in den Vordergrund [Retik97]. In Analogie zum 4D-Modeling verwendet er ähnliche Navigationshilfen zum Ab-, Vor- und Rückwärtsspielen des Ablaufs. Er prägt den Begriff der 'interactive visual simulation'³⁰ [Retik95]. Retik geht von einer Bibliothek aus, in der sowohl die Bauteile des Produktmodells als auch Prozesse ('library of virtual activities') vorhanden sind. Er weist auf die Notwendigkeit an technologischem know-how zur Schaffung der Prozessbibliotheken hin, nennt als Alternative aber auch die interaktive Methode über den Nutzer. Es ist in den frühen Arbeiten von Retik erkennbar, dass das Ziel darin besteht, den Ablauf der Prozesse in VR zu automatisieren. Daher zielt seine Arbeit auch auf die Integration eines wissensbasierten Systems (KBES=knowledge based engineering system). Dies ist in Abb. 24 in der Mitte dargestellt. Die für die Automatisierung notwendige computerunterstützte Entscheidungsfindung hat sich im Bereich des Bauwesens und speziell bei Entscheidungen über die Produktionsfolge auf der Baustelle noch nicht durchgesetzt. Kritische Stimmen zu Expertensystemen und deren Anwendbarkeit finden sich bei [Bauch94, S. 107]. Er nennt fünf Expertensysteme im Bauwesen, die jedoch lediglich einen Prototyp-Status erreicht haben. Er bezieht sich auch auf das Baustellenleiter-Beratungssystem von Gehri [Geh92], weist jedoch darauf hin, dass dieser die Entwicklung im Laufe seiner Promotion abgebrochen hat. Retik entscheidet sich, sowohl automatisierte Funktionalitäten ('intelligent interface') in das System einzubauen als auch die manuelle Verknüpfung ('non-intelligent interface') durch den Anwender zu erlauben.

³⁰ Siehe hierzu auch 'Visual Interactive Simulation VIS' nach Hurrion [Bell95, S. 1018]

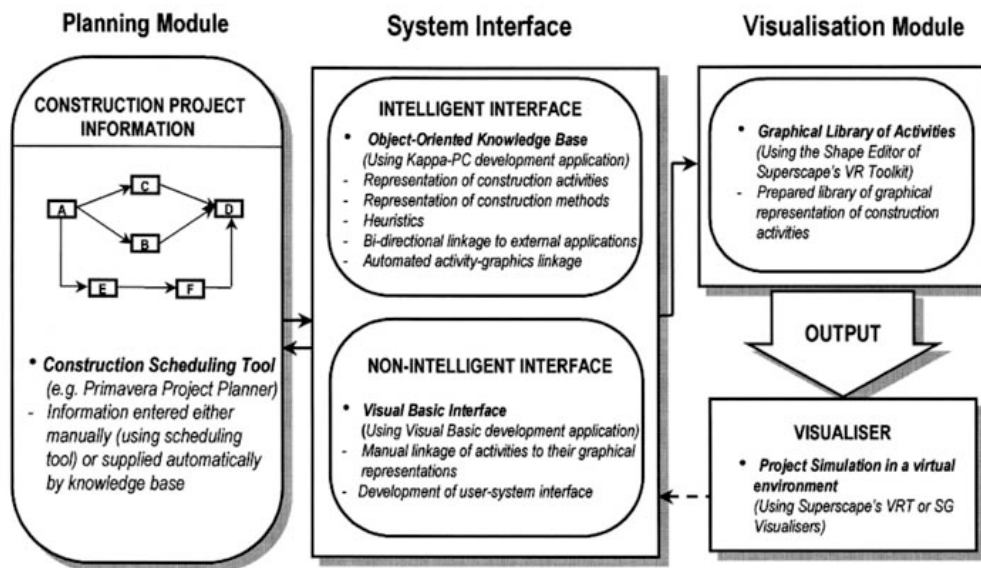


Abb. 24: Prototyp einer VR-basierten Simulationsumgebung für Baustellen, [Retik99]

Dies hat vorliegende Arbeit maßgebend beeinflusst. Diese Vorgehensweise berücksichtigt die Tatsache, dass sich nicht alle Entscheidungsprozesse auf Baustellen formalisieren lassen und lässt dem Anwender einen Freiraum für kreative Entscheidungen. Gleichzeitig bedeutet es jedoch eine Einschränkung für die computergestützte (klassische) Simulation, da diese vor allem dann Sinn macht, wenn ein spezifisches Simulationsmodell mit vielen verschiedenen Eingangsparametern durchgerechnet werden kann. Die Optimierung des Simulationsmodells steht dabei im Vordergrund. Der Begriff der Simulation muss bei der Verwendung von virtuellen Baustellen zur interaktiven Modellierung von Bauprozessen mit Bedacht verwendet werden. Retik, aber auch andere weisen darauf hin, dass sich nur repetitive Prozesse im Bauwesen automatisiert simulieren lassen [Abo99, S. 949, Halp99]. Der entscheidende Punkt bei der Betrachtung von Simulationsbausteinen ist also die Unterscheidung in repetitive und nicht repetitive Prozesse. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit der Ansatz verfolgt, repetitive Prozesse über Logikbausteine abzubilden. Die Kombination von diesen Logikbausteinen zu komplexeren Prozessketten ergibt weitere, nicht repetitive Prozesse. Diese werden über die interaktive Komponente von virtuellen Baustellenumgebungen entwickelt.

Bezüglich der Simulation weisen Chahrouf und Franz [Chah04] darauf hin, dass *'angesichts der komplexen Eigenschaften einer Baustelle gegenüber einer stationären Produktion (...) im Baubetrieb zum Teil andere Anforderungen (...) zu stellen'* sind. Sie legen ein Anforderungsprofil fest, das den Bereich der Erdbauprozesse behandelt, und stellen einen Ansatz für ein CAD-basiertes Simulationssystem vor (Abb. 25). Als Gemeinsamkeit zwischen stationärer Industrie und Bauindustrie nennen sie die Bedeutung der Entwicklung von effizienten Methoden zur optimalen Nutzung der Produktionsmittel. Als Hauptunterschied sehen sie die Ortsveränderlichkeit, die Projektdauer und die Anzahl der Wiederholungen. Sie weisen auf das Sondermerkmal der Unikatfertigung hin. Ebenso fällt die Aussage, dass analytische Methoden als zu komplex für Bauprozesse gelten und nur in speziellen Fällen in Frage kommen. Sie sehen in numerischen Lösungsmethoden wie der Simulation die einzige Möglichkeit, Bauabläufe realitätsnah, stochastisch und dynamisch zu betrachten. In diesem Punkt besteht ein Unterschied zu vorliegender Arbeit.

Chahrouf schlägt die Integration der Daten aus Vermessungsprogrammen (digitales Geländemodell) vor, um die Parameter der Baustellengeometrie mit der Simulation verknüpfen zu können. Sie möchte hiermit die CAD-Umgebung zu Simulationszwecken nutzen, weist jedoch auf die Notwendigkeit der Erweiterung der CAD-Umgebungen hin. Für die Beobachtung des Bauablaufs reichen ihr die flexibleren Petri-Netze mit der symbolischen Animation. Petri-Netze bieten zudem zahlreiche Monitoringelemente, welche wichtige Systemgrößen visualisieren und für sie die Akzeptanz der Simulation verstärken helfen.

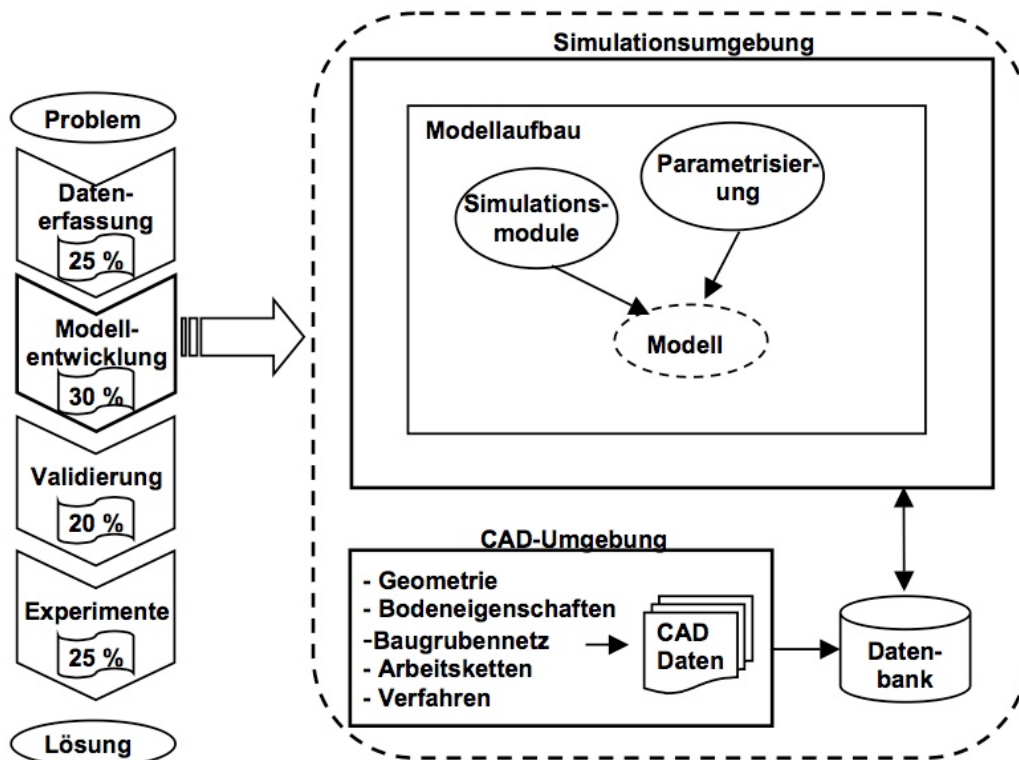


Abb. 25: Architektur der CAD-basierten Simulationsumgebung, [Chah04, S. 337]

Verbunden werden die eigenständig bleibenden Applikationen für die Simulation und für CAD über eine „Zwischenstelle,“ eine Datenbank mit den relevanten Parametern, welche vom CAD geschrieben und vom Simulationsprogramm gelesen werden. Die Arbeit von Chahrouf und Franz unterstreicht die Entwicklung hin zu integrierten Umgebungen, wo Ideen der Prozessmodellierung, Simulation und Produktmodellierung zusammenfließen.

Eine im Bereich der Wirtschaftsinformatik angesiedelte Forschungsarbeit zur `Interaktiven Geschäftsprozessmodellierung` von Leinenbach et al. [Lein99, Lein00] im Rahmen des DFG-Projektes IMPROVE analysiert die Anwendung von Virtuellen Welten bei der Erfassung und Abbildung von Prozesswissen. Die Autoren bemängeln den hohen Abstraktionsgrad bei der Anwendung von 2D-Modellierungswerkzeugen. Dieser führt dazu, dass Mitarbeiter ihr Wissen nur bedingt weitergeben können, da ihnen die Anwendung zu komplex erscheint. Ihr Vorschlag zur interaktiven Modellierung sieht vor, dass `Mitarbeiter die von ihnen verantworteten Abläufe durch Nachspielen ihrer Aktivitäten innerhalb einer Virtual Reality-gestützten Unternehmungsvisualisierung eigenständig beschreiben` [Lein99, S. 53]. Gemeinsamkeiten zu vorliegender Arbeit bestehen in der Anwendung von interaktiven Elementen durch die Anwender, in der Erfassung von Prozessparametern sowie in der Verwen-

derung einer interaktiven VR-Umgebung auf hoher Detailstufe. Die Mitarbeiter spielen Prozesse in VR interaktiv an ihrem virtuellen Arbeitsplatz unter Verwendung von Avataren durch. Die Prozesse werden protokolliert. Die protokollierten Daten werden nicht direkt ausgewertet, sondern interpretiert und in ein abstrahiertes 2D-Prozessmodell zurück überführt. Bei Leinenbach geht es im Unterschied zu vorliegender Arbeit um die Erfassung von Prozesswissen über einen VR-Client mit dem Ziel, dieses Wissen in ein abstrahiertes 2D-Prozessmodell zu übertragen. Das übertragene 2D-Prozessmodell kann dann mit verschiedenen Eingangsgrößen in einer bereits existierenden Software (hier: ARIS-Toolset von IDS Scheer) untersucht werden. Der Spielprozess kann von mehreren Anwendern durchgeführt werden. Die daraus resultierenden 2D-Prozessmodelle können dann verglichen werden. Eine Optimierung kann im Rahmen eines Business Process Reengineering stattfinden. Leinenbach verweist abschließend darauf, dass *‘VR-Aufzeichnungen der Aktionen der Mitarbeiter in Form eines Filmes die Abläufe des Unternehmens visualisieren’* [Lein99, S. 58]. Der Ansatz in dieser Arbeit sieht nicht vor, dass protokollierte Daten aus VR in ein 2D-Prozessmodell überführt werden. Stattdessen werden die gesammelten Daten direkt für Auswertungen verwendet.

2.5 Schlussfolgerungen für die eigene Arbeit

Die Analyse des Status quo bei der Spezifikation des Bau-Solls legt Potenziale zur Optimierung der Prozesse in diesem Bereich offen. Die Optimierung hat zum Ziel, einfachere Lösungen zur Bestimmung der Kosten sowie zur Ermittlung der zeitlichen Ablaufplanung zu finden. Folgende Schlussfolgerungen lassen sich im Ergebnis der Recherchen treffen:

1. Die Mächtigkeit und Komplexität bestehender computergestützter Lösungen schrecken Anwender auf Baustellen ab und verlangen nach der Entwicklung von einfachen, intuitiven Lösungen.
2. Der Eintritt in die hohe Detailstufe der Arbeitsvorgangsebene macht eine grundlegend neue Auseinandersetzung mit dem Problem der Prozessmodellierung unter Verwendung räumlicher Modelle notwendig.
3. Der ‘Blackbox’-Charakter von Softwarelösungen im Bereich der Simulation muss reduziert werden, um dem Anwender die Ergebnisse glaubhaft zu machen.

Intuitive Lösungen für den Einsatz auf Baustellen lehnen sich an den tatsächlichen realen Bedingungen vor Ort an. Bezüglich der Spezifikation des Bau-Solls kann gefolgert werden, dass heutige Methoden die projektspezifischen Randbedingungen der Bauproduktion nicht in ausreichendem Maß berücksichtigen. Dafür ist die Detailstufe bei der Betrachtung der einzelnen Arbeitsprozesse zu gering. Die positionsbasierte Beschreibung von Leistungen wird den Anforderungen an eine eindeutige und vollständige Leistungsbeschreibung nicht gerecht und unterstützt die grobe Detailstufe der Betrachtung. In Folge dessen sollten virtuelle Bauteile in Zukunft die Grundlage der Beschreibung sein. Sowohl die Ausschreibung als auch die Kostenermittlung sollten an die virtuellen Bauteile angelehnt sein. Die Bauteile, welche über das Produktmodell (=Baukasten) abgebildet werden, werden für die Spezifikation des Bau-Solls verwendet. Dafür sind geeignete Methoden zu entwickeln. Da die Realität auf Baustellen nicht wahrhaftig erprobt werden kann, muss sie virtuell simuliert werden. Die Anwendung von abstrakten 2D-Methoden zur Simulation von Prozessen bleibt im Bauwesen Experten vorbehalten. Im Bereich der zeitlichen Bauablaufplanung existieren mehrere grafische 2D-Prozessmodellierungswerkzeuge. Teilweise erlauben diese auch die Simulation und Optimierung von verschiedenen Prozessszenarien. Wesentliche Nachteile dieser Lösungen

sind der hohe Aufwand bei der Erstellung des Simulationsmodells, die eingeschränkte Wiederverwendbarkeit und die hohe Komplexität beim Entwurf realitätsähnlicher Modelle mit mehrdimensionalen Problemstellungen.

Das Vordringen auf die Detailstufe der Arbeitsvorgänge (Tages- bzw. Poliersicht) macht die Entwicklung von Werkzeugen notwendig, die mit der hohen Menge an Einzelprozessen und Parametern umgehen können. Grafische 2D-Methoden stellen keine optimale Lösung für die Abbildung von komplexen mehrdimensionalen Zusammenhängen dar. In VR ablaufende Prozesse liefern eine intuitive und einfach verständliche Entscheidungsgrundlage, damit der Mensch komplexe Entscheidungen treffen kann, die ein Algorithmus heute in vergleichbarer Qualität nicht zu treffen vermag. Bezüglich der Prozessmodellierung kann gefolgert werden, dass sich deterministische Konzepte für den kreativen Vorgang der Bestimmung eines Prozessmodells auf der Detailstufe der Bauproduktion nicht eignen, da Zusammenhänge bei Bauprozessen nicht durchgehend repetitiv sind und deshalb situativ und spontan vom Menschen bewertet werden sollten. Teilbereiche, wie z.B. Reihenfolgeprobleme oder Ressourcenoptimierungen, können dabei über existierende Algorithmen automatisiert werden, nicht jedoch der gesamte Bauproduktionsprozess auf einer Baustelle. Die Komplexität der Abhängigkeiten wäre bei einer holistischen Betrachtung zu hoch. Daher wird ein teilautomatisierter Ansatz verfolgt, bei welchem der Mensch interaktiv entscheidet, wann autonom ablaufende deterministische Prozesslogiken abgerufen werden. Die Prozessmodellierung soll am Produktmodell erfolgen und örtliche Veränderungen der virtuellen Baustelle im Zuge des Baufortschritts berücksichtigen.

Um den `Blackbox`-Charakter der abstrahierten Methoden aufzuheben, wird der Anteil an visueller Kommunikation und Interaktion maximiert. Dies erfolgt durch das interaktive Durchspielen des Bauproduktionsprozesses in einer dreidimensionalen virtuellen Baustellenwelt. Im Bereich der Produktmodellierung ist ein Trend zur Integration mit dem Prozessmodell zu beobachten. Technologische Lösungen zur integrierten Spezifikation von Produktmodellen liegen vor. Es ist in Zukunft damit zu rechnen, dass Schnittstellenprobleme sich entschärfen, da domänenübergreifende integrierte Softwarepakete aufgrund der zunehmenden Nachfrage nach kooperativen Ansätzen vom Anwender nachgefragt werden. Bestehende Methoden der 4D-Modellierung werden um einen VR-basierten Ansatz erweitert. Der Bauzeitplan wird nicht mit Bauteilen verknüpft, um die Visualisierung zu erstellen. Stattdessen werden Ressourcen, Bauteile und Prozesse interaktiv durch den Anwender disponiert, um eine Soll-Spezifikation zu definieren.

3 Anforderungen an die interaktive Modellierung

Die Schlussfolgerungen aus den Untersuchungen zur Spezifikation des Bau-Solls dienen als Grundlage zur Entwicklung eines Anforderungsprofils für einen eigenen Lösungsvorschlag. Die Anforderungen basieren auf folgenden Entscheidungen:

- Die Detaillierung bei der Modellierung der Bauproduktion ist zu grob und muss verfeinert werden, um Risiken genauer berücksichtigen zu können.
- Der Modellierungsprozess wird direkt an 3D-Modelle angelehnt, d.h. es wird weniger abstrahiert und mehr konkretisiert.
- Stochastische Einflüsse (z.B. Wetter, Krankheitsfälle, Ausfall von Maschinen usw.) auf Prozesse werden nicht betrachtet.
- Funktionsbasierten Simulationsmethoden wird gegenüber ereignisbasierten Methoden der Vorzug erteilt, da sie den Einsatz von autonomen Simulationsbausteinen besser unterstützen.
- Entscheidungen im Bauablauf werden interaktiv unter Einbezug des Menschen bestimmt.

Bei der Definition von Anforderungen werden im Folgenden zwei Bereiche unterschieden: die Funktionalitäten der virtuellen Baustellenumgebung und die Vorgehensweise bei der Spezifikation des Bau-Solls.

3.1 Funktionalitäten der virtuellen Baustellenumgebung

Um die Bauproduktion auf der Basis von interaktiven virtuellen 3D-Modellen zu modellieren, werden Anforderungen an die virtuelle Umgebung definiert. Diese umfassen die Zusammenführung von Produkt- und Prozessmodell, die Interaktion zwischen Anwender und virtueller Umgebung und die Bestimmung von Prozessparametern.

3.1.1 Zusammenführung von Produkt- und Prozessmodell

Das Produktdatenmodell als Träger der Leistungsbeschreibung muss mit der virtuellen Umgebung verknüpft werden. Da sich die Spezifikation der auszuführenden Bauleistungen direkt am virtuellen Bauteil orientiert, ist es erforderlich, dem Anwender die Informationen des Modells sukzessive zur Verfügung zu stellen. Der Import des kompletten Produktdatenmodells in einem Zug in die virtuelle Umgebung ist nicht sinnvoll, da in diesem Fall die virtuelle Durchführung der Bauproduktion – ein Bauteil nach dem anderen – nicht effektiv ist. Das Produktmodell muss als Baukasten in der virtuellen Umgebung zur Verfügung gestellt werden. Dabei werden die Bauteile des Produktmodells in eine chronologische Produktionsreihenfolge gebracht. Die Bauteilorientierung sowie die Bestimmung des Produktionsmodells werden im Folgenden näher erläutert.

Bauteilorientierung

Die Grundlagen von bauteilorientierten Ansätzen aus der Sicht des Baubetriebs wurden bereits dargelegt. Daher wird im Folgenden von der Existenz eines Bauteilkatalogs ausgegangen. Die hierarchische Gliederung der Ausschreibung in Bauteile und Bauteilgruppen ist das Ergebnis einer bauteilorientierten Ausführungsplanung. Obwohl im Produktmodell die Bauteile meist klar getrennt werden, muss berücksichtigt werden, dass einige Bauteile aus produktionstechnischer Sicht über mehrere andere Bauteile verteilt sein können. Ist dies der Fall, müssen Bauteile hinsichtlich der Fugenbildung untersucht werden. Die Abgrenzung von Bauteilen und Bauteilgruppen im Fugenbereich im Stahl- Holz- und Massivbau untersuchte

Schumann [Schum03] in einer Studienarbeit. Er stellt fest, dass im Stahl- und Holzbau die Abgrenzung einfacher möglich ist als im Massivbau, wo Bauteilgruppen nicht immer klar zuzuordnen sind, z.B. bei komplexen Bewehrungsverläufen. Ein typischer Fall für unklare Bauteilabgrenzungen im Massivbau findet sich in Abb. 26. Es laufen eine Decke, ein Unterzug und eine Stütze ineinander.

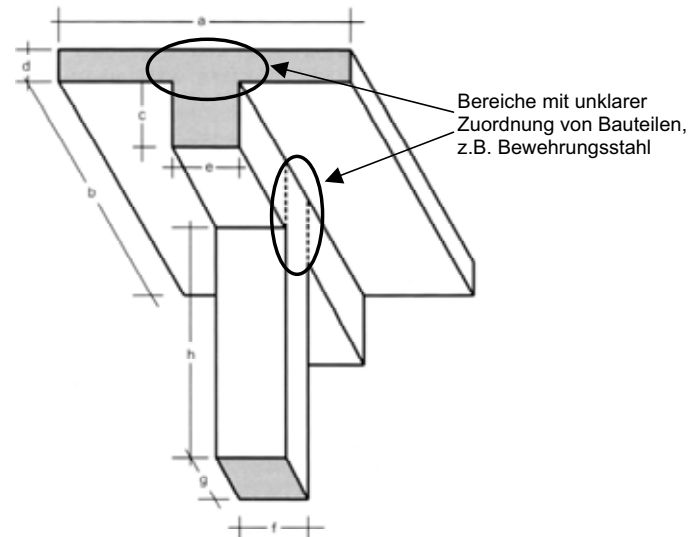


Abb. 26: Unklare Abgrenzung von Bauteilen, nach [Rösel04, S. 55]

Es ist die Aufgabe des Anwenders, die Bauteile so zu trennen, dass er sie in der von ihm vorgesehenen Folge aus dem CAD-Modell in die virtuelle Umgebung bringen kann. Dazu muss er sich aus einer Reihe ihm bekannter Bauverfahren für ein bestimmtes entscheiden. Der Herstellprozess wird beispielsweise maßgeblich beeinflusst von der Entscheidung, welche Bauteile in Ortbeton oder als (Halb-)Fertigteile angeboten werden. Werden die Bauteile in Abb. 26 eindeutig hierarchisch zugeordnet – der Stahl im Balken gehört demnach zum Bauteil Balken und kann nur einem der drei Bauteile zugeordnet werden – dann kann man die Hierarchien nutzen, um Mengen in Bauteilen und Bauteilgruppen auszuwerten. Der Anwender ordnet an den Fugen die einzelnen Bewehrungsstäbe den Bauteilen zu. Folgende Anforderungen ergeben an das Produktmodell:

- Die Bauteile werden im Bauteilkatalog vollständig über 3D und Text beschrieben. Dies verbessert die Eindeutigkeit der Leistungsbeschreibung.
- Lücken in der Ausführungsplanung werden dem Anwender visuell durch fehlende oder markierte Bauteile kommuniziert ('weiße Flecken'). Dies gewährleistet die Forderung nach der Vollständigkeit der Beschreibung.

Die Existenz von virtuellen Repräsentanten verringert das 'Übersehen' von notwendigen Prozessen. Dadurch werden Leistungen mit berücksichtigt, die bisher nicht über Positionen ausgeschrieben wurden. Die verringerte Abstraktion erlaubt eine einfache Identifikation von Risiken. Die Zahl verdeckter Risiken wird so reduziert.

Das Produktionsmodell

Zur Definition des Resultats aus der Zusammenführung von Produkt- und Prozessmodell wird der Begriff des 'Produktionsmodells' eingeführt. Das Produktionsmodell definiert sich wie folgt:

Definition: Das Produktionsmodell ist die vom Anwender vor seinem 'geistigen Auge' räumlich konzipierte verfahrenstechnische Folge der Bauproduktionsprozesse eines spezifischen Bauprojekts auf hoher Detailebene.

Das Produktionsmodell erweitert demnach das Produktmodell um die bauverfahrenstechnische Produktionsfolge und ist damit eine Kombination aus Produktmodell und Prozessmodell. Diese Definition erfolgt in Anlehnung an moderne 4D-Werkzeuge, wie zum Beispiel CommonPoint, wo 3D-Bauteile mit Vorgängen aus Balkenplänen verknüpft werden. Im Unterschied zu den bestehenden Lösungen wird im Produktionsmodell nicht nur das schlagartige 'Erscheinen' des 3D-Bauteils gezeigt. Es geht vielmehr um die Integration der Produktionsprozesse in das Modell. Das Produktionsmodell unterscheidet sich demnach von Prozessmodellen auf der Projektebene dadurch, dass es auf höheren Detailebenen (Produktionsprozess- und Arbeitsvorgangsebene) vorliegt und anwender- und projektspezifisches Wissen abbildet. Ein weiterer Unterschied ist die geringe Abstraktion des Produktionsmodells, da der Modellierer vor seinem 'geistigen Auge' nicht in Kreisen, Quadraten, Pfeilen oder Marken denkt, sondern in konkreten, an der Realität angelehnten Abläufen. Aus diesem Grund kann das Produktionsmodell nur in einer Umgebung entwickelt werden, die minimal abstrahiert ist und möglichst viele Eigenschaften der Realität besitzt. Eine solche Umgebung ist die interaktive virtuelle Baustellenumgebung.

Aus der virtuellen Umgebung erfolgt der Zugriff auf Bauteile des 3D-Modells über den Bauteilkatalog. Dabei sollte im besten Fall bereits eine hierarchische Gliederung der Bauteile erfolgt sein, damit die Bauteile und Bauteilgruppen sich leicht finden lassen. Es ist notwendig, sich nur bestimmte Bauteile – zum Beispiel ein bestimmtes Aushubvolumen – anzeigen zu lassen, wenn man den Auswahlprozess vornimmt³¹. Die Chronologie der einzelnen Produktionsprozesse wird vom Anwender spontan und situativ bestimmt und ist nicht vorbestimmt. Lediglich auf höherer Detailstufe – der Arbeitsvorgangsebene – werden in dieser Arbeit automatisierte Prozessfolgen definiert. Der Anwender wählt das herzustellende Bauteil des Produktdatenmodells aus und importiert es in die virtuelle Umgebung. Hier kann zwischen Einzelbauteilen und Bauteilgruppen unterschieden werden. Es wird darauf hingewiesen, dass Daten aus dem Produktmodell hinsichtlich ihrer Notwendigkeit in der virtuellen Umgebung gefiltert werden müssen, um die Datenmenge gering zu halten. In Abb. 27 stellt das Bauteil 1 ein Einzelbauteil dar, die Bauteile 2 bis n eine Bauteilgruppe.

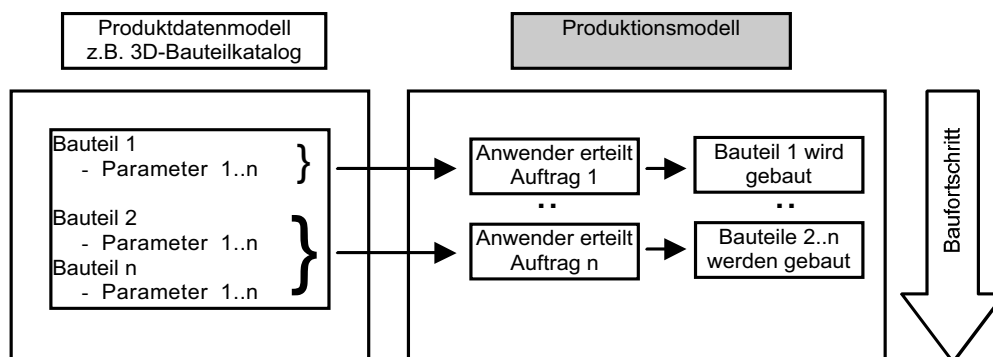


Abb. 27: Anbindung des Produktdatenmodells an die virtuelle Umgebung

³¹ Zur Zerlegung von größeren Bauteilen (z.B. Aushub) siehe [Xu03, S. 457] sowie [Abo00, S. 479]

Der Anwender nimmt bei der Erstellung des Produktionsmodells die spätere Rolle des Poliers ein, der Tagesaufträge an Kolonnen verteilt, die dann die Produktion durchführen. Das Produktionsmodell umfasst damit die Ebenen der Produktionsprozesse und Arbeitsvorgänge.

Eine erste wichtige Anforderung an die interaktive Modellierung der Bauproduktion besteht in der Spezifikation eines bauteilorientierten Produktionsmodells. Das Ergebnis des Produktionsmodells ist eine Datenbank, die alle aus den Spezifikationen des Anwenders ermittelten Parameter beinhaltet. Dazu gehören beispielsweise der Prozesstyp, die eingesetzten Ressourcen, die Dauern und die beteiligten Orte (Koordinaten) auf der virtuellen Baustelle.

3.1.2 Interaktion zwischen Anwender und virtueller Umgebung

Eine weitere Anforderung an die interaktive Modellierung in virtuellen Umgebungen ist die Interaktion zwischen Anwender und virtueller Umgebung. Die Ressourcen auf der virtuellen Baustelle werden interaktiv disponiert. In diesem Zusammenhang ist insbesondere die zeitliche Parallelität von Prozessen auf der virtuellen Baustelle von Belang. Die Entscheidungen über Zeitpunkt und Art von parallelen Prozessen werden in Anlehnung an Computerspiele spontan und situativ auf der Grundlage der visuellen Informationen von den ablaufenden Prozessen auf der virtuellen Baustelle getroffen. Damit kann die interaktive Modellierung als visuelle interaktive Simulationemethode (VIS) bezeichnet werden.

Interaktion mit Objekten der Baustelle

Poliere benötigen für das Management einer Baustelle Informationen über parallele Vorgänge außerhalb ihres Blickfeldes und müssen mit mehreren Gegenständen gleichzeitig kommunizieren können. Sie treten somit mit Arbeitern auf der Baustelle in Interaktion. Analog hierzu ergeht die Forderung, dass der Anwender mit Ressourcen auf der virtuellen Baustelle 'interagieren' soll. Im Unterschied zur realen Baustellenwelt können in VR auch Maschinen mit dem Anwender 'interagieren'³². Das Grundkonzept zur Interaktion zwischen Anwender und den Bauteilen, Ressourcen und Prozessen (Logikbausteine) innerhalb von virtuellen Baustellenumgebungen haben Bargstädt und Blickling vorgestellt [Barg04a, Barg05b]. Abb. 28 zeigt das Grundkonzept.

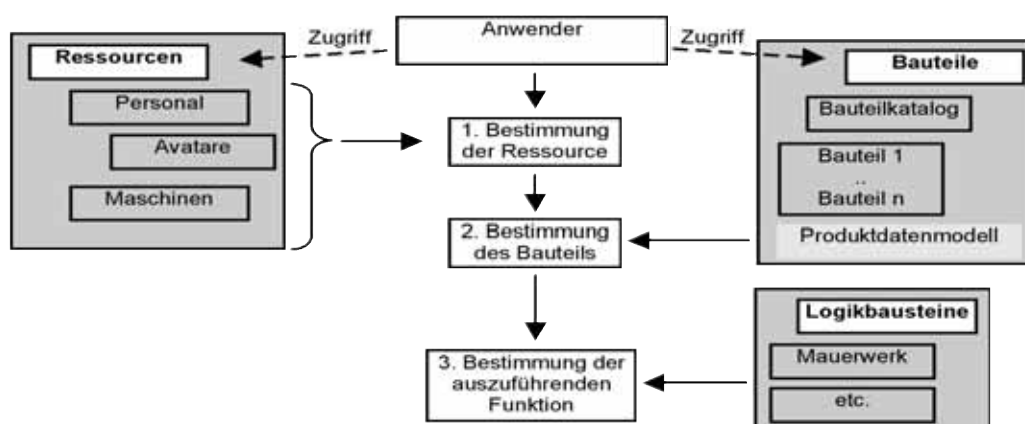


Abb. 28: Ressourcen, Bauteile und Prozesslogik, in Anlehnung an [Barg04a, S. 8]

³² Es sei auf Baumaschinen verwiesen, die über mobilfunkbasierte M2M-Einheiten (machine to machine communication) verfügen, welche zur Fernüberwachung und -wartung eingesetzt werden

Der Anwender soll die Ressourcen über Eingabegeräte wie Maus und Tastatur interaktiv disponieren. Er definiert zuerst die Ressource, dann das Bauteil und abschließend den auf das Bauteil anzuwendenden Prozess (Funktion). Zu den Ressourcen im Rahmen dieser Arbeit gehören Menschen und Maschinen. Im Folgenden werden die Anforderungen an die Interaktion mit Avataren definiert.

Interaktion mit Avataren

Alfeld [Alf88, S. 41] weist hinsichtlich der Bestimmung von Produktivitäten einzelner Individuen darauf hin, dass dies aus zwei Gründen wenig Aussicht auf Erfolg hat. Erstens ist die Erfassung der individuell durchgeführten Arbeitsprozesse schwierig, da meistens in der Kolonne gearbeitet wird. Und zum Zweiten ist mit erheblicher Gegenwehr derjenigen zu rechnen, deren Produktivität erfasst werden soll. Er schlägt die Erfassung von Produktivitäten für Kolonnen vor. Die Betrachtung von Personal erfolgt im Rahmen dieser Arbeit in Abhängigkeit vom Detaillierungsgrad der zu untersuchenden Arbeitsprozesse. Bei Arbeitsprozessen auf hoher Detailstufe kann es sein, dass lediglich ein Arbeiter zu betrachten ist. Dabei wird von anonymisierten Arbeitern ausgegangen, die ein bestimmtes Qualifikationsprofil besitzen.

Für vorliegende Arbeit sind personalorientierte Modelle nach der VDI-Richtlinie 3633 [VDI3633, Blatt 6, Punkt 1.1] relevant, welche einen höheren Detaillierungsgrad zulassen und zur Lösung spezieller Fragestellungen herangezogen werden. Die VDI-Richtlinie beschreibt diese Modelle wie folgt:

Im Vordergrund steht die Analyse bestimmter Arbeitsformen und –bedingungen (...) und deren Auswirkungen auf das Produktionsergebnis. Dies erfordert die Abbildung zusätzlicher Eigenschaften des Personals. Dabei kann es sich beispielsweise um die Analyse der Arbeitssituation, (...), der Unter- oder Überforderung, (...), der menschlichen Zuverlässigkeit und der jeweiligen Rückwirkungen auf das logistische Verhalten des Produktions- oder Logistiksystems handeln. [VDI3633, Blatt 6, Punkt 1.1]

Anhand dieser Formulierungen lassen sich folgende Anforderungen an die Interaktion mit Avataren auf virtuellen Baustellen formulieren:

- Avatare müssen in der Lage sein, nach Erteilung eines Auftrages ihre Arbeitssituation autonom zu analysieren.
- Je nach Qualifikationsprofil sollten die Ressourcen in der Regel in Entsprechung zu ihrer Ausbildung eingesetzt werden, z.B. Schalung einer Betonwand durch einen Betonbauer, Herstellung von Mauerwerk durch einen Maurer, etc. Es existieren jedoch Ausnahmen – vor allem im Mittelstand – wo einzelne Arbeiter trotz fehlender Ausbildung besonderes Talent bewiesen haben. Diese Fähigkeiten sollten in einem entsprechenden Qualifikationsprofil in der Simulation Berücksichtigung finden. Ist eine Ressource für einen bestimmten Vorgang über- oder unterqualifiziert, wird dies bei der Disposition des Auftrags angezeigt.
- Die Zuverlässigkeit wird nicht betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass die Abwesenheit von Ressourcen aus Erfahrungswerten eingerechnet wird.

Bezüglich des letzten Punktes verweist die VDI-Richtlinie 3633 auf Zülch [Zülch97]. In vorliegender Arbeit sollen Avatare zwar ein bestimmtes Qualifikationsprofil besitzen, jedoch frei von Bewertungen sein. Zur Zuordnung von Personal zu Arbeitsprozessen in komplexen Produktionssystemen empfiehlt die VDI-Richtlinie entweder die interaktive Methode durch den

Anwender oder die Anwendung des Konzepts der 'intelligenten' Agenten [VDI3633, Blatt 6, Punkt 4.1]. Nachteile hiervon sind nach VDI, dass sich die Simulationsexperimente nur noch schwer vergleichen lassen und die Zuordnung der Veränderung eines Modellparameters zur Veränderung einer Ergebnisgröße kaum möglich ist. Die Anwendung von Agenten zur Beschreibung von Verhaltensmustern war laut VDI bei den damals (2001) verfügbaren Werkzeugen mit sehr hohem Aufwand verbunden.

3.1.3 Bestimmung von Prozessparametern

Für die vorliegende Arbeit ist die Frage nach der Methode zur Erfassung der Prozessparameter in der virtuellen Umgebung von Relevanz, da die ermittelten Parameter das gespeicherte Wissen der Anwender darstellen. Je nach Definition der Parameter können unterschiedliche Auswertungen vorgenommen werden. Da nicht alle Parameter im Einzelnen berücksichtigt werden können, wird der Schwerpunkt auf die Bestimmung von individuellen Prozessdauern und -typen auf der Detailstufe der Arbeitsvorgänge gelegt. Aus diesen beiden Parametern lassen sich sowohl Einzelkosten für Lohn und Gerät als auch der zeitliche Bauablauf ermitteln.

Das Prinzip zur Erfassung der Dauern lehnt sich an eine computerbasierte Stoppuhr an. Die Prozessdauern sollen individuell für die Bauteile oder Bauteilgruppen auf der Basis des Produktionsmodells ermittelt werden. Die Prozessstypen können im Rahmen der Definition der Prozesslogiken (Funktionen) definiert werden. Sie werden dann automatisch bei Aufruf einer Funktion mitgeschrieben. Aus Abb. 27 und Abb. 28 lässt sich Abb. 29 wie folgt ableiten:

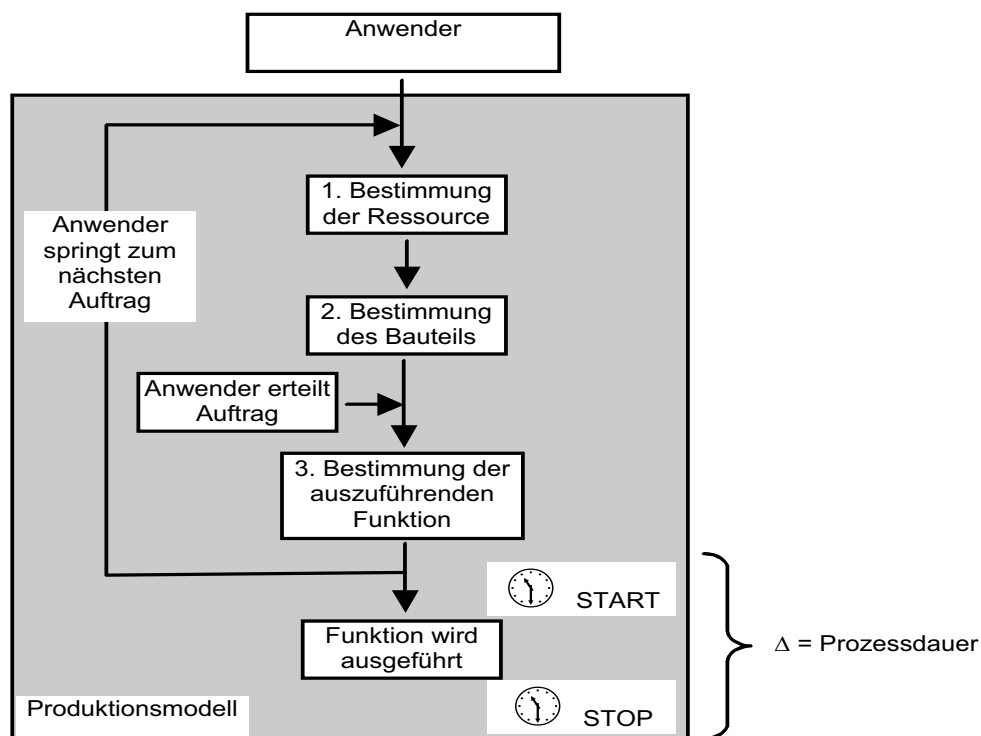


Abb. 29: Ermittlung der Prozessdauern und -typen durch den Anwender

Nach Abb. 29 bestimmt der Anwender interaktiv in der virtuellen Umgebung eine Ressource (Avatar oder Maschine), die ein bestimmtes Bauteil bearbeiten soll. Danach wählt er das Bauteil oder die Bauteilgruppe aus. Zuletzt bestimmt er die Funktion (Prozesslogik, Verfah-

ren), welche unter Beteiligung der Ressource und des Bauteils oder der Bauteilgruppe ausgeführt wird. Wenn der durch die Funktion ausgelöste Prozess gestartet wird, kann auch die Erfassung der Parameter starten. Dieser Grundalgorithmus sorgt für die Erfassung von Prozessstypen und -dauern. Hat der Anwender einen Auftrag vergeben, schreitet er zur nächsten Ressource, um diese mit einem Auftrag zu betrauen. Dieser Prozess wird so oft durchlaufen, bis alle Ressourcen mit Aufträgen versorgt sind. Die Methode resultiert beim Einsatz mehrerer Kolonnen in zeitlich parallel ablaufenden Prozessen auf der virtuellen Baustelle. In Abhängigkeit der Verfahrenslogiken mit vordefinierten Orten in den parallel ablaufenden Aufträgen kann es zu Überschneidungen von Wegen oder zur doppelten Anfrage von nur einmal verfügbaren Ressourcen (z.B. Kran) kommen. Der Anwender muss aufgrund des visuellen Feedbacks von der virtuellen Baustelle die Entscheidungen in der Prozessfolge so treffen, dass diese Konflikte möglichst vermieden werden. Dazu kann er einmal begonnene Prozessfolgen auf der Zeitleiste wieder rückgängig machen und einen anderen Pfad einschlagen. Er trifft somit Entscheidungen über Varianten interaktiv.

Situative Bestimmung von Prozessdauern

Die Möglichkeit der Verwendung von vordefinierten Dauern (z.B. nach REFA) für bestimmte Arbeitsvorgänge beschleunigt die interaktive Modellierung der Bauproduktion. Die Verwendung von Standardwerten ist insbesondere bei Prozessen sinnvoll, die immer wieder ähnlich auf Baustellen ablaufen. Dazu gehören ortsunabhängige Prozesse auf hoher Detailebene, z.B. einen Stein aufnehmen (Arbeitsvorgangsebene). Im Kontrast hierzu stehen die Prozesse der Projektebene, die in der Planungsphase in einem heute üblichen Bauablaufplan zwar mit ihren Dauern chronologisch eingeordnet werden, aber in der Ausführungsphase sehr stark von situativen Randbedingungen abhängen. Diese Arbeit verfolgt den Ansatz, die Entscheidungssituation auf der realen Baustelle über die virtuelle Baustelle abzubilden. Der Anwender soll die Bauprozesse so durchspielen, wie sie seiner Meinung nach in der Realität ablaufen könnten. Er soll dabei auf der virtuellen Baustelle auf Situationen treffen, die sich eventuell auch so in der Realität einstellen würden und die aufgrund ihrer Komplexität im Vorfeld nicht determinierbar sind. Auf diese Situationen wird er in Abhängigkeit seines technischen und organisatorischen Wissens über Baustellen entsprechend mit interaktiven Entscheidungen reagieren und damit individuelle Spezifikationen im Produktionsmodell festlegen. Diese individuellen Entscheidungen führen zu individuellen Parametern und damit zu individuell bestimmten Kosten. Der persönliche Bezug des Anwenders zur gestellten Aufgabe wird so gewährleistet. Er wird in der Regel seiner eigenen fachlichen Einschätzung die höchste Bedeutung einräumen. Bei Bedarf kann er auf bestehende mathematische Lösungsalgorithmen zurückgreifen, z.B. den Simplex-Algorithmus³³ zur Bestimmung optimaler Reihenfolgen bei mehreren ähnlichen Bauteilen.

Eine Gegenüberstellung der konventionellen Bestimmung von Prozessdauern mit Standardwerten und der Vorgehensweise in virtuellen Baustellenumgebungen mag verdeutlichen, wie der Prozess der situativen Bestimmung von Prozessdauern abläuft (Abb. 30). Der Vorteil bei der situativen Bestimmung von Prozessdauern liegt in der Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten auf der virtuellen Baustelle zum Zeitpunkt der Disposition eines neuen Auftrags durch den Anwender. Es ist wichtig, dass das virtuelle Modell der realen Baustelle möglichst realitätsgetreu beschrieben (ausgeschrieben) ist. Hintergrund ist die These, dass

³³ Siehe [Gehb72, S. 229]

der Anwender zum Zeitpunkt der Soll-Spezifikation auf der Basis der ihm vorgelegten Informationen situative Annahmen trifft, die konkreten Einfluss auf die Prozessdauern haben. Haben sich diese Annahmen zu einem späteren Zeitpunkt als falsch erwiesen, kann das anhand von Analysen genau nachvollzogen werden.

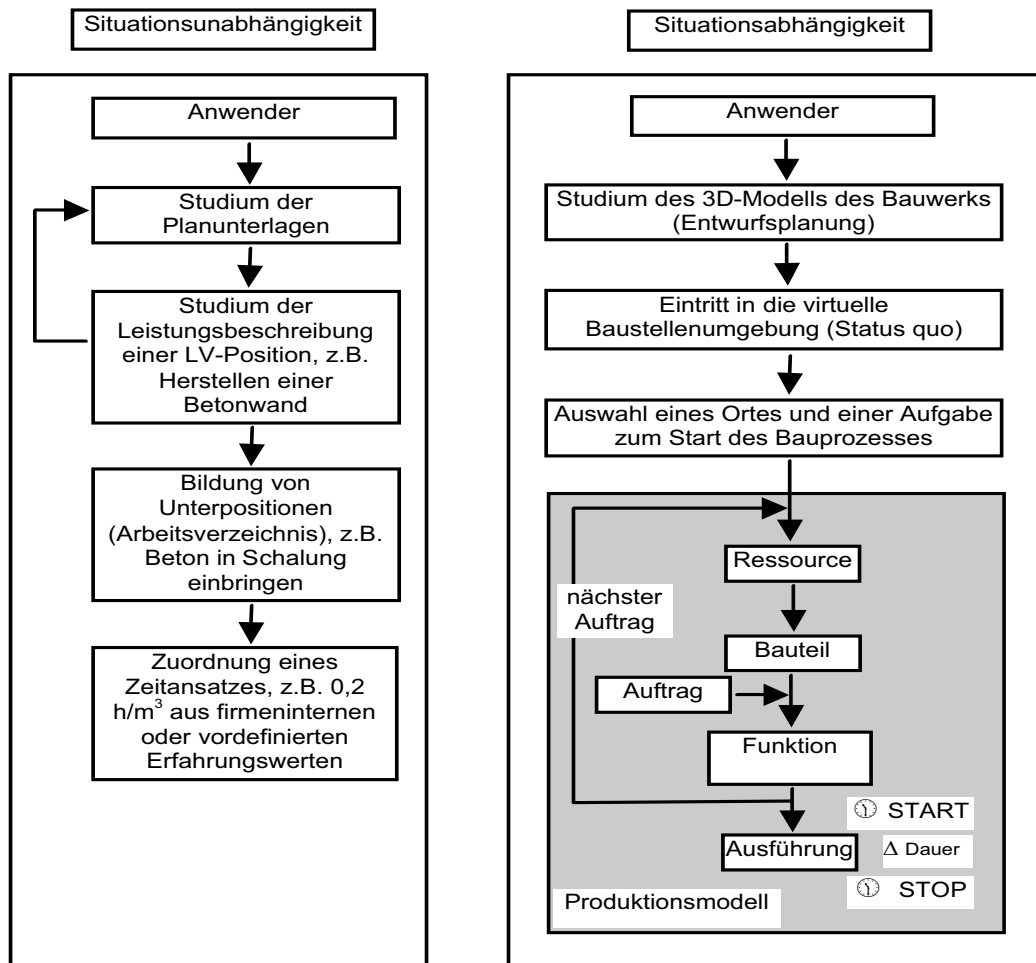


Abb. 30: Konventionelle und situative Bestimmung von Prozessdauern

Dies ist bei der situationsunabhängigen Methode mit vordefinierten Werten nicht möglich, da die ermittelte Prozessdauer nicht mit einem konkreten Prozess verknüpft ist. Die Bestimmung von situativen Prozessdauern hängt auch mit dem Einsatz von Agenten auf der Baustelle zusammen. Da Agenten autonom handeln, können Randbedingungen auf der Baustelle (z.B. der Ort des Mörtels) verändert werden, ohne dass der Anwender einen neuen Auftrag vergeben muss. Die Objekte passen sich den neuen Randbedingungen automatisch an. Dadurch ändern sich die Prozessdauern. Der Zeitpunkt der Veränderung der Randbedingungen durch den Anwender kann nicht vorhergesehen werden.

3.2 Vorgehensweise bei der Spezifikation des Bau-Solls

Neben den Anforderungen an die virtuelle Umgebung der Baustelle werden auch besondere Anforderungen an die Methode zur Spezifikation des Bau-Solls gestellt. Dazu werden Orte und Wege auf der virtuellen Baustelle näher erläutert. Ebenso ergehen Anforderungen an die interaktive Prozessmodellierung.

3.2.1 Orte und Wege auf der virtuellen Baustelle

Die interaktive Modellierung der Bauproduktion postuliert die Berücksichtigung von örtlichen Randbedingungen auf der virtuellen Baustelle. Es wird gefordert, dass der Anwender zeitlich parallel ablaufende Aufträge erteilt, die von verschiedenen Kolonnen an verschiedenen Orten der Baustelle durchgeführt werden. Der Anwender disponiert Kolonnen unter Zugriff auf den Personalstamm des Projektes (Abb. 31). Die Kolonnen begeben sich wie in der Realität über sich ändernde Wege zu ihrer Arbeitsstelle.

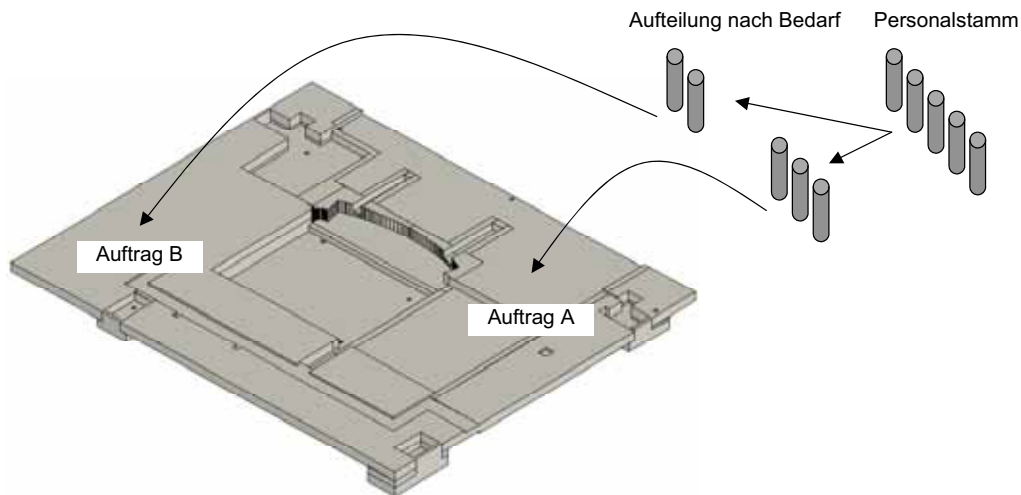


Abb. 31: 3D-Modell einer Fundamentplatte als 'Spielwiese' des Anwenders

Die Abarbeitung der Aufträge soll gleichzeitig erfolgen, nachdem der Anwender chronologisch die einzelnen Aufträge verteilt hat. Die Aufträge basieren auf vordefinierten Prozessfolgen (Funktionen), die ein spezifisches Bauverfahren abbilden. Diese Verfahren können an Produkte gebunden sein, da bestimmte Produkte ein spezielles Bauverfahren verlangen, z.B. im Rahmen der Produktempfehlungen durch die Hersteller. Ebenso beinhalten die Funktionen Ortsangaben der virtuellen Baustelle. Zur Vereinfachung können Referenz-Orte definiert werden, die auf Baustellen immer wieder vorzufinden sind und die vom Anwender bewegt werden können. Orte kommunizieren mit dem Anwender, indem sie bei Kontakt visuelle Signale senden, z.B. eine Farbänderung. Die Implementierung solcher Orte für ein Beispiel aus dem Mauerwerksbau hat Gärtner in seiner Studienarbeit [Gaert05] mit einer Game-Engine umgesetzt. Diese Orte können z.B. wie folgt definiert sein:

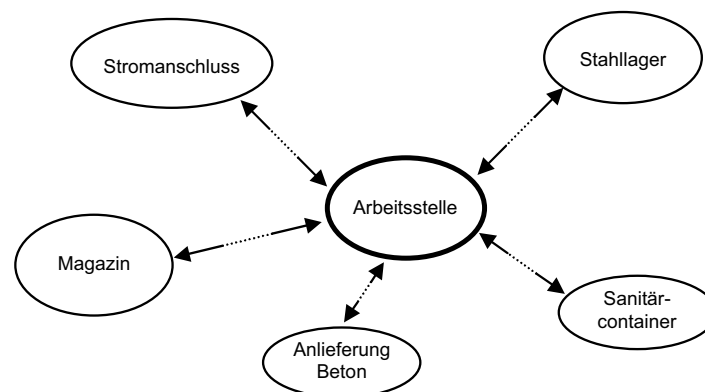


Abb. 32: Referenz-Orte mit variablen Entfernungen

Die Arbeitsstelle spielt eine wichtige Rolle, da sie den Ort darstellt, zu welchem sich Ressourcen nach Erteilung des Auftrags begeben. Dieser Ort kann interaktiv durch den Anwender oder automatisch ermittelt werden. Eine Methode zur interaktiven Bestimmung von Orten hat Beissert im Rahmen einer Studienarbeit [Beiss04] in einer Game-Engine exemplarisch implementiert. Bei der interaktiven Methode ist die Bestimmung der Dauer zum Zurücklegen des Weges erst möglich, wenn der Anwender die Position des Ortes mit der Maus bestimmt hat. Die örtliche Verteilung der Arbeit von mehreren Kolonnen ist nicht deterministisch, sondern wird interaktiv vom Anwender je nach aktuellem Bedarf auf seiner virtuellen Baustelle bestimmt. Orte und Wege spielen auf realen Baustellen eine wichtige Rolle, da die Effektivität des eigentlichen Produktionsprozesses von ihnen abhängt. Blecken verweist in diesem Zusammenhang auf eine Studie zu Wegzeitmessungen, nach der 25-35 % der Grundzeit von Arbeitskräften auf Weganteile entfallen, die 2-3 m vom Bauwerk wegführen [Bleck84, S. 112].

Die Relevanz von Orten und Wegen soll am Beispiel eines zentralen Stahllagers verdeutlicht werden. Wird einer Kolonne der Auftrag erteilt, Bewehrung in eine einseitig geschaltete Betonwand einzubauen, dann schildert sich das Procedere wie folgt:

Der Anwender	Autonome Prozesse der Ressourcen
<ul style="list-style-type: none"> • bestimmt die Avatare • bestimmt die Bauteilgruppe 'Bewehrung der Wand' • ruft Funktion 'Bewehrung herstellen' auf 	<ul style="list-style-type: none"> • Prüfungsroutinen: <ul style="list-style-type: none"> • Suche und Lokalisierung der Bauteile • Kolonne erteilt Auftrag an Kran: Transport zur Wand • Klärung der Zuständigkeit für das Anschlagen • Transport zur Wand • Provisorische Animation des Aufbaus der Bewehrung

Tab. 8: Vorgehensweise beim Erteilen eines Auftrags zur Erstellung von Bewehrung

Die Wichtigkeit des Ortes des Stahllagers wird ersichtlich, wenn man die unterschiedlichen Möglichkeiten für den Prozess 'Anschlagen' betrachtet. Ist der Weg zum Stahllager leicht zugänglich und kurz, dann wird der Prozess des Anschlagens ebenfalls kurz sein und ein Mitglied der Kolonne sollte selbst anschlagen. Ist der Weg zum Stahllager schwer zugänglich und weit, sollte vermieden werden, dass ein Mitglied der Kolonne den Weg zurücklegen muss, nur um die Stahlteile anzuschlagen. Die Beauftragung eines Avatars in der Nähe des Stahllagers wäre sinnvoll. Bei Verfügbarkeit der Stahlteile nahe bei der Wand kann die Prozessdauer des Setzens der Stahlteile an die Schalung über vordefinierte Dauern berechnet werden, da kaum mit Störgrößen zu rechnen ist.

Die Definition von Wegen auf Baustellen sollte in der Komplexität und hinsichtlich des Einflusses auf die Effizienz der Arbeitsprozesse nicht unterschätzt werden. Bei Großbaustellen ist es die Aufgabe des Poliers, für sichere und effiziente Wege zu und unter den Arbeitsstellen zu sorgen. Die Wege können als 3D-Objekte ähnlich einem Markierungsband als Splines vom Anwender definiert und wieder entfernt werden. Die Nutzung von Wegen durch Avatare kann automatisiert werden. Im Gegensatz zu vorherigen Ansätzen [Schopb02, S. 138-140] wird in dieser Arbeit die Definition von Orten und Wegen spontan und interaktiv durch den Anwender vorgenommen.

3.2.2 Interaktive Modellierung und Zeitsprünge

Prozessmodelle können heute für einige Problemkomplexe im Bauwesen sinnvoll automatisiert werden, solange die Abhängigkeiten unter den Prozessen, Ressourcen und Bauteilen klar definierbar sind und die Anzahl der Varianten überschaubar bleibt. In diesen Fällen kann ein Simulationsmodell entwickelt werden, welches diese Abhängigkeiten berücksichtigt. Die Abhängigkeiten lassen sich für repetitive Prozesse definieren. Auf der Projektebene sind die Abhängigkeiten aufgrund der komplexen Zusammenhänge und der zahlreichen Varianten nicht repetitiv. Über Algorithmen gefällte Entscheidungen können in einem Projekt Sinn machen, in einem anderen jedoch unsinnig sein. Die situative Entscheidung über die Folge von Bauprozessen auf Projektebene kann in den meisten Fällen vom Menschen besser getroffen werden. Um nicht auf automatisierbare Prozessabläufe verzichten zu müssen, wird im Folgenden ein kombinierter Ansatz aus computerunterstützter und interaktiver Entscheidungsfindung verfolgt. Algorithmen entscheiden dort, wo sie es gut können – auf der Detailstufe der Arbeitsvorgangsebene. Der Anwender entscheidet dort, wo die menschliche Denkkraft zahlreiche und komplexe Zusammenhänge schnell und situativ bewältigen muss – auf der Detailstufe der Projektebene.

Entscheidungsunterstützung und Zeitsprünge

In vorliegender Arbeit wird versucht, menschliche und computerunterstützte Entscheidungsfähigkeit miteinander zu kombinieren. Dazu muss untersucht werden, welche Prozesse computerunterstützt und welche vom Menschen entschieden werden können. Das Ziel sollte sein, möglichst viele Entscheidungen automatisiert treffen zu lassen, um den Zeitaufwand für die interaktive Modellierung minimal zu halten. Eine Interaktion wird dann notwendig, wenn eine Situation auftritt, die eine Ressource nicht autonom beherrscht (z.B. Nichterreichen eines Betriebsmittels) oder wenn ein Auftrag abgewickelt ist und die Ressource sich frei meldet. Die Simulation läuft dabei wie folgt ab:

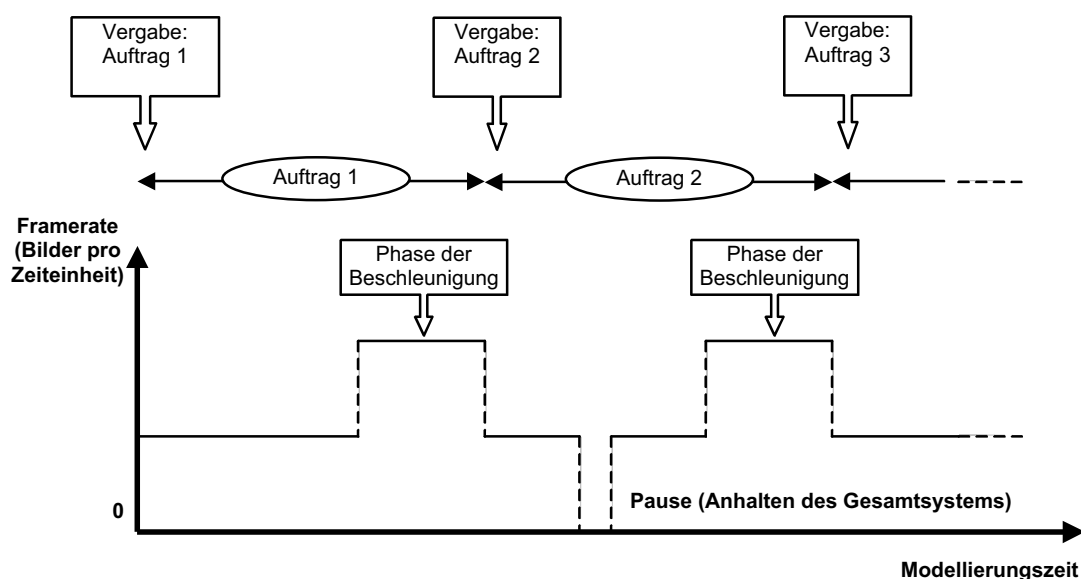


Abb. 33: Interaktive Eingriffe und Zeitsprünge in der Prozessfolge

Ein Problem der interaktiven Modellierung liegt im Verhältnis zwischen Detailstufe und Dauer der Modellierung. Ein 4D-Modell kann bereits trotz der groben Detailstufe eine beachtliche

Dauer erreichen. Wendet man die interaktive Modellierung nur in Echtzeit an, hat man einen detaillierten Überblick über die Entwicklung des Baufortschritts. Es ist inakzeptabel, dass Projekte erst in Echtzeit simuliert werden, bevor sie gebaut werden können. Der Anwender muss den zeitlichen Ablauf von Vorgängen manuell beschleunigen können (Zeitsprung).

Zur Lösung dieser Problematik muss die Forderung nach Zeitsprüngen aufgestellt werden. Es ist notwendig, dass der Anwender den Ablauf der virtuellen Zeit beschleunigt, ohne dabei Arbeitsvorgänge auf hoher Detailstufe zu überspringen. Der Idealfall wäre, wenn die Ressourcen die Bauleistungen von Anfang bis Ende automatisch abwickeln könnten. Dieser Weg wird jedoch aufgrund der komplexen Struktur der Entscheidungen im Bauablauf nicht eingeschlagen. Stattdessen soll der Anwender nach dem Verteilen von Aufträgen die Möglichkeit erhalten, die Geschwindigkeit der ablaufenden Prozesse zu beschleunigen, bis ein erneuter Eingriff durch ihn notwendig wird. Es soll auf jeden Fall möglich sein, die beschleunigten Prozesse auch in Echtzeit nachzuvollziehen. Dazu kann die Geschwindigkeit der berechneten Bilder in der virtuellen Umgebung erhöht und so der Ablauf der Zeit beschleunigt werden. Hat der Anwender keinen Bedarf an visuellem Feedback von der virtuellen Baustelle, beschleunigt er die Modellierungszeit.

3.2.3 Verhaltenslogik von Objekten

Das Verhalten von Objekten auf der virtuellen Baustelle kann in Anlehnung an die Realität mit vordefinierten 'realitätsähnlichen' Verhaltenslogiken abgebildet werden. Im Folgenden sollen die Begriffe interne und externe Verhaltenslogik erläutert werden.

Definition 'Interne Verhaltenslogik': Die Verhaltenslogik bezieht sich auf das Objekt selbst; beschrieben werden nur Verhaltensweisen, die ohne Bezug zu anderen Objekten auftreten; Bei einem Bagger sind dies die Grundfunktionen z.B. Fahren, Drehen oder Heben. Am Beispiel Avatar sind dies Gehen, Stehen usw.

Ein Beispiel für interne Verhaltenslogik ist die Simulation von 'Schwerkraft'. Die interne Verhaltenslogik eines Objekts ist von den bei der interaktiven Modellierung am Objekt gewählten Prozesslogiken unabhängig, d.h. sie gilt immer. Vor allem physikalisches Verhalten wird über interne Verhaltenslogiken abgebildet.

Definition 'Externe Verhaltenslogik': Die Verhaltenslogik bezieht sich auf die Interaktion des Objekts mit anderen Objekten; beschrieben werden Verhaltensweisen des Objekts mit anderen Objekten. Am Beispiel Bagger sind dies Fahren auf dem Untergrund oder Entleeren über einem LKW. Am Beispiel Avatar sind dies Stein heben, Stein setzen oder Wand mauern.

Externe Verhaltenslogiken sorgen dafür, dass Objekte sich anderen Objekten gegenüber autonom verhalten können. Erhält ein Bagger den Auftrag, einen LKW zu beladen, dann sollte er dies ohne weiteren Eingriff des Anwenders ausführen können. Dazu muss das Verhalten zwischen Bagger und LKW abgebildet werden. Zu dieser Abbildung gehören beispielsweise Regeln über die Positionierung des Baggers beim Leeren der Schaufel. Andere Logiken wie 'Kollision' erfordern bei hoher Detailebene auf virtuellen Baustellen ein genaues Hinsehen. Ein Rüttler kann beispielsweise in Frischbeton eindringen, aber nicht in abgebindenen Beton. Die Begehung von verdichtetem Frischbeton ist nicht möglich.

Ein weiterer Faktor bei der Erteilung von Aufträgen ist die Frage, ob die Prozesslogik aus einem Auftrag wiederverwendbar ist. Es gibt bei jedem Bauwerk Leistungen, die einzigarti-

gen Charakter haben. Als Beispiel mag die individuelle Ausgestaltung der Oberfläche einer Betonwand mit speziell angefertigten Mustern (Schablonen) dienen. Da das zur Anwendung kommende Prozessmuster nur wenig Aussicht auf Wiederholung hat, lohnt sich die Entwicklung von Logikbausteinen nicht. Daher müssen Funktionalitäten in den Prozess der Modellierung eingebaut werden, die eine manuelle Definition von spezifischen Parametern für Einzelprozesse ermöglichen. Diese Schätzungen sind für Prozesse geeignet, die keine Kostentreiber darstellen. Würden demnach Verfahren angewandt, welche eine bautechnische Neuerung darstellen und die noch nicht über Logikbausteine abgebildet wurden, dann ist die Entwicklung einer Logik bei größeren Bauprojekten lohnenswert. Es ist vorstellbar, dass der Anwender zur Entwicklung neuer Logikbausteine einen Referenzprozess einmalig durchspielt und dieser in der Prozessbibliothek zur Wiederverwendung abgespeichert wird.

Für die vorliegende Arbeit müssen sowohl interne als auch externe Verhaltenslogiken für Objekte auf virtuellen Baustellen entwickelt werden. Dazu müssen spezielle Bauverfahren als Systeme der Bauproduktion abgebildet werden. Die schwierigste Aufgabe besteht darin, Prozesse in diesen Verfahren zu identifizieren, um sie anschließend hinsichtlich von logischen Zusammenhängen zu beschreiben. Dazu muss das produktionstechnische System abstrahiert werden. In sich abgeschlossene Systeme sind dann unabhängig von anderen Sequenzen im Bauablauf und können eigenständig ablaufen. Da autonome Systeme sich je nach untersuchtem Bauverfahren erst ab einer bestimmten Detailstufe identifizieren lassen, müssen Untersuchungen im Einzelfall klären, wie Logiken bei unterschiedlichen Bauverfahren am besten abgebildet werden können. Im Rahmen dieser Arbeit können nur wenige vereinfachte Einzelfälle berücksichtigt werden, um das prinzipielle Vorgehen zu dokumentieren. Ein solches Vorgehen wird im folgenden Beispiel geschildert, um die Anforderung an die Abbildung von produktionstechnischen Systemen zu definieren.

Beispiel Schalungssystem

Die Bedeutung der Detaillierung bei den Systemen der Bauproduktion wird an einem vereinfachten Beispiel aus dem Schalungsbau verdeutlicht (Abb. 34). Gegeben sind zwei Betonkörper (eine I-Form und eine U-Form) auf einer horizontalen Fläche. Zur Schalung der I-Form wird das Produktionssystem 'Schalung freistehende Wand auf ebener Fläche' definiert. Dieses sieht eine Prozesslogik mit vier Schritten vor: Schalung stellen, Bewehrung verlegen, Schalung schließen, beide Stirnseiten schließen. Bei der U-Form stellt sich die Frage, ob das Produktionssystem der I-Form angewendet werden kann. Die U-Form besteht aus drei aneinander gefügten I-Formen.

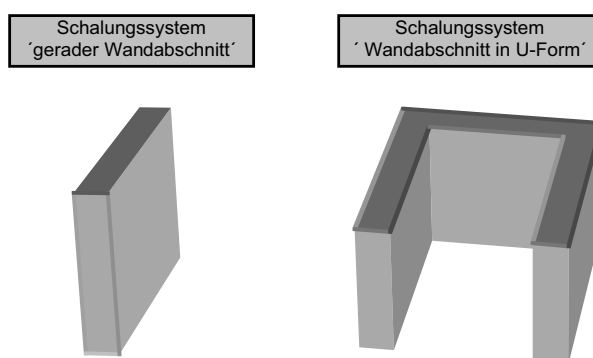


Abb. 34: Abtrennung von baubetrieblichen Produktionssystemen

Erteilt der Anwender nun einer Kolonne den Auftrag, die I-Form zu erstellen, kann er sich für ein eindeutiges Produktionssystem entscheiden und die Kolonne sollte autonom arbeiten. Bei der U-Form sind das Produktionssystem und die Reihenfolge für die Kolonne nicht eindeutig. Es stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung: a) alle Wände einzeln b) eine L-Form und eine einzelne Wand c) die ganze U-Form oder andere. Selbst wenn die Variante a) gewählt wird, kann das System der I-Form nicht komplett angewendet werden, da es – wenn man die parallelen Wände zuerst bearbeitet – maximal zwei Wände gibt, bei welchen die beiden Stirnseiten geschlossen werden müssen. Es stellt sich die Frage, ob Schritt 4 ('beide Stirnseiten schließen') notwendig ist. Fügt man ihn ein, ist die Verwendung des Systems eingeschränkt. Lässt man ihn weg, wird die Detailstufe im Modellierungsprozess größer.

Das Beispiel zeigt, dass es bestimmte Bauverfahren gibt, die sich über Systeme abbilden lassen. Dies zeigt sich im Schalungsbereich durch softwarebasierte Schalungswerkzeuge. Diese bieten eine genaue Ermittlung der Stückzahl der Schalungsteile für bestimmte Wandgeometrien. Diese Werte können auf virtuellen Baustellen für intelligente Agenten nützlich sein, um die entsprechenden Schalungsteile für die Arbeitsstelle beim Kran anzufordern. Der Anwender soll letztlich über die Verwendung eines Systems für eine gröbere Detailstufe (Produktionsprozesse) oder über die Verwendung von Einzel-Logiken für eine hohe Detailstufe (Arbeitsvorgänge) entscheiden. Letztere können sehr zeitaufwendig sein, da viele Ressourcen und Bauteile mit Prozesslogiken verknüpft werden müssen. Der Detaillierungsgrad der einzelnen Prozesslogiken muss für verschiedene Bauverfahren getrennt untersucht und optimiert werden. Einzelne Prozesslogiken auf hoher Detailstufe können zu wieder verwendbaren Produktionssystemen auf grober Detailstufe kombiniert werden, um den Anwender zu entlasten und um die Ressourcen autonomer zu machen.

3.3 Zusammenfassung der Anforderungen

In Tab. 9 werden die Anforderungen an die interaktive Modellierung der Bauproduktion zusammengefasst. Insbesondere die Definition von Logikbausteinen gilt als sehr komplex und kann in dieser Arbeit nur vereinfacht behandelt werden, da der Schwerpunkt auf der Interaktion im Modellierungsprozess und auf der Erfassung von Prozessparametern liegt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden daher exemplarische und einfache Verfahrenslogiken verwendet.

Betrifft die	Anforderungen
Virtuelle Baustellenumgebung	<ul style="list-style-type: none"> • Bauteilorientierung • Sukzessiver Zugriff auf Bauteile des Produktmodells • Definition des Produktionsmodells • Interaktion mit Objekten der Baustelle • Situative Bestimmung von Prozessdauern
Spezifikation des Bau-Solls	<ul style="list-style-type: none"> • Definition von Orten und Wegen • Interaktive Entscheidungsunterstützung und Zeitsprünge • Entwicklung von Logikbausteinen

Tab. 9: Anforderungen an die interaktive Modellierung der Bauproduktion

Die Anforderungen in Tab. 9 betrachten Aspekte, die im Lösungsteil dieser Arbeit Berücksichtigung finden. Sie wurden auf der Grundlage baubetrieblicher Überlegungen formuliert.

4 Theoretischer Lösungsansatz

Die Grundidee zur Entwicklung eines Lösungskonzeptes für die interaktive Modellierung gründet auf Herangehensweisen, wie sie aus der Computerspielentwicklung bekannt sind. Es werden Funktionalitäten von interaktiven virtuellen Welten (VR-Umgebungen) als Grundlage für die virtuelle Baustellenumgebung zu Grunde gelegt. Dazu gehören:

- Bewegungen und Aktionen innerhalb virtueller Umgebungen in angenäherter Echtzeit
- Interaktion mit den Objekten in der virtuellen Umgebung in Echtzeit
- Teilweise autonomes intelligentes Verhalten der Objekte in Anlehnung an die Realität

VR-Umgebungen erlauben den Aufbau von Logiken und autonomem Verhalten von Objekten mit grafischen Programmiermethoden. Es können so Rahmenkonzepte für interaktive Modelle und Simulationen auf hoher Detailstufe entwickelt werden. Die Nutzung von interaktiven Methoden zur Modellierung mit dem Zweck, den zeitlichen Ablauf in einer virtuellen Realität zu visualisieren, ist aus technischer Sicht heute möglich. In der Bauprozessforschung wird VR heute für Visualisierungen in Echtzeit verwendet. Die Interaktion mit Objekten auf virtuellen Baustellen zur Steuerung von Prozessen ist jedoch ein wenig erforschtes Gebiet.

Die Architektur des Lösungsansatzes ist in Abb. 35 dargestellt. Aus den drei Komponenten Bauteile, Ressourcen und Logikbausteine (Prozesse) entwickelt der Anwender nach persönlichem Ermessen spontan eine Folge von automatisch ablaufenden Prozesslogiken. Die Automatik der Prozesslogiken ist in den Logikbausteinen vordefiniert. Diese bilden jedoch nur eine Auswahl der verfügbaren Bauverfahren ab. Produktionsverfahren für den Einzelfall müssen vom Anwender individuell bewertet werden. Die Parameter der vom Anwender entwickelten Prozessfolge werden in eine Prozessdatenbank geschrieben, um bei anderen Projekten im Rahmen der Entwicklung der Prozessfolge als Anhaltspunkte dienen zu können.

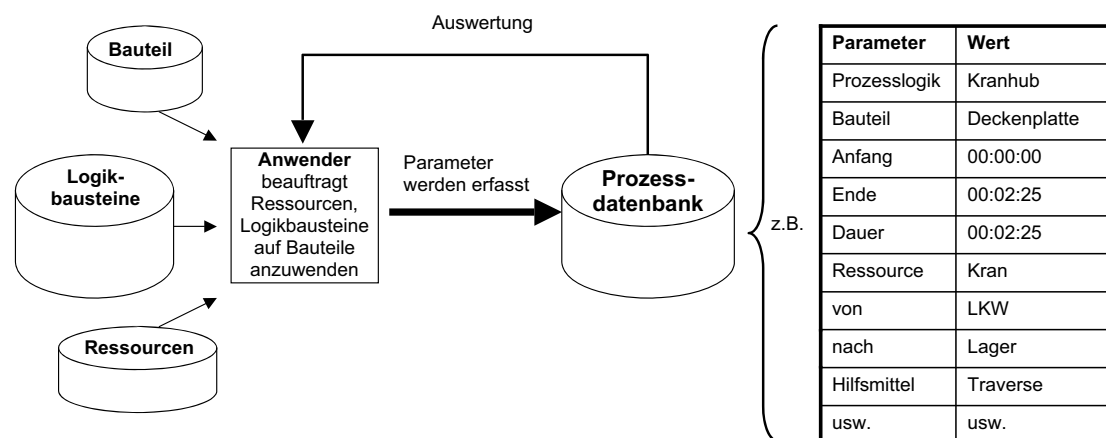


Abb. 35: Architektur des Lösungsansatzes zur Methode der interaktiven Modellierung

Zusätzlich zur Visualisierung des Bauablaufs in Echtzeit und auf hoher Detailstufe (Arbeitsvorgänge) werden mit der vorgeschlagenen Methode insbesondere folgende Probleme gelöst:

- Die Defizite computergestützter Algorithmen bei der komplexen Entscheidungsfindung in der Prozessfolge der Bauproduktion auf Projektebene werden durch menschliche Entscheidungen kompensiert.

- Stark individuell geprägte Beschreibungsmerkmale (Unikatcharakter von Bauwerken) können durch Eingriffe des Menschen bewertet werden.
- Die während der Modellierung erfassten Parameter erlauben individuelle Bewertungen des Bauwerks, z.B. die Ermittlung der Kosten oder des zeitlichen Bauablaufs.
- Die Veränderung von Randbedingungen im Produktionsmodell während des Modellierungsprozesses kann spontan, situativ und zu jeder Zeit erfolgen.
- Automatisierte Logikbausteine werden auf einer Abstraktionsstufe entwickelt, die eine projektübergreifende Wiederverwendung der Bausteine bei einer möglichst hohen Anzahl an Projekten erlaubt.

In den folgenden Abschnitten wird der Lösungsansatz aus Abb. 35 erläutert und anhand von Beispielen erklärt. Die Ausführungen lehnen sich am interaktiven Modellierungsprozess an. Es wird vertieft auf Bauteile, Ressourcen und Prozesse eingegangen. Im Anschluss daran werden die Möglichkeiten zur Nutzung der ermittelten Prozessparameter aufgezeigt.

4.1 Bauteile

Der Lösungsansatz zur Behandlung von Bauteilen gründet auf der Spezifikation eines Bauteilkatalogs in Anlehnung an eine Studienarbeit von Brumme [Brum02]. Es wird davon ausgegangen, dass im Rahmen der Ausführungsplanung ein möglichst komplettes 3D-Modell vorliegt. In jedem Fall wird bei dieser Methode sichergestellt, dass der Bauunternehmer nur diejenigen Spezifikationen bewerten kann, die im ausgeschriebenen 3D-Modell der Ausführungsplanung auch definiert sind. Es ist vorstellbar, dass auch eine baubegleitende Planung bauteilorientiert erfolgt, indem beispielsweise die chronologisch `frühen` Bauteile detailliert und die `späten` Bauteile nur unscharf definiert werden. Ähnlich einem Planvorlauf können dann die unscharf beschriebenen Bauteile fristgerecht detailliert werden. Im Folgenden wird die Behandlung der Bauteile aus einer detaillierten Ausführungsplanung heraus geschildert.

4.1.1 Zerlegung und Gruppierung

Im Rahmen der Entwurfsplanung sind Bauteile in der Regel nur grob detailliert. Dies bedeutet, dass z.B. eine Wand ein komplettes Bauteil darstellt und nicht in produktionsrelevante Einheiten unterteilt ist (Abb. 36 links). Die Ausführungsplanung erhebt den Anspruch, das Bauwerk im Detail durchzuplanen. Es wird angenommen, dass die Bauteile auf hoher Detailstufe in 3D durchgeplant werden, d.h. eine Mauerwerkswand würde aus den einzelnen Steinen und Mörtelschichten bestehen. Der erste Schritt bei der interaktiven Modellierung sieht nun vor, dass diese Wand unter Berücksichtigung des anzuwendenden Bauverfahrens in produktionsrelevante Einheiten unterteilt wird. Dabei kann es notwendig werden, aus Einzelbauteilen (z.B. Steine und Mörtel) Bauteilgruppen zu bilden, die produktionstechnisch zusammenhängen. Diese Aufgabe muss vom Anwender durchgeführt werden, bevor es zu einem Import in eine VR-Umgebung kommt. Im Beispiel aus Abb. 36 wird demnach in Abhängigkeit von verfahrenstechnischen Entscheidungen eine Zerlegung der Wand vorgenommen. Aus einem einzigen Bauteil (links) entstehen 4 Bauteile (rechts). Die Türflanken und die Aufmauerung bestehen wiederum aus Bauteilgruppen von Stein und Mörtel, die vom Anwender gebildet werden müssen. Im Zuge dieser individuell getroffenen Entscheidungen wählt der Anwender seine eigene Detailstufe und sein eigenes Verfahren aus, z.B. wurden Kleinstbauteile, wie Anker, im Beispiel weggelassen. Er muss dabei in dem von ihm entwickelten Produktionsmodell die notwendigen Einzelschritte in der Prozesslogik vor seinem geistigen Auge definiert haben.

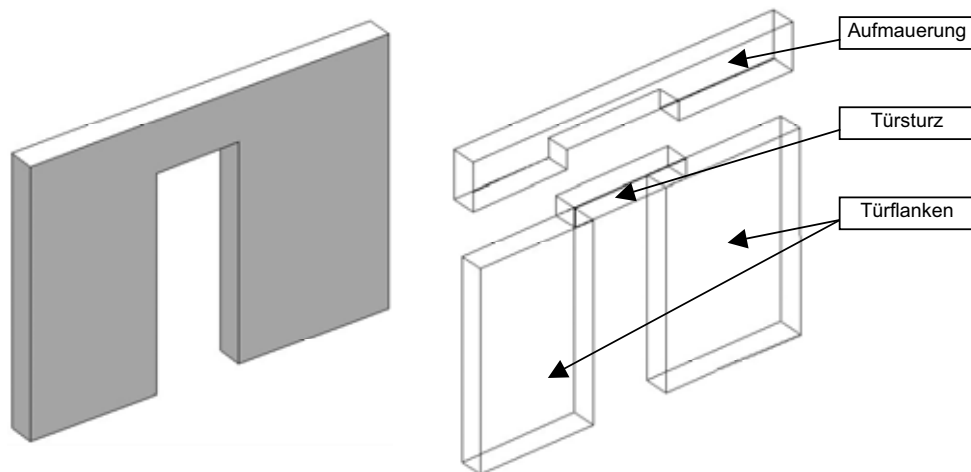


Abb. 36: Zerlegung eines Bauteils der Ausführungsplanung in Einzellelemente

An dieser Stelle zeigt sich auch, dass bei unterschiedlichen Bauteilen unterschiedliche Detailstufen gewählt werden können. Um die Detailstufe im Produktionsmodell der Baustelle variieren zu können, muss es möglich sein, Aufträge auf hoher und niedriger Detailstufe zu vergeben. Das Beispiel in Abb. 36 zeigt bereits eine relativ hohe Detailstufe. Die höchste Detailstufe bei der Zerlegung von Bauteilen ist das Einzelbauteil selbst, d.h. die tiefste Ebene des hierarchischen Baums aller Bauteile im Bauteilkatalog. Als Beispiel mag ein Bewehrungsstab gelten, der ebenfalls vom Anwender unter Angabe von Ressource und Prozess beauftragt werden kann. Von größerem Interesse ist jedoch die gröbere Detailstufe, da sie zu einem effizienteren Modellierungsprozess führt. Dies wird anhand eines weiteren Beispiels (Abb. 37) erläutert.

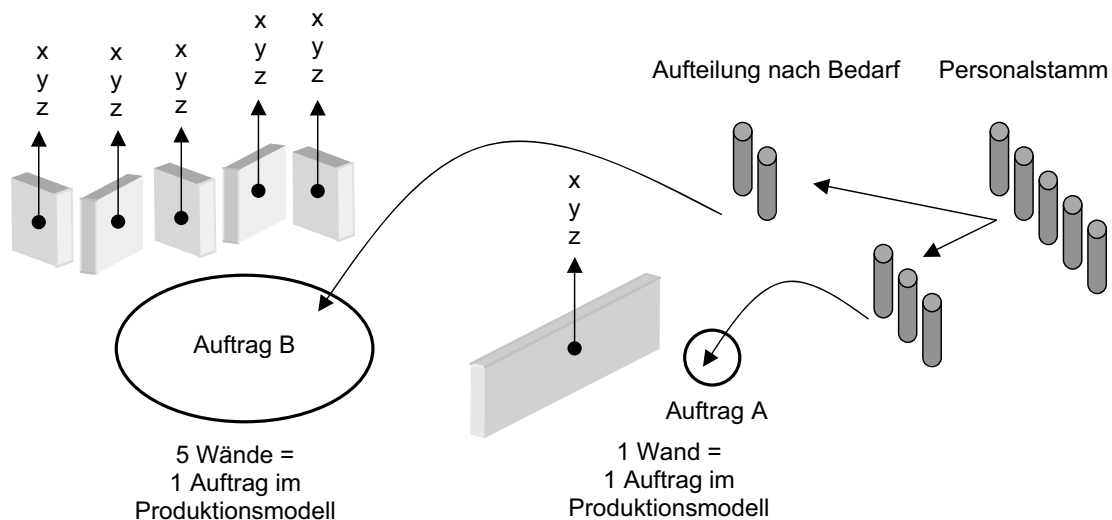


Abb. 37: Gruppierung von Einzelementen zu einer Einheit

Ziel ist es, eine Bauteilgruppe mit möglichst vielen Bauteilen in einer Produktionseinheit zu beauftragen. Es zeigt sich, dass die Zerlegung von Bauteilen in Produktionseinheiten auch umgekehrt werden kann, indem mehrere identische Bauteile zu einer Produktionseinheit zusammengefasst werden. Bauteile können dann zusammengefasst werden, wenn auf sie jeweils dieselbe Prozesslogik angewendet werden kann. Jedes Bauteil definiert seinen Ort

über Koordinaten in der virtuellen Umgebung. Bei einer quaderförmigen Wand wäre dies der Mittelpunkt des Quaders. Besteht ein Auftrag aus nur einem Bauteil, kann der Produktionsort eindeutig bestimmt werden (Auftrag A in Abb. 37). Besteht der Auftrag aus mehreren Bauteilen, entsteht ein Reihenfolgeproblem, welches unter Verwendung von mathematischen Optimierungsmethoden gelöst werden kann (Auftrag B in Abb. 37). Bewertet der Anwender das Ergebnis der mathematischen Optimierung kritisch, kann er manuell eine Reihenfolge festlegen. Dies mag bei wenigen Bauteilen problemlos sein, bei einer hohen Anzahl wird es den Modellierungsprozess zunehmend verlangsamen.

Bei der Betrachtung der Bauteilorientierung stellt sich heraus, dass es keine allgemeine Regel für die Detailstufe gibt. Aus diesem Grund wird von einer ganzheitlichen Zerlegung des Produktmodells mit anschließender Gruppierung ausgegangen. Bei industriell gefertigten Bauteilgruppen (z.B. Sanitärobjekte, Rohrverbindungen etc.) werden diese Gruppen als Bauteile aus einem digitalen 3D-Produktkatalog im Produktionsmodell zur Verfügung gestellt. Von einer weiteren Zerlegung kann hier abgesehen werden. Die Detailstufe der Zerlegung wird in den meisten Fällen vom Anwender im Vorfeld der interaktiven Modellierung beim Import von Bauteilen in die VR-Umgebung bestimmt. In einigen Fällen können Parameter von Ressourcen und Bauteilen herangezogen werden, um eine Zerlegung herbeizuführen. Dies wird im folgenden Abschnitt erläutert.

4.1.2 Automatische Zerlegung und Gruppierung

Bei der Beauftragung von großen Einzelbauteilen (z.B. Schüttgut oder Aushub) durch den Anwender entsteht ein großer Aufwand durch die Zerlegung des Einzelbauteils in Produktionseinheiten. Aus diesem Grund erscheint eine automatische Zerlegung von großen Volumina sinnvoll. Nach Bekanntgabe von Ressourcen und Bauteil wird eine Zerlegung des Bauteils so vorgenommen, dass geometrisch sinnvolle Produktionseinheiten entstehen. Als Beispiel dient der Aushub einer Baugrube durch einen Bagger mit gewählter Löffelgröße (Abb. 38).

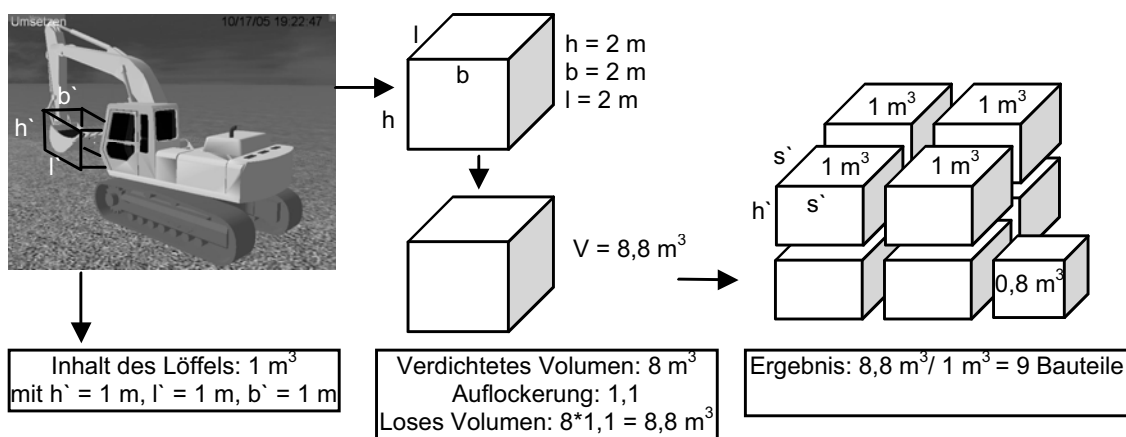


Abb. 38: Automatische Zerlegung über Parameter

Die relevanten Parameter sind die geometrischen Maße des Baggerlöffels und des Aushubs. Der Baggerlöffel hat die abstrahierten Maße $h' = 1\text{ m}$, $l' = 1\text{ m}$ und $b' = 1\text{ m}$. Der Aushub hat die Maße $h = 2\text{ m}$, $l = 2\text{ m}$, $b = 2\text{ m}$. Mit diesen Parametern kann berechnet werden, wie viele Einzelbauteile in entsprechenden Schichten für den Aushub notwendig werden. Die automatische Zerlegung kann erfolgen, wenn der Anwender die Ressource (hier: Bagger und Löffel),

das Bauteil (hier: das Aushubvolumen) und den Prozess (hier: Ausheben und seitlich lagern) bestimmt hat. Erst dann ist klar, dass der Aushub in Einheiten, die dem gewählten Löffelinhalt entsprechen, bewegt wird. Auch bei der automatischen Zerlegung muss eine Detailstufe beim Entwurf des Lösungsalgorithmus gewählt werden. Einige Prozesse wie beispielsweise das Sammeln von Boden vor dem Füllen des Löffels - vor allem bei genau einzuhaltenden Aushubprofilen - werden übergangen. Das Ergebnis der automatischen Zerlegung ist die Aufbereitung des Bauteils vor der Ausführung der Prozesslogik.

Neben der automatischen Zerlegung von großen Bauteilen in produktionsrelevante Einheiten in Abhängigkeit der verwendeten Ressourcen und Prozesslogik muss ebenso für den entgegengesetzten Fall der automatischen Gruppierung ein entsprechender Algorithmus vorliegen. Dies wird notwendig, wenn sich die Randbedingungen eines Auftrags während seiner Ausführung ändern, z.B. durch die Auswahl einer anderen Ressource. Dieses Szenario ist bei der interaktiven Modellierung häufig zu erwarten, wenn der Anwender feststellt, dass eine Ressource nicht optimal eingesetzt wird. Dann muss die Möglichkeit der Modifikation eines Auftrags gegeben sein. Stellt sich beispielsweise heraus, dass ein in einem Auftrag gebundener Bagger mit einem Löffelinhalt A an einer anderen Stelle dringend benötigt wird, sollte ein Bagger mit Löffelinhalt B (z.B. Mietbagger) den begonnenen Prozess fortführen können. Dazu muss das verbleibende Aushubvolumen, welches aus Einzelbauteilen besteht, wieder zu einem Bauteil vereinigt werden, damit die Zerlegung für den Löffelinhalt B erfolgen kann.

4.1.3 Temporäre Bauteile

Neben den Bauteilen des Produktmodells sind für die Produktionsmodellierung weitere Bauteile notwendig, die auf der Baustelle nur temporär benötigt werden und anschließend als verlorene Objekte in der Baukonstruktion verbleiben (z.B. verlorene Schalung) oder wieder entfernt werden müssen (z.B. Schalung, Unterstützungen, Auffahrten aus Baugruben). Diese Bauteile müssen vom Anwender geplant und in die virtuelle Umgebung integriert werden, da sie fester Bestandteil des Produktionsprozesses sind. Als Beispiel wird das Problem der Erschließung größerer Baugruben angeführt. Dabei muss der Baggerfahrer mit fortschreitender Baugrubentiefe eine Möglichkeit schaffen, den Bagger später aus der Baugrube wieder herauszufahren. Aus der Sicht der interaktiven Modellierung ist ein Bauteil 'Auffahrt' erforderlich, welches mit wachsender Tiefe immer größer wird und unter Umständen auch über mehrere Stufen (Bermen) anzulegen ist (Abb. 39). Zur Modellierung dieser Prozesse ist ein flexibler Umgang mit den Einzelbauteilen des Aushubs notwendig.

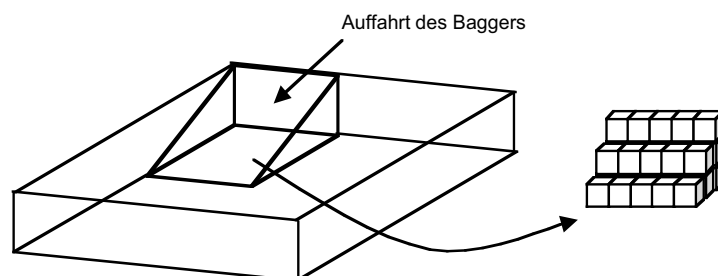


Abb. 39: Temporäres Bauteil 'Auffahrt' für einen Bagger

Da der Aushub aus einzelnen Elementen in der Größe des Löffelvolumens besteht (siehe Abb. 39, rechts), kann der Bagger sich die Auffahrt als Treppe bauen. In vorliegendem Fall wird eine temporäre Bauteilgruppe aus bestehenden Einzelbauteilen sukzessive aufgebaut.

Das Herstellen der Auffahrt ist vom Anwender ebenso durch interaktiv erteilte Aufträge vorzunehmen wie der Aushub selbst. In obigem Fall werden zur Herstellung der Auffahrt keine neu zu planenden Bauteile benötigt. Es steht jedoch fest, dass die Auffahrt nach Erfüllung ihres Zweckes wieder entfernt wird. Bei einigen Objekten (z.B. Schalung) muss unterschieden werden, ob industriell gefertigte Teile aus 3D-Produktkatalogen entnommen werden können oder ob die Schalung vor Ort aus Bauholz gefertigt werden muss. In diesem Fall müsste der Auftrag für die Herstellung einer solchen Konstruktion manuell bewertet werden.

4.2 Ressourcen

Bei der Betrachtung von Ressourcen auf virtuellen Baustellen wird unterschieden in Personal und Maschinen. Unter die Kategorie `Personal` fallen alle produktiven Mitarbeiter. Bei den Maschinen werden lediglich Großgeräte betrachtet (z.B. Bagger, Kran). Baustoffe werden nicht als Ressourcen definiert. Sie finden in den Bauteilen gesonderte Beachtung. Bauteile wie Frischbeton, Kies, Sand müssen stets in der Form von gruppierten Einzelbauteilen vorliegen. In den folgenden beiden Abschnitten werden die beiden Kategorien Personal und Maschinen näher erläutert.

4.2.1 Personal

Die aktuelle Forschung zu virtuellen Baustellen bildet Personal in der Form von virtuellen Menschen bzw. Avataren ab. Es bleibt jedoch unklar, was diese Repräsentanten im virtuellen Raum tun sollen und wie sie es tun sollen. Computerspiele sind in der Lage, Bewegungen von Avataren auf hoher Detailstufe sehr authentisch darzustellen. Der Vorteil wäre, dass der Anwender schnell erkennt, in welchem Prozess sich der Avatar befindet. Die Implementierung einer entsprechenden Intelligenz, z.B. für das Einfädeln eines Ankerstabes in eine Schalttafel, ist eine sehr komplexe Aufgabe. Diese Detailstufe soll in dieser Arbeit nicht betrachtet werden. Es wird eine Lösung geschildert, die ein aussagekräftigeres Resultat für die Gesamtprozessdauer liefert als dies mit Aufwandswerten auf Projektebene möglich wäre. Dabei stehen nicht die einzelnen Bewegungen der Avatare auf hoher Detailstufe im Vordergrund. Hauptzweck der Avatare soll es sein, die Nutzung von Wegen auf der virtuellen Baustelle so zu visualisieren, dass der Anwender die Effizienz des Prozesses einschätzen kann. Aufgrund der Sicht auf die virtuelle Baustelle kann der Anwender dann sehen, ob nicht eine bessere Lösung in Sicht ist. Dies kommt der Vorgehensweise auf der realen Baustelle nahe.

Die Abbildung von Avataren als Repräsentanten von Menschen erlaubt die Definition personalbezogener Parameter (Tab. 10). Diese Parameter erlauben eine detaillierte Auswertung des Personals auf virtuellen Baustellen. Die Parametrisierung von Mitarbeitern bei der Berechnung des Mittellohns wird übernommen und erweitert, ohne die Anonymisierung aufzuheben. Auf eine vollständige Abbildung aller Parameter aus der Berechnung des Mittellohns, z.B. Zulagen oder Sozialkosten, wird hier unter Verweis auf einschlägige Literatur verzichtet. Für die interaktive Modellierung sind die Parameter Ort, Zeitart und Dauer von besonderer Relevanz. Das Mitschreiben der Bewegungsdaten erlaubt eine detaillierte Analyse der Qualität der Wege auf der virtuellen Baustelle. Die Dauer spielt eine tragende Rolle, weil sie Aufschluß über die Kosten gibt. Die Definition der Qualifikation ermöglicht die Bildung eines Mittellohnes für einzelne Aufträge und nicht wie bisher für das gesamte Projekt. Über die Zeitart lässt sich auswerten, wie hoch der Anteil der Zeitarten an der Gesamtprozessdauer ist. Betrachtet werden die Tätigkeitszeit und die ablaufbedingte Wartezeit (entspricht der Grundzeit nach Abb. 13).

Parameter	Beschreibung
Ort	Koordinaten x, y, z bezogen auf Ursprung der virtuellen Welt
Zeitart	Aktuelle Zeitart, in der sich der Avatar befindet, z.B. Tätigkeitszeit oder Wartezeit
Qualifikation	z.B. Baugeräteführer (Ost)
Tariflohn	z.B. 12,09 EUR/h
Funktion	Name der Verfahrenslogik, die gerade ausgeführt wird
Bauteil	Bauteil(-gruppe), auf welche(s) die Funktion angewendet wird
Startzeit	Zeitpunkt, zu welchem die Ausführung einer Funktion beginnt
Endzeit	Zeitpunkt, zu welchem die Ausführung einer Funktion endet
Dauer	Differenz zwischen Start- und Endzeit

Tab. 10: Überblick über die Parameter eines Avatars

Nachgelagerte Bestimmung der Auftragszeit eines Arbeitsvorgangs

Bei der Ermittlung von Dauern im Rahmen der interaktiven Modellierung soll die Grundzeit t_g nach Abb. 13 ermittelt werden und nicht die Auftragszeit. Die Auftragszeit beinhaltet stochastisch auftretende Zeitarten (z.B. persönliche Verteilzeit oder Erholungszeit), die in VR nicht erfasst werden. Auch die Rüstzeit wird über einen externen Wert eingerechnet. Die Auftragszeit T kann unter Verwendung der Grundzeit t_g und der Rüstzeit t_r über folgende Formel berechnet werden:

$$T = \frac{t_r}{ZG_r} + \frac{t_g}{ZG_g} \left(1 + \frac{z_v + z_{er}}{100\%} \right) \quad (\text{Formel 1})$$

- mit:
- T Auftragszeit des Arbeitsvorgangs
 - t_r Rüstzeit des Arbeitsvorgangs
 - ZG_r Zeitgrad³⁴ der Rüstzeit
 - t_g Grundzeit des Arbeitsvorgangs
 - ZG_g Zeitgrad der Grundzeit
 - z_v Zuschlag für Verteilzeit
 - z_{er} Erholungszuschlag

Die interaktive Modellierung in VR liefert die Dauern für die Grundzeit (Tätigkeitszeit und ablaufbedingte Wartezeit). Eine genauere Unterteilung der Zeitarten bei der Erfassung wurde nicht verfolgt. Eine technologische Umsetzung der Interpretation der beiden hier betrachteten Zeitarten durch Avatare auf virtuellen Baustellen ist möglich. Dabei erkennen die Avatare

³⁴ Siehe [VDI3633, Blatt 6, Punkt 4.4]: Verhältnis vorgegebener Soll- zu erreichter Ist-Zeit im Rahmen einer Erhebung; drückt den Übungsgrad eines Menschen aus

selbst, in welchem Zeitzustand sie sich befinden. Dies geschieht über einfache Regeln. Ist der Avatar in Bewegung, fällt diese Zeit unter die Zeitart Tätigkeit. Bewegt er sich nicht, wird ihm diese Zeit als Wartezeit angerechnet.

Bestimmung der Lohnkosten

Heutzutage wird bei der Bestimmung der Lohnkosten in der Regel mit einem mittleren Arbeitslohn gerechnet. Dieser Mittellohn steht für den Mittelwert der Stundenlöhne aller produktiven Arbeiter auf einer Baustelle. Er hängt somit von der tariflichen Einordnung bzw. der Qualifikation der auf der Baustelle tätigen Mitarbeiter ab. Die Methode in dieser Arbeit sieht vor, dass Kolonnen mit Aufträgen betraut werden. Zur Bestimmung der Lohnkosten wird nicht ein für die Baustelle bestimmter Mittellohn verwendet, sondern der Mittellohn für die mit einem Auftrag versehene Kolonne.

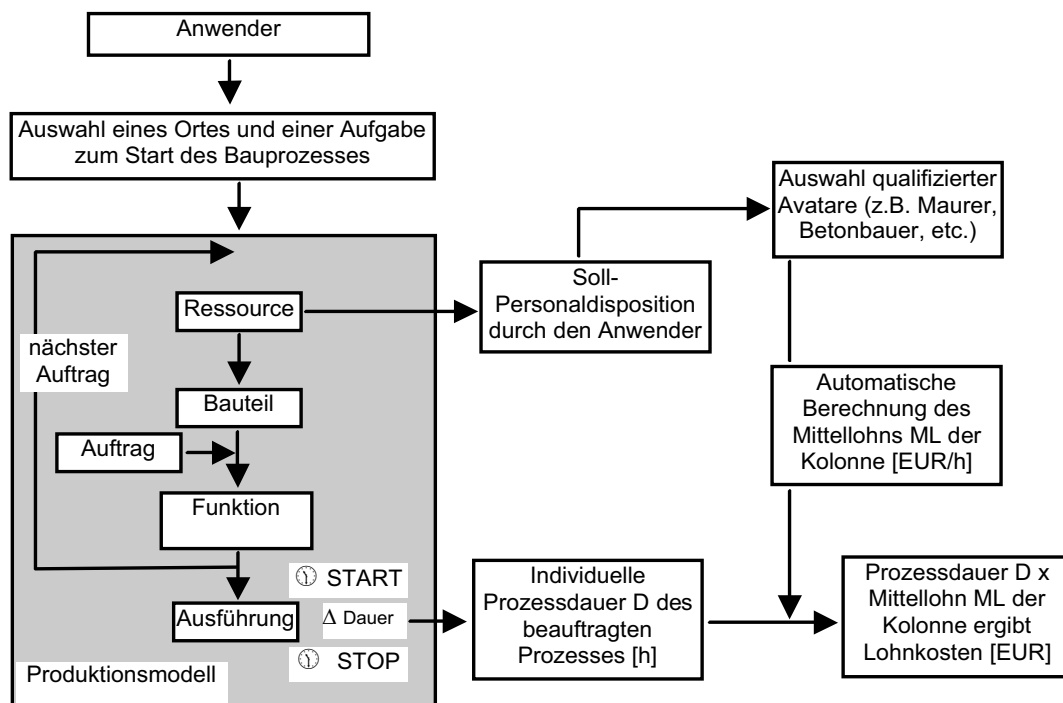


Abb. 40: Berechnung der Lohnkosten

Die Summe der Lohnkosten aus allen erteilten Aufträgen entspricht in der konventionellen Kalkulation dem Lohnkostenanteil aus den Einzelkosten der Teilleistungen (EKT). Die Berechnung der Lohnkosten pro Auftrag erfolgt unter Verwendung der Parameter Dauer und Mittellohn wie folgt:

$$LK_{\text{Auftrag}} = D_{\text{Auftrag}} \times ML_{\text{Kolonne}} \quad (\text{Formel 2})$$

mit: LK in EUR Lohnkosten eines Auftrags

D in h Individuelle Dauer des Auftrags

ML in EUR/h Mittellohn der Kolonne des Auftrags

Auch bei obiger Methode werden vordefinierte Aufwandswerte, z.B. nach REFA, verwendet. Dies geschieht jedoch auf einer höheren Detailebene und nur für repetitive Prozesse in einer

Prozesslogik. Die Dauern für Bewegungsprozesse können erst nach der Bestimmung der Orte auf der virtuellen Baustelle ermittelt werden. Auf die Methode der Ermittlung von Dauern wird im Zusammenhang mit der Behandlung von Prozesslogiken näher eingegangen.

4.2.2 Maschinen

Die Parameter bei Maschinen werden analog zum Personal speziell auf die Bedürfnisse in virtuellen Umgebungen angepasst. Ein Unterschied zum Personal besteht in der Behandlung der Gerätekosten. Sie ermitteln sich über einen Verrechnungssatz, z.B. EUR/h. Die relevanten Parameter sind in Tab. 11 abgebildet.

Parameter	Beschreibung
Ort	Koordinaten x, y, z bezogen auf Ursprung der virtuellen Welt
Zeitart	Aktuelle Zeitart, in der sich die Maschine befindet, z.B. Hauptnutzungs-, Nebennutzungszeit oder ablaufbedingte Unterbrechung
Funktion	Name der Verfahrenslogik, die gerade ausgeführt wird
Bauteil	Bauteil(-gruppe), auf welche(s) die Funktion angewendet wird
Verrechnungssatz	EUR/h
Startzeit	Zeitpunkt, zu welchem die Ausführung einer Funktion beginnt
Endzeit	Zeitpunkt, zu welchem die Ausführung einer Funktion endet
Dauer	Differenz zwischen Start- und Endzeit

Tab. 11: Überblick über die Parameter einer Maschine in VR

Für Betriebsmittel werden Ablauf- und Zeitarten nach REFA definiert. In der vorliegenden Arbeit werden nur die Ablaufarten berücksichtigt, die nicht stochastischen Einflüssen unterliegen und auf Baustellen auftreten (Tab. 12). Die Zeitarten sind die Hauptnutzungs-, Nebennutzungs- und die Brachzeit.

Ablaufart	Zeitart	Abzubildende Regel, z.B. 'Bagger'	Kosten
Hauptnutzung	Hauptnutzungszeit	WENN Ausleger ODER Oberwagen sich bewegen, DANN Hauptnutzungszeit (z.B. Vorgang zum Füllen des Löffels)	Vorhaltung und Betrieb
Nebennutzung	Nebennutzungszeit	WENN Eigenbewegung UND Ausleger ODER Oberwagen bewegen sich nicht, DANN Nebennutzungszeit (z.B. Umsetzen)	Vorhaltung und Betrieb
Ablaufbedingte Unterbrechung	Brachzeit	WENN keine Eigenbewegung UND Ausleger ODER Oberwagen bewegen sich nicht, DANN Ablaufbedingte Unterbrechung (z.B. Warten auf LKW)	Vorhaltung und Betrieb
Erholungsbedingte Unterbrechung	Brachzeit	WENN keine Eigenbewegung UND Ausleger ODER Oberwagen bewegen sich seit n Minuten nicht, DANN Erholungsbedingte Unterbrechung (Motor aus, z.B. Überhitzung, Nacht, Pausen)	Vorhaltung

Tab. 12: Autonome Bestimmung der Zeitarten von Geräten durch Regeln

Andere Zeitarten werden außerhalb der virtuellen Umgebung in die ermittelten Dauern eingerechnet. Geräte, die über die gesamte Bauzeit auf der Baustelle verbleiben (z.B. Krane), wurden bisher über Vorhaltekosten (Abschreibung, Verzinsung und Reparatur) sowie Betriebsstoffkosten (bei einer festen Betriebsstundenzahl und einem festen Kostensatz pro Betriebsstunde) pro Monat angesetzt. Bei Leistungsgeräten (z.B. große Bagger) wurden die Kosten auf der Basis der Einsatzzeit direkt den Einzelleistungen zugeordnet. Geräteleistungen werden bei der interaktiven Modellierung direkt einem Auftrag zugeordnet. Gerätekosten besitzen damit keinen Gemeinkostencharakter mehr.

Die interaktive Modellierung in virtuellen Baustellenumgebungen ermöglicht eine automatisierte Kostenermittlung durch intelligente Verhaltensmethoden der eingesetzten Baumaschinen. Dabei erkennt das Objekt selbsttätig die Ablauf- oder Zeitart, in der es sich befindet. Die Regeln können, wie in Tab. 12 beispielhaft dargestellt, abgebildet werden. Zur Ermittlung der Gerätekosten bieten sich die Ablauf- und Zeitarten nach Tab. 12 (linke Spalten) weniger gut an, da sie nicht eindeutig zwischen reiner Vorhaltezeit und Betriebszeit unterscheiden. Daher werden zur Vereinfachung und in Anlehnung an die Zeitarten in der Baugeräteliste [BGL2001] lediglich zwei verschiedene Zeitarten unterschieden: die Vorhaltezeit und die darin enthaltene Betriebszeit³⁵. Eine Zuordnung dieser Zeiten und den Zeitarten nach REFA gibt Tab. 12 in der rechten Spalte. Für die Haupt- und Nebennutzung sowie für ablaufbedingte Unterbrechungen wird davon ausgegangen, dass Betriebsstoffe verbraucht werden (laufender Motor). Lediglich bei der erholungsbedingten Unterbrechung ist der Motor aus, sodass dann nur die Vorhaltekosten zum Tragen kommen. Auf der Grundlage der Regeln in Tab. 12 werden Dauern für die Vorhalte- und Betriebszeit nach Vergabe der Aufträge im Produktionsmodell ermittelt. Diese Dauern werden mit Verrechnungssätzen für Vorhalte- und Betriebsstunden multipliziert, welche auf der Basis der Baugeräteliste (BGL) bestimmt werden können. Die Vorhaltung berechnet sich über die BGL-Ansätze für Abschreibung, Verzinsung und Reparatur (A+V+R). Der Betrieb des Gerätes errechnet sich in Abhängigkeit vom Verbrauch an Treib- und Schmierstoffen. Diese Informationen können aus eigenen Erfahrungswerten oder vom Hersteller gewonnen werden. Die BGL macht hierzu nur ungenaue Angaben³⁶. Die Berechnung der Gerätekosten verläuft wie folgt:

$$GerK_{Auftrag} = (D_{VZ} \times S_{VZ}) + (D_{BZ} \times S_{BZ}) \quad (\text{Formel 3})$$

mit:	GerK in EUR	Gerätekosten eines Auftrags
	D_{VZ} in h	Dauer der Vorhaltezeit
	D_{BZ} in h	Dauer der Betriebszeit
	S_{VZ} in EUR/h	Verrechnungssatz des Gerätes aus A+V+R
	S_{BZ} in EUR/h	Verrechnungssatz des Gerätes aus A+V+R+Treibstoffe+Schmierstoffe

Grundsätzlich können alle nicht stochastisch beeinflussten Kosten von Geräten auf virtuellen Baustellen in Gänze auf der Basis der definierten Parameter ausreichend genau bestimmt werden. Bei den Gerätekosten werden Transportkosten nicht weiter betrachtet.

³⁵ Siehe [Drees02, S. 75, Abb. B 1.6 und S. 80 Beispiel Kran]

³⁶ Siehe [BGL2001, S. 12]

4.3 Prozesslogik

Nach der Beschreibung der Lösungsansätze zum Umgang mit Bauteilen und Ressourcen werden im folgenden Abschnitt Lösungsansätze zum Umgang mit Prozessen vorgestellt. Die Vergabe eines Auftrags im Produktionsmodell ruft eine Prozesslogik auf, die von den Ressourcen auf die Bauteile angewendet wird. Die Prozesslogiken bilden das Kernstück der interaktiven Modellierung. Sie sind automatisierte Referenzlogiken, die interaktiv gestartet werden und möglichst autonom ablaufen. Die interaktive Komponente unterstützt die Entwicklung von Prozesslogiken dahingehend, dass die Komplexität der Logiken aufgrund der interaktiven Eingriffe des Anwenders überschaubar bleiben kann. Die Vorgehensweise bei der Entwicklung von Prozesslogiken wird unter Berücksichtigung der Eigenheiten im Bauprozess erläutert.

Entscheidendes Merkmal für die Automatisierbarkeit eines Bauprozesses ist die Frage, ob der Prozess repetitiv ist oder nicht. Dies ist von der Detailstufe der Betrachtung abhängig. Will man für Bauproduktionsprozesse Referenzlogiken aufbauen, muss man allgemein gültige repetitive Vorgänge identifizieren. Der Lösungsansatz sieht vor, dies für die Detailstufe der Arbeitsvorgänge zu tun. Der Zusammenhang zwischen Detailstufe und Automatisierbarkeit von Produktionsprozessen ist in Abb. 41 dargestellt. Das Kriterium für die Automatisierbarkeit ist hier die exakte Wiederholung der Schritte in der Prozessfolge. Es wird darauf hingewiesen, dass die Übergänge zwischen untenstehenden Ebenen fließend sind.

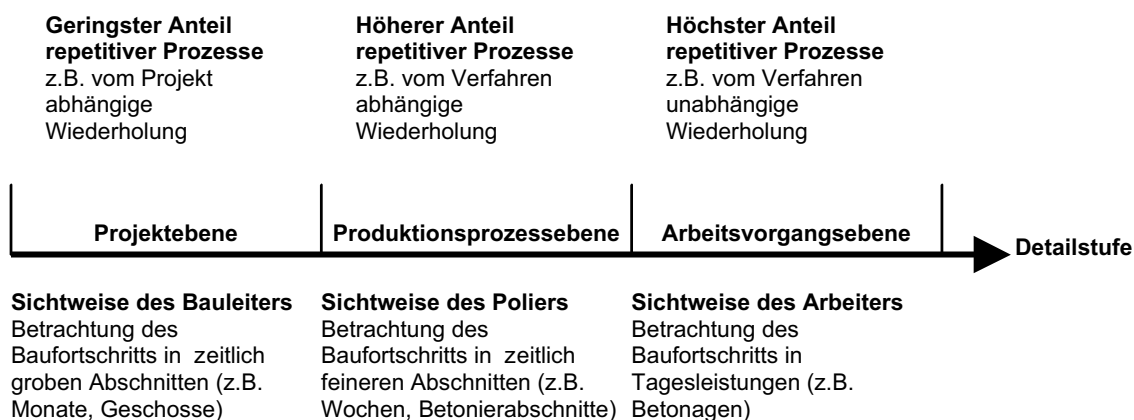


Abb. 41: Zusammenhang zwischen Detailstufe und Automatisierbarkeit von Prozessen

Dabei sind Prozesse auf der Projektebene nur selten automatisierbar, da sie sich von Projekt zu Projekt zu stark unterscheiden. Ein Hochhaus lässt sich kaum mit einer Straßenbaustelle vergleichen. Für die Bauproduktion bedeutet dies, dass sich die grobe Chronologie des Bauablaufs (Monate, Bauabschnitte) in der Regel nicht realitätsnah formalisieren lässt, da die Anzahl der Einflussfaktoren und deren Abhängigkeiten untereinander zu umfangreich sind. Die Prozesse auf der Produktionsprozessebene betrachten Wochenleistungen und sehen die Bauproduktion aus der Sicht des Poliers. Auch auf der Ebene der Produktionsprozesse ist die Automatisierbarkeit zwar höher als auf der Projektebene, jedoch werden von Projekt zu Projekt unterschiedliche Bauverfahren angewandt. Wenn die Bauverfahren identisch sind, führen örtliche Randbedingungen zu individuell ausgeprägten Produktionsprozessen. Lediglich die Ebene der Arbeitsvorgänge erlaubt eine gute Automatisierbarkeit der ablaufenden Prozesse. Dabei lassen sich Einzelprozesse auf hoher Detailstufe (z.B. Stein heben, Beton verdichten) am besten formalisieren. Es ist eine überschaubare Anzahl von Einflussfaktoren

und Abhängigkeiten zu definieren und festzulegen. Für verschiedene Einzelprozesse lassen sich Logiken in der Prozessfolge erkennen und für die wiederholte Verwendung in Logikbausteinen isolieren.

4.3.1 Logikbausteine

Der Prozess der interaktiven Modellierung in virtuellen Umgebungen ist geprägt durch eine hohe Konkretisierung des zu lösenden Problems. Grund dafür ist der niedrige Abstraktionsgrad bzw. die hohe Detailstufe der virtuellen Baustelle. Es bedarf einer hohen Zahl an Entscheidungen im Bauablauf. Aus diesem Grund muss es das Ziel sein, eine möglichst hohe Zahl einfacher Entscheidungen durch intelligente Objekte autonom treffen zu lassen. Die Logikbausteine bestimmen die Effizienz des Modellierungsprozesses, da der Automatisierungsgrad des Modells von ihnen abhängt. Sie werden in Anlehnung an die interne und externe Verhaltenslogik in zwei Gruppen differenziert: die Bewegungslogik und die Verfahrenslogik.

Bewegungslogik

In einem ersten Schritt werden beispielhaft 'atomare' Prozessbausteine für das Bewegungsverhalten von Ressourcen beschrieben. Tab. 13 verdeutlicht die gewählte Detailstufe für das Bewegungsverhalten der Ressourcen. Die Gliederung für Avatare ist grob. Nach VDI-Richtlinie 3633 werden bei der Menschmodellierung vier Detailstufen unterschieden. Die in Tab. 13 definierte Detailstufe liegt zwischen der Stufe 2 (personalintegrierte und -orientierte Simulatoren) und 3 (anthropometrische Simulatoren oder Menschmodelle) nach VDI 3633. Die Fortbewegung wurde stark vereinfacht. Avatare bewegen sich ohne eine genaue Berücksichtigung von Extremitäten. Dies bedeutet für den Avatar, dass er sich stets an den Wegen orientiert und unabhängig von der Beschaffenheit des Bodens entlang der Pfade läuft, auch bei Leitern und Treppen. Ebenso gilt für den Bagger, dass er auf allen Untergründen 'gleitet'. Eine Implementierung des Bewegungsverhaltens bei der Interaktion zwischen Ressourcen und Untergrund kann aus zeitlicher Sicht von Belang sein (Bagger fahren auf Straßen schneller als im Gelände). Aus Vereinfachungsgründen wird hier auf eine Betrachtung verzichtet.

Art der Bewegung	Avatar	Maschine, z.B. Bagger
Fortbewegung (Bewegung zwischen Orten)	<ul style="list-style-type: none"> - Horizontale Bewegung - Vertikale Bewegung 	<ul style="list-style-type: none"> - Horizontale Bewegung
Eigenbewegung (Bewegung am Ort)	<ul style="list-style-type: none"> - Stehen - Gehen - Aufnehmen - Ablegen - Arbeiten 	<ul style="list-style-type: none"> - Oberwagen drehen - Ausleger bewegen - Löffel bewegen

Tab. 13: 'Atomare' Bewegungen für Ressourcen auf virtuellen Baustellen

Mit dem Bewegungsverhalten aus Tab. 13 sind ausreichend genaue Bausteine bestimmt worden, um für die Baustelle relevante Bewegungen abzubilden. Einige hoch entwickelte

Computerspiele sind in der Lage, Bewegungen wesentlich komplexer abzubilden. Dies zeigt, dass eine technische Realisierung möglich ist. Für die interaktive Modellierung ist es zweckmäßig, zu wissen, wann und wo Ressourcen zum Einsatz kommen und auf welchen Pfaden sich diese über die virtuelle Baustelle bewegen.

Verfahrenslogik

Neben Bewegungen müssen Ressourcen auch Verfahren abwickeln. Die Entwicklung der Verfahrenslogik ist wesentlich komplexer als die der Bewegungslogik. Aus Orten und Bewegungen wird ein prozessgesteuertes Verfahren definiert. Die Vorgehensweise lässt sich an einem Vergleich mit dem Maschinen- und Anlagenbau demonstrieren (Abb. 42 und Abb. 43). In Abb. 42 ist der Avatar als Hand dargestellt. Der Bauteilkatalog befindet sich am rechten Bildrand. Der Anwender nimmt Teile aus dem Bauteilkatalog und setzt sie an die entsprechenden Orte des Werkstücks.

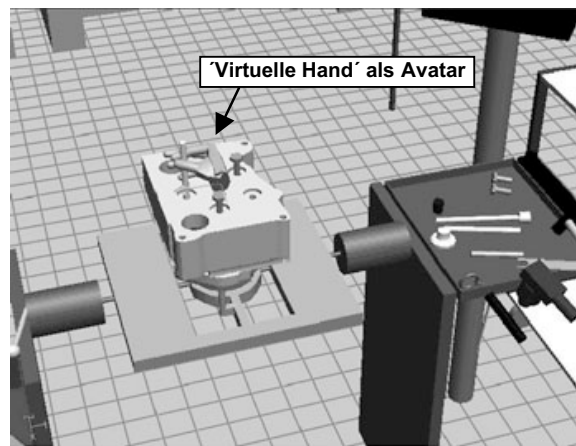


Abb. 42: 'Virtual Workbench' im Maschinenbau, (Quelle: Tecnomatix)

Überträgt man dies direkt auf das Bauwesen, würde es bedeuten, dass der Avatar jede kleinste Bewegung ausführen müsste. Der Anwender müsste jeden einzelnen Schritt im Produktionsprozess getrennt beauftragen. Dies ist für die interaktive Modellierung im Bauwesen nicht zweckgemäß. Die Entwicklung einer logischen Prozessfolge auf einer gröberen Detailstufe ist notwendig.

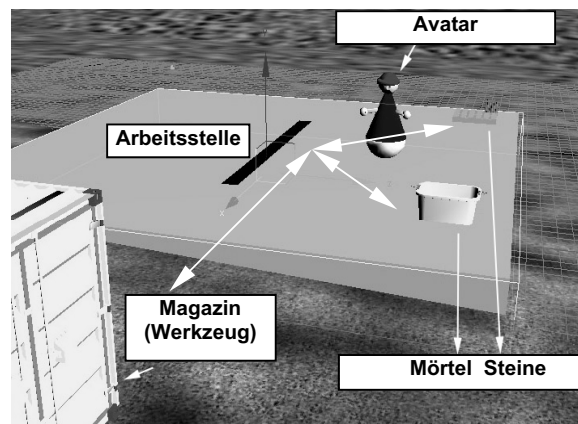


Abb. 43: 'Virtuelle Baustelle' als Pendant zur 'Virtual Workbench', aus [Barg05]

Abb. 43 zeigt ein Szenario, in welchem eine Verfahrenslogik für Mauerwerk erprobt wird. Die Orte sind mit 'Magazin', 'Mörtel', 'Steine' und der Arbeitsstelle gegeben. Der Avatar bewegt sich hier nur horizontal. Die beispielhafte Verfahrenslogik sieht vor, dass der Avatar nach der Erteilung des Auftrags die Arbeitsschritte nach Tab. 14 durchläuft.

Die Verfahrenslogik in Tab. 14 wurde als wieder verwendbare Referenzlogik für 'Mauerwerk aus kleinformatischen Steinen mit Mörtel' definiert. Bei der Entwicklung von Referenzlogiken muss berücksichtigt werden, dass das abgebildete Bauverfahren sich auf möglichst viele andere Szenarien übertragen lässt. Selbstverständlich existieren im Mauerwerksbau viele weitere Bauverfahren mit einer unterschiedlichen Verfahrenslogik, z.B. beim Einsatz von anderen Steinformaten, Mörteln, Klebern oder Robotern. Dennoch besitzen die Arbeitsprozesse eine gemeinsame Grundlogik, die in diesen Referenzlogiken abgebildet wird. Die Abbildung von Logiken unter Berücksichtigung sämtlicher technischer Randbedingungen, Varianten, Produktunterschiede usw. im Detail ist eine Aufgabe, die im Bauwesen aufgrund der sehr hohen Zahl an unterschiedlichen Varianten scheitert. Es verspricht mehr, eine Referenzlogik auf derjenigen Detailstufe zu entwickeln, die möglichst viele Verfahren und die technisch notwendigen Prozesse abdeckt. Die Logik in Tab. 14 deckt die Grundlogik für 'Mauerwerk aus kleinformatischen Steinen mit Mörtel' ab. Beim Einsatz von Kleber mit Schlitten würde eine andere Referenzlogik notwendig werden. Dasselbe gilt für großformatige Steine, die nicht mehr von Hand getragen werden können.

1.	Gehe zum Werkzeug
2.	Nehme Werkzeug
3.	Gehe zur Arbeitsstelle
4.	Lege Werkzeug ab
5.	Gehe zum Mörtel
6.	Nehme Mörtel
7.	Gehe zur Arbeitsstelle
8.	Verarbeite Mörtel
9.	Gehe zu den Steinen
10.	Nehme Stein
11.	Gehe zur Arbeitsstelle
12.	Verarbeite Stein

Tab. 14: Referenzlogik für 'Mauerwerk aus kleinformatischen Steinen mit Mörtel'

Die in Tab. 14 aufgeführten 12 Schritte können um technische Regeln, z.B. zum Arbeitsschutz, erweitert werden. Als Beispiel sei hier der Aufbau eines Gerüsts ab einer bestimmten Wandhöhe³⁷ genannt. Zur Anwendung kommt hier unter anderem DIN 4420 (Arbeits- und

³⁷ Optimale Arbeitshöhen liegen zwischen 0,6 und 1,2 m über der Standfläche des Verarbeiters (z.B. http://www.xella.de/downloads/deu/broschures/Jumbo_Wirtschaftlichkeit.pdf, S. 3 (20.09.05))

Schutzgerüste). Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Umsetzung von Regelungen aus Normvorschriften in Verfahrenslogiken nicht Gegenstand dieser Arbeit ist, da grundsätzlich davon ausgegangen wird, dass diese 'harten Regeln' mit Algorithmen gut abzubilden sind. Eine weitere Anwendung von Regeln ergibt sich bezüglich der Behandlung der Schritte 1 bis 4. Ist das Werkzeug einmal an der Arbeitsstelle, kann die Verfahrenslogik die Schritte 1 bis 4 auslassen und direkt mit Schritt 5 beginnen.

Die Detailstufe der Referenzlogik ist bei den unterschiedlichen Leistungsbereichen (z.B. nach dem StLB-Bau) im Bauwesen von dem Ähnlichkeitsgrad der analysierten Verfahren abhängig. Anhand des Schalungsbaus lässt sich dies gut nachvollziehen. Die Referenzlogik könnte den Schalungsprozess so beschreiben: a) Aufstellen der Schalttafel b) Ausrichten der Schalttafel c) Verankern der Schalttafel. Alle drei Prozesse kommen sowohl bei einhäufiger als auch bei zweihäufiger Schalung vor. Eine Fortführung der obigen Schritte, z.B. mit d) Ankerstäbe einsetzen, e) Abstandhalter einsetzen und f) Schalung schließen kann nicht vorgenommen werden, da diese Bausteine nur für die zweihäufige Schalung zutreffen. Es bedarf also einer Unterscheidung in einhäufige und zweihäufige Schalung. Dies führt zu stärker differenzierten Referenzmodellen für den Leistungsbereich Schalung. Nur wenn eine überschaubare Anzahl an Referenzmodellen übrig bleibt, kann der Anwender effizient modellieren. Das StLB-Bau stellt heute eine der komplettesten Sammlungen von Referenzbeschreibungen für Bauproduktionsprozesse dar. Diese Sammlung kann als Grundlage für den Aufbau von Aufträgen an Avatare gelten. Dazu müssen die Orte und eventuell erweiterte Prozesslogik in die StLB-Bau-Beschreibungen eingebettet werden. Als Anzeichen hierfür mag die Möglichkeit der Definition von Verfahren bei der Abgabe von Angeboten gelten. Die Ausschreibung verlangt dabei vom Bauunternehmer die Angabe von bestimmten Produktspezifikationen, z.B. gewählte Schalttafeln. In Ergänzung hierzu könnte der Unternehmer auch eine Prozesslogik in das Angebot integrieren.

4.3.2 Prozessdauern

Vorliegende Arbeit verfolgt das Prinzip der interaktiven Prozessmodellierung mit einem teilautomatisierten Prozessmodell. Es wird unterschieden in repetitive und nicht repetitive Teilprozesse einer Verfahrenslogik. Bewegungsprozesse von Ressourcen sind als nicht repetitiv anzusehen. Betrachtet man beispielsweise die Verfahrenslogik für das Beispiel aus Tab. 14, so stellt man fest, dass der logische Ablauf zwar repetitiv ist, nicht jedoch die einzelnen Dauern für die Prozesse bei zwei unterschiedlichen Wänden. Hier sind nur Teile der einzelnen Dauern annähernd repetitiv, z.B. die Prozesse in den Schritten 2, 4, 6, 8, 10 und 12. Die Abhängigkeiten sind in Tab. 15 aufgeführt.

Da die Dauern der Bewegungsprozesse erst nach der interaktiven Bestimmung der Orte und Wege in VR berechnet werden, kann die Dauer des gesamten Auftrags nicht wieder verwendet werden. Deshalb sind automatisierte Zeitberechnungen durch den Computer auf der Basis von Erfahrungswerten für ganze Projekte nicht möglich. Die örtlichen Randbedingungen auf den entsprechenden Baustellen sind zu unterschiedlich. Nur für die repetitiven Teilprozesse werden vordefinierte Dauern (z.B. mit REFA-Methoden ermittelte Dauern) angenommen. Diese Prozesse laufen in VR als Animationen mit einer festen Dauer ab, ohne dass der Anwender eingreifen kann. So kann Schritt 10 (Nehme Stein in Tab. 15) beispielsweise mit einem festen Sekundenwert bewertet werden. Im Unterschied dazu werden Bewegungsprozesse erst berechnet, wenn die Orte bekannt sind. Die Dauer des Bewegungsprozesses ist abhängig von den getroffenen Einstellungen zum Rendering.

Nr.	Prozess	Dauer ist../abhängig von der..
1.	Gehe zum Werkzeug	Distanz zwischen aktueller Position und Werkzeug
2.	Nehme Werkzeug	repetitiv
3.	Gehe zur Arbeitsstelle	Distanz zwischen Werkzeug und Arbeitsstelle
4.	Lege Werkzeug ab	repetitiv
5.	Gehe zum Mörtel	Distanz zwischen Arbeitsstelle und Mörtel
6.	Nehme Mörtel	repetitiv
7.	Gehe zur Arbeitsstelle	Distanz zwischen Mörtel und Arbeitsstelle
8.	Verarbeite Mörtel	repetitiv
9.	Gehe zu den Steinen	Distanz zwischen Arbeitsstelle und Steinen
10.	Nehme Stein	repetitiv
11.	Gehe zur Arbeitsstelle	Distanz zwischen Steinen und Arbeitsstelle
12.	Verarbeite Stein	repetitiv

Tab. 15: Repetitive und variable Dauern von Einzelschritten einer Verhaltenslogik

4.3.3 Aufträge ohne Prozesslogik

Die interaktive Modellierung geht davon aus, dass Prozesswissen in der Form von Logikbausteinen wiederverwendbar abgelegt wurde und für die Modellierung abgerufen werden kann. Dies mag für die meisten Bauleistungen auch zutreffen. Dennoch muss davon ausgegangen werden, dass Sonderfälle bei der Soll-Spezifikation von Bauleistungen auftreten. Dies kann bei besonderen Bauteilen oder Bauverfahren der Fall sein, die nicht zum Standardrepertoire von Baubetrieben zählen, selbst wenn diese hoch spezialisiert sind. Für diesen Fall muss es möglich sein, die Vergabe von Aufträgen auf der virtuellen Baustelle so vorzunehmen, dass die Bewertung dieser Sonderfälle möglich wird. Es werden dazu zwei Lösungen aufgezeigt.

Manuelle Bewertung von Aufträgen

Bei der manuellen Bewertung von Aufträgen werden die Ergebnisse der sonst interaktiv vergebenen Aufträge manuell definiert. Das Ergebnis der interaktiven Modellierung ist die Definition der Kosten und des zeitlichen Bauablaufs pro Auftrag. Existiert zu einem Bauteil keine entsprechende Prozesslogik, kann die Dauer des Vorgangs nicht ermittelt werden. Diese ist jedoch die Grundlage für die monetäre Bewertung der Ressourcen. In dieser Situation ist es dem Anwender überlassen, die Dauer aus der Erfahrung heraus zu schätzen. Ohne die Existenz einer Prozesslogik kommt es auch nicht zu einer visualisierten Ausführung auf der virtuellen Baustelle. Die Ressourcen müssen keine Wege zurücklegen, da keine Orte definiert sind. Es ist lediglich möglich, die Ressourcen für die angegebene Dauer an das Bauteil zu `binden`, damit der Anwender sieht, dass dort Ressourcen im Einsatz sind. Damit ist die Forderung nach der Visualisierung der Bewegungslogik bei der Ausführung von Aufträgen im Produktionsmodell nicht gegeben. Die manuelle Bewertung hat ihre Berechtigung bei Spezialaufträgen, wo die Entwicklung einer Prozesslogik unwirtschaftlich ist.

Entwicklung eigener Prozesslogiken

Je nach Aufwand der Entwicklung einer Prozesslogik für die interaktive Modellierung kann entschieden werden, ob sich die Entwicklung einer Logik aus bestehenden Logikbausteinen auf höchster Detailebene lohnt. Dadurch entstehen unter Umständen sehr spezifische Logikbausteine, die nur einmal in einem Projekt Anwendung finden. Dies kann bei verfahrenstechnisch komplizierten oder kostentreibenden Bauteilen lohnenswert sein.

Die Vorgehensweise bei der Entwicklung eigener Prozesslogiken lehnt sich an die interaktive Modellierung an. Der Anwender spielt einen Musterprozess durch und speichert diese Prozesslogik ab. Während der Modellierung werden die verwendeten Logikbausteine auf der höchsten definierten Detailstufe der Verfahrenslogik (siehe z.B. 'Nehme Stein' in Tab. 14) identifiziert und zusammen mit den verwendeten Orten in chronologischer Reihenfolge gespeichert. Das Ergebnis ist eine Verfahrenslogik wie in Tab. 14. Der Anwender muss beim Entwickeln eigener Prozesslogiken auf der höchsten Detailstufe modellieren. Diese Detailstufe muss er bei der interaktiven Modellierung meiden, da die Anzahl der zu verwendenden Logikbausteine auf höchster Detailebene groß ist. Die Entwicklung eigener Prozesslogiken macht eine aufwendige Erhebung und Abbildung 'atomarer' Logikbausteine für spezifische Anwender oder Bauverfahren notwendig.

4.4 Zeit auf virtuellen Baustellen

Die entscheidende Fragestellung bei der Bewertung der Effizienz der interaktiven Modellierung ist die Frage nach der Dauer des gesamten Modellierungsprozesses. Eine gute Lösung beschränkt den Modellierungsprozess auf das Treffen der relevanten Entscheidungen im Bauablauf. Dies kann beispielsweise über eine sinnvolle Definition von autonomen Logikbausteinen erfolgen. Ebenso muss das Rendering schneller als in Echtzeit möglich sein, damit nicht der gesamte Bauablauf in Echtzeit durchgespielt werden muss. In Abhängigkeit der Komplexität des Projektes sollte der Prozess der interaktiven Modellierung für den Anwender so kurz wie möglich sein, ohne dass auf visualisierte Prozessabschnitte verzichtet werden muss. Zur Lösung des Zeitproblems wird im Folgenden eine Lösungsstrategie vorgestellt.

4.4.1 Zeit in virtueller Realität

Der Prozess der interaktiven Modellierung in VR ist begleitet von der Berechnung zahlreicher aufeinanderfolgender Bilder (Frames) in der VR-Engine. Die Anzahl der Bilder pro Zeiteinheit wird über die Bildrate wiedergegeben, z.B. Frames pro Sekunde (fps)³⁸. Je höher die Bildrate, desto flüssiger ist die Darstellung von Zustandsänderungen am Bildschirm. Der Echtzeit-Effekt von VR-Umgebungen wird erreicht, indem die Bildrate dem maximalen Verarbeitungsvermögen des Auges angepasst wird. Der Grenzbereich für die Wahrnehmungsfähigkeit des Auges liegt bei ca. 60 Bildern pro Sekunde. Ab dieser Schwelle nimmt das Auge den Neuaufbau eines Bildes nicht mehr wahr und Bewegungen erscheinen wie in der Realität. Auch unterhalb dieser Schwelle können Bewegungen am Bildschirm realitätsnah sein. Für die Visualisierung von Bauprozessen in VR können niedrigere Bildraten gewählt werden, da nicht alle Bilder bedeutungsvoll sind. Die Anzahl der Bilder pro Zeiteinheit ist jedoch aufgrund hardwaretechnischer Einschränkungen begrenzt. Sowohl der Bildschirm als auch die Grafikkarte sind hier maßgebend. Der Bildschirm muss die Bilder ausreichend schnell darstellen

³⁸ Beispiele für Frameraten: Film 24 frames per second (fps), NTSC-Standard beim Fernsehen 30 fps

können, die Grafikkarte muss die Bilder ausreichend schnell berechnen können. Es wird davon ausgegangen, dass die Darstellungszeit eines Bildes unabhängig von dessen Berechnungszeit konstant ist.

Für die interaktive Modellierung bedeutet dies, dass der gesamte Modellierungsprozess aus einer Anzahl von Bildern mit einer festen Dauer besteht. Geht man von einer Bildrate von 10 fps aus, dann werden pro Sekunde der Realität 10 Bilder berechnet und dargestellt. Weiterhin wurde gefordert, dass der gesamte Bauprozess auf der virtuellen Baustelle möglichst in Echtzeit darstellbar wird. Das hätte zur Folge, dass ein Projekt über ein Jahr (365 Tage x 8 Stunden x 60 Minuten x 60 Sekunden = 10.512.000 Sekunden) aus insgesamt mehr als 100 Mio. Bildern bestünde. Es wird klar, dass diese Zahl stark reduziert werden muss, um die Anwendbarkeit der interaktiven Modellierung zu ermöglichen. Es werden zwei Strategien untersucht, um den Ablauf der Zeit in VR zu beeinflussen: einmal kann die Anzahl der Bilder reduziert werden, zum anderen die Dauer der Darstellung eines Bildes.

4.4.2 Verringerung der Bildanzahl

Die Verringerung der Bildanzahl hat zur Folge, dass unter Umständen nicht alle Schritte einer Prozesslogik visualisiert werden. Fallen darunter wichtige Schritte, kann dies zu Missverständnissen bei der visuellen Interpretation des Prozesses führen. Es muss folgende Frage gestellt werden: Wieviele Bilder pro physikalischer Zeiteinheit (z.B. Sekunde) müssen dargestellt werden, damit der Prozess unmissverständlich kommuniziert wird?

Eine Bildrate von 60 fps ist für die interaktive Modellierung nicht notwendig, da eine solche hohe Framerate nur Sinn macht, wenn man auf sehr flüssige Bewegungen angewiesen ist. Dies mag für photorealistische Animationen zutreffen, wo Lichtveränderungen eine große Rolle spielen. Für die Darstellung von Bauprozessen kann eine wesentlich niedrigere Bildrate gewählt werden, die stark unter der Wahrnehmungsfähigkeit des Auges liegt. Da bei der interaktiven Modellierung die Detailstufe in den Logikbausteinen definiert ist, kann die Dauer des kürzesten Schrittes einer Prozesslogik maßgebend für die Bestimmung der minimalen Bildrate sein. Auf diese Art und Weise wird gewährleistet, dass kein Schritt bei der Darstellung ausgelassen wird. Es wird der Einfachheit halber davon ausgegangen, dass diese Dauer bei einer physikalischen Sekunde liegt. Damit ergibt sich eine gewählte Bildrate von 1 fps. Damit erhält man für ein Jahresprojekt eine Bildanzahl von 10.512.000 Bildern.

Als Beispiel kann die Bewegung des Auslegerarms eines Baggers in eine bestimmte Position dienen (Abb. 44). Es wird angenommen, dass der Prozess in physikalischer Echtzeit 4 Sekunden dauert. Bei einer Bildrate von 1 fps wären dies insgesamt 4 Frames. Verringert man die Frameanzahl und lässt man die VR-Engine nur jeden zweiten Frame einer Sequenz berechnen, verringert sich die Darstellungszeit von 4 auf 2 Sekunden, ohne dass die Aussagekraft der Bewegung im Wesentlichen verloren geht. Die Vergrößerung des Abstandes zwischen dargestellten Frames (jeden dritten, vierten etc.) ermöglicht weitere Verkürzungen der Darstellungszeit. Der Verkürzungsfaktor kann variiert werden, um die Geschwindigkeit der Darstellungszeit den Bedürfnissen anzupassen. Geht es bei einer Analyse um Detailfragen, kann die Geschwindigkeit der Darstellungszeit auf 1 fps reduziert werden, um alle Einzelschritte nachvollziehen zu können. Will man den Bauablauf zu Präsentationszwecken abspielen, kann der Faktor so hoch gewählt werden, dass eine lange Gesamtbauzeit (z.B. einige Jahre) nur einige Minuten an Darstellungszeit in Anspruch nimmt.

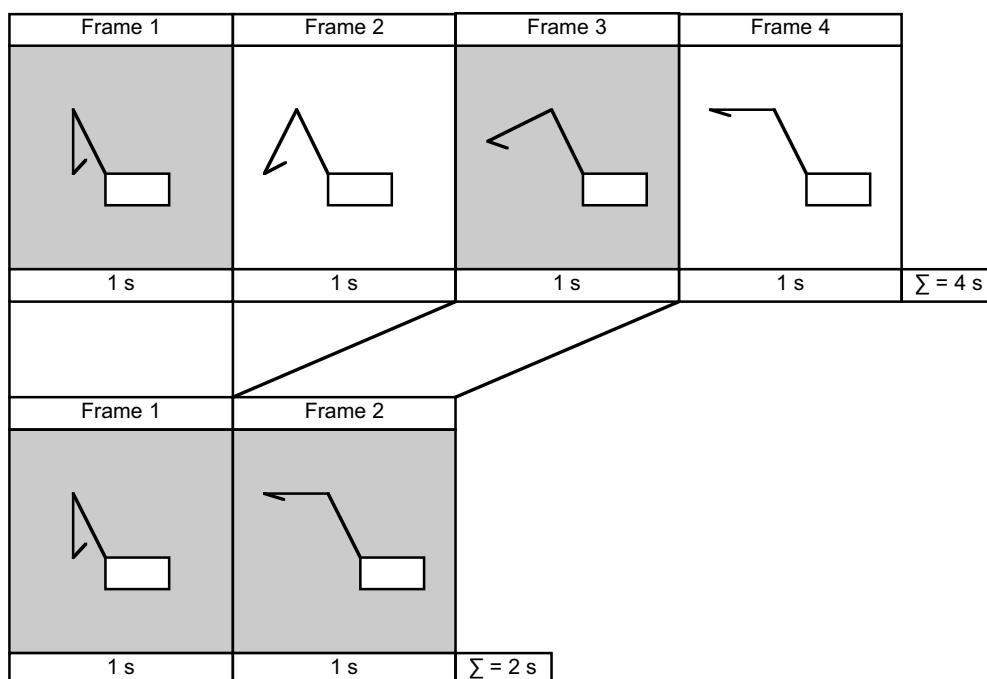


Abb. 44: Raffung der Darstellungszeit durch Verringerung der Frameanzahl

Die einfache Raffung von Zeit durch die Verringerung der Bildanzahl ist nicht die optimale Lösung für lange andauernde Projekte. Bei einem hohen Verkürzungsfaktor geht ein großer Teil der visuellen Information verloren. Dies kann Risiken bei der Bewertung von parallelen Prozessen auf der virtuellen Baustelle verdecken. Der Anwender muss also selbst bewerten, wo er intensiv 'nachsehen' muss und wo er Bilder auslassen kann. Für lange andauernde Projekte ist eine andere Strategie zu entwickeln, um die Darstellungszeit zu kürzen. Diese besteht darin, den Ablauf der Zeit im Vergleich zur physikalischen Echtzeit zu beschleunigen.

4.4.3 Raffung der Darstellungszeit

Neben der Verringerung der Bildanzahl stellt eine dynamische Bildrate eine weitere Lösungsstrategie dar, um den Zeitaufwand für die interaktive Modellierung zu reduzieren. Dabei wird nicht die Anzahl der Bilder reduziert, sondern deren Darstellungszeit. Die Geschwindigkeit der Folge der Bilder wird erhöht, sodass Bewegungen schneller als in Echtzeit ablaufen. Man unterscheidet hier die physikalische Zeit (Zeit in der Realität) und die virtuelle oder logische Zeit (Zeit in VR).

Die virtuelle Zeit spielt für die Ermittlung von 'realen' Prozessdauern eine entscheidende Rolle. Um den Ablauf von physikalischer und virtueller Zeit kombinieren zu können, muss der Wert für die Dauer eines Frames verändert werden können, ohne dass die Anzahl der Frames sich verändert. Die Dauer eines Frames kann gleich gesetzt werden mit der Dauer der Darstellung eines Bildes aus der Echtzeit-Sequenz in der virtuellen Umgebung. Vorliegende Arbeit fordert die Darstellung von Frames derart, dass die gesamte Sequenz eines Prozesses möglichst realitätsnah wahrgenommen werden kann. Es ist nicht optimal, die Bewegungen eines Baggers mit einer verringerten Bildanzahl zu visualisieren. Die Folge wären stark 'springende' Bewegungen, die wenig authentisch wirken würden.

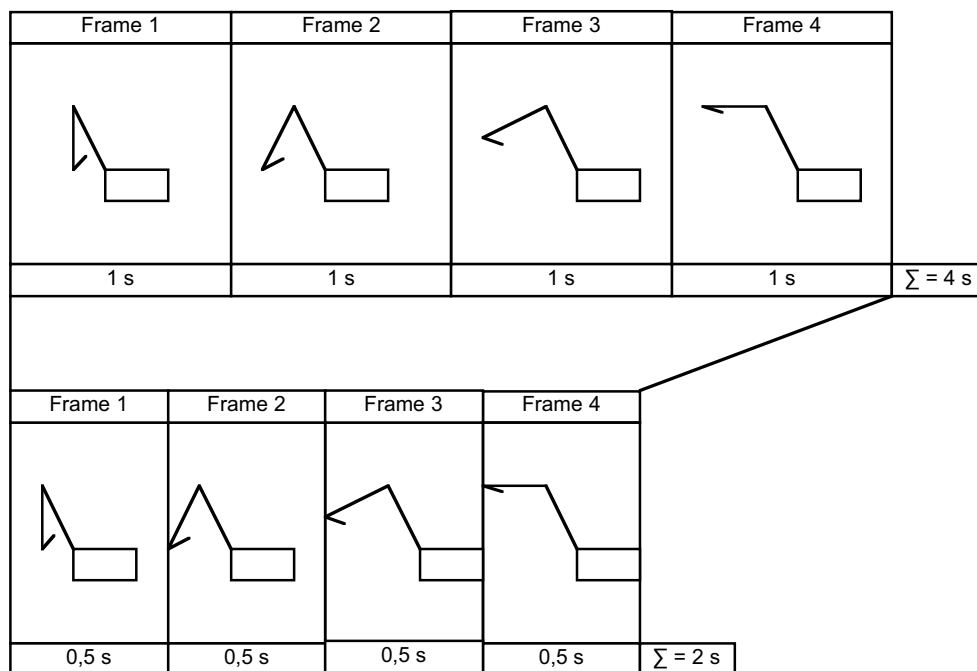


Abb. 45: Raffung der Darstellungszeit durch Verringerung der Framedauer

Wie Abb. 45 schematisch zeigt, kann die Zeit durch eine kürzere Framedauer 'beschleunigt' werden, damit der Anwender bei wiederkehrenden Prozessen nicht jedes Bild in physikalischer Echtzeit abwarten muss.

Die Dauer des Modellierungsprozesses wächst mit der Anzahl der Aufträge im Produktionsmodell. Geht man von Tagesleistungen und Kolonnenstärken im Produktionsmodell aus, würde die Anzahl der vom Anwender zu disponierenden Aufträge pro Jahr an Bauzeit und pro Kolonne bei ca. 230 (effektive Arbeitstage pro Jahr) liegen. Geht man weiterhin davon aus, dass die Disposition eines Prozesses inklusive Zeitsprung 5 Minuten in Anspruch nehmen darf, dann dauert die Kalkulation pro Jahr und Kolonne $230 \times 5 = 1150$ Minuten = 19,16 Stunden oder ca. 2,5 Arbeitstage. Die Arbeitszeit einer Tagesleistung wird mit 8 Stunden = ca. 500 Minuten gewählt. Das Ziel besteht also darin, 500 Minuten (= 30.000 Sekunden bzw. Bilder bei 1 fps) auf 5 Minuten (300 Sekunden und Bilder) zu raffen. Dies entspräche einem Verkürzungsfaktor von 100. Verringert man die Bildanzahl, so bedeutet dies, dass nur jedes 100-ste Bild gerendert wird. Dies wäre nicht mehr akzeptabel. Rafft man die Darstellungszeit, müsste die Bildrate bei 100 fps liegen bzw. die Framedauer bei 1/100 Sekunden. Eine solch niedrige Framedauer hätte zur Folge, dass der Bauablauf 'rennen' würde und der Anwender nicht mehr in der Lage wäre, dem Bauablauf über längere Zeit zu folgen. Eine Kombination beider Strategien ist am sinnvollsten. Wählt man eine Bildrate von 10 fps, kann jede 10-te Sekunde des realen Baustellenprozesses ein Bild gezeigt werden, um den Verkürzungsfaktor von 100 zu erreichen.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die interaktive Modellierung unter Umständen länger dauert als eine positionsbasierte Kalkulation über die Endsumme. Sie bietet jedoch einen erheblichen Mehrwert durch eine wesentlich genauere Untersuchung des Projekts. Die Visualisierung bietet dem Kalkulator die Möglichkeit, Zusammenhänge und Fehler im Produktionsmodell besser zu erkennen. Es wäre im Einzelfall abzuwägen, ob der Mehrwert aus der Risikominimierung die Zeitinvestition rechtfertigt. Das Auslassen der Visualisierung der

technisch einfachen Teile im Produktionsmodell wäre eine Möglichkeit, um Modellierungszeit zu sparen. Eine nachträgliche Betrachtung ausgelassener Stellen wäre auf der Basis der Prozesshistorie immer noch möglich, selbst wenn dem Kalkulator die visuellen Informationen aus diesen Sequenzen für Entscheidungen im Modellierungsprozess fehlen würden.

4.5 Funktionsweise der interaktiven Modellierung

Um die Funktionsweise der interaktiven Modellierung zu demonstrieren, werden zwei Szenarien beschrieben. Im ersten Fall wird der Weg von der Disposition eines Auftrags bis zur Ermittlung der Lohnkosten dieses Auftrags geschildert. Es wird gezeigt, wie im Rahmen der Soll-Spezifikation Kosten bestimmt werden können. Im zweiten Fall steht die Vergabe von mehreren Aufträgen mit getrennten Logikbausteinen zur Abarbeitung einer Wand mit Türöffnung im Vordergrund. Es wird auf die geforderte Flexibilität bei der Anlage des Produktionsmodells eingegangen.

4.5.1 Soll-Spezifikation einer geraden Mauerwerkswand

Im Rahmen der Soll-Spezifikation (Kosten und zeitlicher Bauablauf) wird ein Beispiel aus dem Mauerwerksbau durchgespielt. Dazu wird eine Verfahrenslogik zur Erstellung von Mauerwerk mit Orten in der virtuellen Baustellenumgebung kombiniert (siehe Abb. 46).

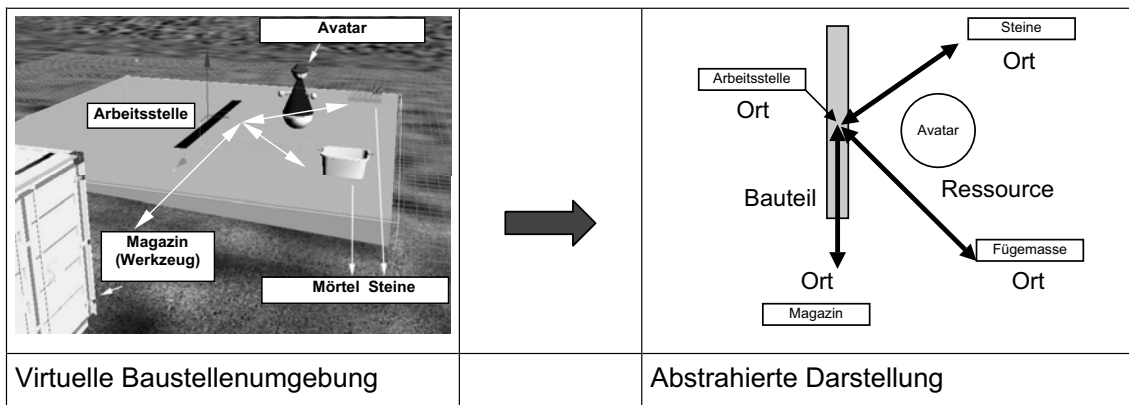


Abb. 46: Orte, Bauteil, Ressourcen und Wege in der virtuellen Umgebung

Auf der Basis der Koordinaten der Orte in der virtuellen Umgebung lassen sich Bewegungsvektoren ermitteln, anhand derer die einzelnen Schritte der Verfahrenslogik ablaufen können. Ausgehend von Tab. 15 werden mehrere Bewegungen ausgeführt, die zur Erstellung der Mauerwerkswand notwendig sind. Der Kalkulator findet als Ausgangssituation die virtuelle Umgebung in einem bestimmten Zustand vor (siehe Abb. 46, links). Er erteilt der Ressource (in diesem Fall ein Maurer-Avatar) den Auftrag, auf das Bauteil 'Mauerwerkswand' die Verfahrenslogik 'Fügen von Mauerwerk aus kleinformatischen Steinen mit Mörtel' anzuwenden. Der Ablauf des Auftrags ist in Abb. 47 in 12 Schritten dargestellt. Nach dem ersten Durchlauf der Verfahrenslogik wird die Schleife zwischen Schritt 5 und 12 solange wiederholt, bis die Menge des Bauteils abgearbeitet ist. Die definierte Verfahrenslogik verursacht zu Beginn zwölf autonom ablaufende Bewegungsprozesse in der virtuellen Umgebung. Einige Prozesse besitzen vordefinierte feste Dauern, andere werden in Abhängigkeit der örtlichen Randbedingungen individuell ermittelt. Bei den vordefinierten festen Dauern wird auf REFA-Werte zurückgegriffen. So ist in Schritt 12 mit dem Vorgang 'Verarbeite Stein' der Vorgang des Setzens und Ausrichtens des Steins im Mörtelbett gemeint, der hier mit einer Dauer von 20 s angesetzt ist.

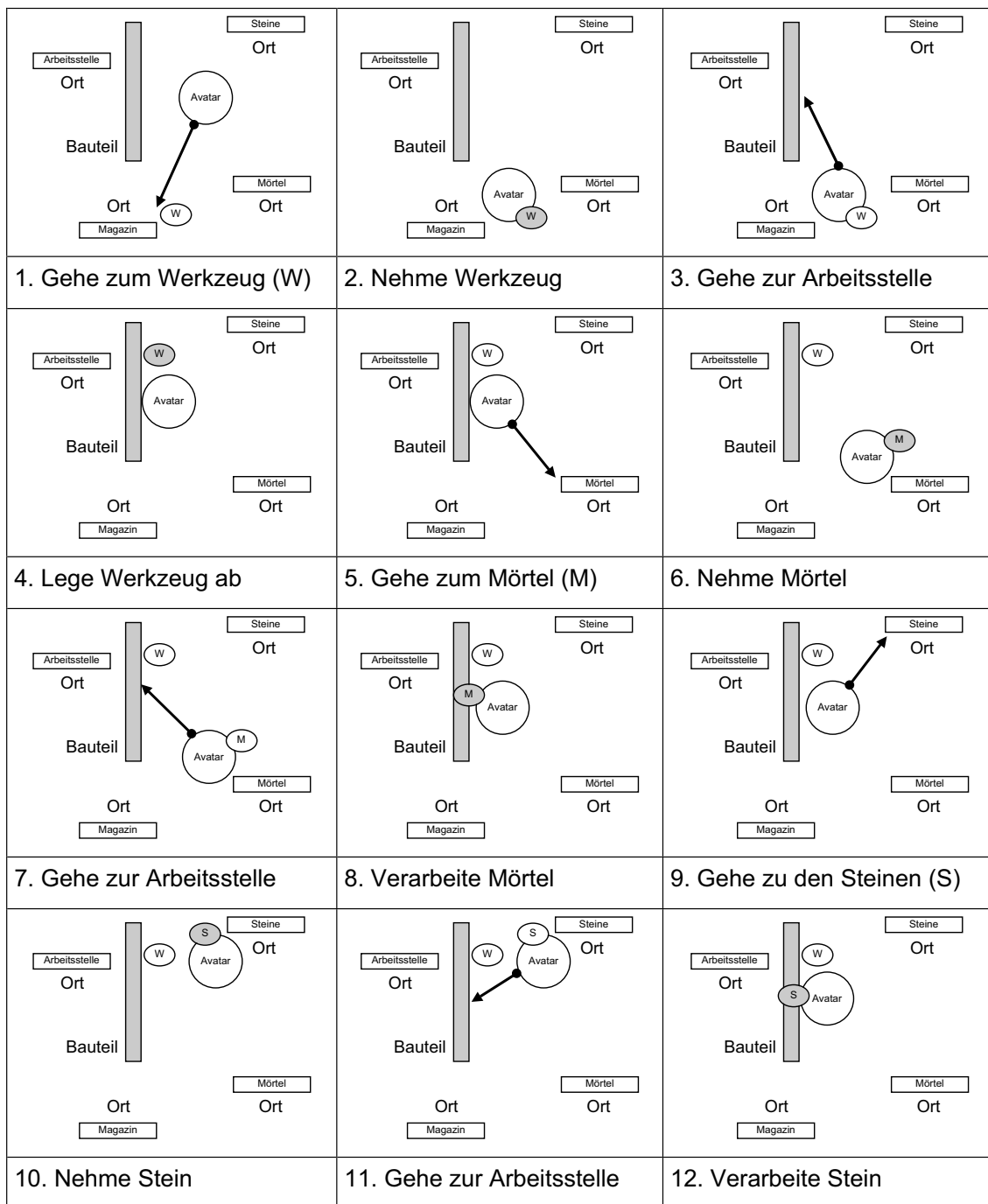


Abb. 47: Folge der Bewegungen zur Erstellung der Mauerwerkswand

Ein Vordringen auf eine noch höhere Detailstufe der Einzelprozesse, z.B. unter Berücksichtigung der Arbeitsprozesse mit Maurerschnur und Wasserwaage, wird nicht verfolgt. In Tab. 16 sind die vordefinierten und individuellen Dauern dargestellt. Als Ergebnis erhält man die Tätigkeitszeit der ersten Arbeitsschleife im Herstellungsprozess der Mauer. Danach werden die Tätigkeitszeiten aus den folgenden Schleifen zwischen den Schritten 5 und 12 ermittelt. Die Durchführungszeit des Prozesses wird dann nach Formel 1 (siehe S. 82) berechnet. Als Mittelohn wird hier nur der Lohn des Avatars angesetzt. Die Lohnkosten des Auftrags errechnen sich dann nach Formel 2 (siehe S. 83).

Nr.	Bewegungsprozess	Vordefinierte Dauern	Individuelle Dauern	Dauern (s)
1.	Gehe zum Werkzeug		5 s	5
2.	Nehme Werkzeug	10 s		10
3.	Gehe zur Arbeitsstelle		5 s	5
4.	Lege Werkzeug ab	2 s		2
5.	Gehe zum Mörtel		4 s	4
6.	Nehme Mörtel	5 s		5
7.	Gehe zur Arbeitsstelle		4 s	4
8.	Verarbeite Mörtel	7 s		7
9.	Gehe zu den Steinen		4 s	4
10.	Nehme Stein	5 s		5
11.	Gehe zur Arbeitsstelle		4 s	4
12.	Verarbeite Stein	20 s		20
Gesamtdauer in Sekunden (s)				75

Tab. 16: Ermittlung der Tätigkeitszeit der ersten Arbeitsschleife im Auftrag

Der Fertigstellungsgrad des Auftrags berechnet sich im Fall des Mauerwerks über die Verrechnung der Einzelmengen aus Stein (Menge in m^2) und Mörtel (Menge in l) aus jeder Arbeitsschleife in Bezug auf die Gesamtmengen an Stein und Mörtel in dem Wandbauteil. Einige Aspekte der Realität bleiben aufgrund der gewählten Detaillierung der Verfahrenslogik und der persönlichen Neigungen des ausführenden Menschen unberücksichtigt. Dazu gehören unter anderen:

- Anzahl der Steine, die der Maurer beim Prozess 'Aufnehmen Stein' transportiert; es wird von einem Stein pro Prozess ausgegangen
- Das Transportmittel des Avatars für den Mörtel (Kann er in einem Arbeitsgang soviel Mörtel aufnehmen, um damit genau einen Stein zu setzen?)
- Typen und Menge des Werkzeugs des Avatars

Das Beispiel Mauerwerk zeigt, dass Detailstufen bei der interaktiven Modellierung eine wichtige Rolle spielen. Die Tatsache, dass je nach abgebildetem Bauverfahren die Detailstufe variiert, lässt die Entwicklung von Verfahrenslogiken nur unter Berücksichtigung des Einzelfalls zu. In obigem Beispiel wurde bewusst entschieden, dass der Avatar beim Gang zum Mörtelkübel und zurück genau die Menge an Mörtel mitnimmt, die er zum Vermauern eines Steines benötigt. In der Realität sieht der Prozess bei unterschiedlichen Maurern auch unterschiedlich aus. Ebenso würde der Maurer den Kübel mit dem Fortschritt der Wand mitziehen. Diese Detailstufe wurde für diesen speziellen Prozess nicht angestrebt, da er Fragen hinsichtlich der Kombination mehrerer Verfahrenslogiken aufwirft. Der Ort des Kübels ist über seine Koordinaten definiert. Der Avatar würde zur Aufnahme von Mörtel bei der verwendeten Verfahrenslogik auch ans andere Ende der Baustelle laufen, wenn der Kübel z.B. nach Liefere-

nung vom Kran dort abgestellt worden ist. Die Verfahrenslogik ist nicht in der Lage, zu prüfen, ob der Kübel sich an einer plausiblen Stelle befindet. Das Versetzen des Kübels an eine sinnvolle Stelle in der Nähe der geplanten Arbeitsstelle ist ein eigener Auftrag im Vorfeld der Erstellung der Wand. Es wird in dieser Arbeit nicht untersucht, wie hoch die Anzahl an verfügbaren Verfahrenslogiken sein muss, um sinnvoll modellieren zu können. Es wurde nur die prinzipielle Vorgehensweise bei der Entwicklung von Verfahrenslogiken erläutert.

4.5.2 Individuelle Modellierung durch Interaktion

Durch interaktive Eingriffe erhält der Anwender die Möglichkeit, bei Bedarf wichtige Entscheidungen im Bauablauf aus seiner eigenen Erfahrungsperspektive heraus zu treffen und so sein individuelles technisches Wissen in die Soll-Spezifikation einzubringen. Am Beispiel einer Mauerwerkswand mit Türöffnung soll ein solcher Eingriff geschildert werden. Gegeben sei dazu als Auftrag im Produktionsmodell die Wand mit einer Türöffnung im Rohbau aus Abb. 36. Bei der Kalkulation über die Endsumme wird in Abhängigkeit der Wanddicke ein Quadrat- bzw. Kubikmeter der gesamten Wand (falls die Öffnung kleiner als $2,5 \text{ m}^2$ oder $0,5 \text{ m}^3$ ist) für die Position `Mauerwerk Herstellen` kalkuliert. Das Herstellen der Türöffnung wird in der Regel pro Tür kalkuliert. Dabei sind die Herstellung der Abmauerung und die Verlegung des Sturzes einzurechnen. Die eigentliche Produktionsfolge und örtliche Randbedingungen der Produktion werden auf dieser Abstraktionsstufe nicht berücksichtigt.

Bei der interaktiven Modellierung entspricht die Zerlegung in Einzelelemente der Produktionsfolge auf der Baustelle. Der Anwender sieht vor, erst die Produktion der beiden Wandteile um die Türöffnung bis zur Oberkante der Türöffnung zu veranlassen. Danach kann er die Verlegung des Sturzes veranlassen. Zum Schluss folgt das Aufmauern der Wand. Es liegen drei Aufträge und zwei Verfahrenslogiken vor (Tab. 17). Dieses Beispiel stellt nur eine von vielen Lösungsmöglichkeiten dar. Außerdem ist es relevant, welche Arten von Verfahrenslogiken als Logikbausteine vordefiniert sind, um die Einzelelemente zu beauftragen. Beauftragt man die gesamte Wand mit Türöffnung, müsste die Verhaltenslogik des Avatars selbst herausfinden, ob im Modell eine Tür mit Sturz vorhanden ist und die dazu gehörigen Verfahrenslogiken bei Bedarf völlig autonom ausführen.

Auftrag	Verfahrenslogik
Türflanken	Mauerwerk (z.B. `Fügen von Mauerwerk aus kleinformatischen Steinen mit der Fügmasse Mörtel`)
Türsturz	Sturz über Türöffnung (z.B. Sturz-Fertigteile in Mörtelbett verlegt)
Aufmauerung	Mauerwerk (z.B. `Fügen von Mauerwerk aus kleinformatischen Steinen mit der Fügmasse Mörtel`)

Tab. 17: Aufträge und Verfahrenslogiken für eine Mauerwerkswand mit Türöffnung

Die Entwicklung der Analyse- und Entscheidungslogik, auf deren Basis ein Algorithmus in einem solchen Fall `Intelligenz` demonstrieren könnte, ist nicht notwendig, da die menschliche Entscheidung hier effizienter ist. Interaktive Eingriffe des Anwenders werden demnach an mehreren Stellen notwendig (Abb. 48).

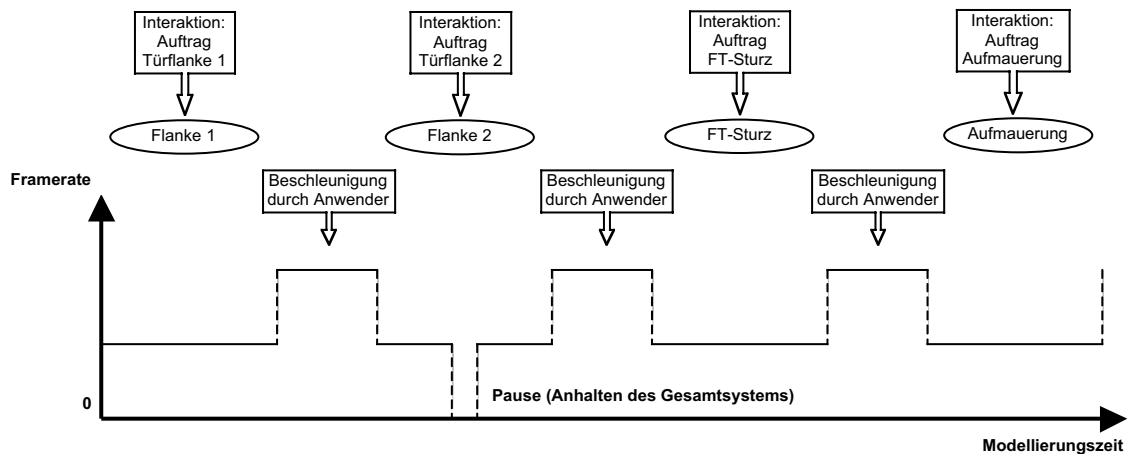


Abb. 48: Interaktive Eingriffe des Anwenders bei der Modellierung der Wand

Der Ablauf der Simulation sieht vor, dass der Kalkulator zuerst eine der Türflanken in Auftrag gibt und beschleunigt. Die Beschleunigung endet, wenn die Menge des Auftrags abgearbeitet ist. Danach folgen die zweite Türflanke und eine zweite Beschleunigung bevor der Sturz beauftragt wird. Auch nach dem Sturz wird beschleunigt. Abschließend wird das restliche Mauerwerk in Auftrag gegeben. Die Beschleunigung des Ablaufs sorgt dafür, dass der Anwender nicht warten muss, bis sämtliche Frames in Echtzeit dargestellt wurden. Außerdem kann durch die interaktiven Entscheidungen die Komplexität der einzelnen Verfahrenslogiken stark reduziert werden. Der Anwender hat die Möglichkeit, das Gesamtsystem manuell anzuhalten, wenn er eine Pause benötigt. Dann werden die Zeitmessung und alle laufenden Aufträge angehalten.

5 Erprobung an einem Prototyp

Zur Verifikation der vorgeschlagenen Methode zur interaktiven Modellierung wurde ein Prototyp mit einer Game Development Engine entwickelt. Das Ziel der Entwicklung bestand darin, einige wesentliche Funktionalitäten der interaktiven Modellierung praktisch nachzuweisen. Das Augenmerk lag auf der Bestimmung individueller Prozessdauern für ein Ladespiel zwischen Bagger und LKW.

Quest3D wurde als Werkzeug gewählt, weil die Entwicklung einer virtuellen Welt mit den beigelegten Logikbausteinen auch ohne Programmieraufwand (Zeilencode) möglich ist. Zudem existiert die Möglichkeit, externe Datenbanken über eine ODBC-Schnittstelle mit der virtuellen Umgebung bidirektional zu verbinden. Das Funktionsprinzip von Quest3D sieht die Entwicklung eines Szenegraphen vor, in welchem das Verhalten von virtuellen 3D-Objekten über ein grafisches Programmierwerkzeug abgebildet wird. Dazu werden verschiedene Einzelgraphen hierarchisch zu einem großen Graph zusammengebaut. Beginnend von einem Start-Graph wird dann die Spiel-Logik abgerufen. Die technischen Aspekte der Prototyp-Entwicklung werden nicht vertieft dargestellt. Es wird auf eine von Meyer [Mey05] unter Anleitung des Verfassers erstellte Diplomarbeit an der Bauhaus-Universität Weimar verwiesen, in welcher das Funktionsprinzip detailliert vorgestellt wird. Die in Quest3D verwendeten Logikbausteine ('Channels') bieten verschiedene Ein- und Ausgänge, über welche Daten fließen. Die Abarbeitung der Ein- und Ausgänge erfolgt von links nach rechts.

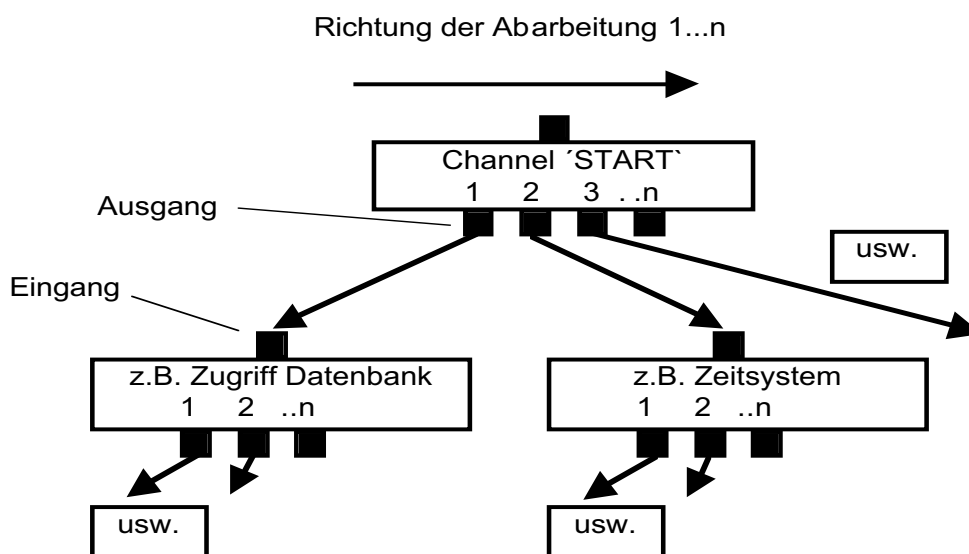


Abb. 49: Ablauf der Programm-Logik in Quest3D

Es können so für verschiedene Szenen des Spiels (z.B. Schwierigkeitsstufen) unterschiedliche Teilgraphen implementiert werden. Verknüpfungen können auch über mehrere Hierarchiestufen und Szenen hinweg über nicht sichtbare Pfeile erfolgen. Der wichtigste Unterschied zu bestehenden Methoden besteht darin, dass in Quest3D virtuelle 3D-Objekte direkt mit der Verhaltenslogik in den Graphen verknüpft sind. Dies erlaubt die Visualisierung des Verhaltens und die Interaktion zwischen Anwender und 3D-Modell. In den folgenden drei Punkten werden ausgewählte Aspekte des entwickelten Prototyps behandelt.

5.1 Konzept für ein einfaches Ladespiel zwischen Bagger und LKW

Bei der Entscheidung über die Wahl des Prozesskomplexes für den Prototyp fiel die Wahl auf Erdbauprozesse, da deren Logik gut erforscht ist. Aufgrund der Verwendung des 3D-Modells musste die Detailstufe im Prozessmodell im Vergleich zu diesen Arbeiten angehoben werden. Das Konzept des Spiels sollte folgende Anforderungen erfüllen:

- Der Anwender beeinflusst interaktiv das Verhalten der Objekte in der virtuellen Umgebung.
- Die Identifikation und Auswahl der Objekte, z.B. Baggertyp (Mobilbagger, Kettenbagger) erfolgt über visuelle Methoden.
- Objekte bewegen sich realitätsnah (z.B. Geschwindigkeit des Baggers oder LKW).
- Einzusetzende Ressourcen mit Parametern werden aus einer externen Datenbank gewählt.
- Die Zeitmessung der Prozessdauern unter Identifikation der verschiedenen Zeitarten erfolgt über einen Zeitmesser in der virtuellen Umgebung.
- Vordefinierte Prozessparameter werden in eine externe Datenbank geschrieben.

Die nachgelagerte Nutzung der Parameter zu Analyse Zwecken in der externen Datenbank wurde weggelassen. Das Ziel des Prototyps besteht in der Ermittlung von Prozessdauern zur Bewertung der Kosten der einzelnen Prozesse. Es sollte der Nachweis erbracht werden, dass Prozessdauern für die Soll-Spezifikation durch die interaktive Modellierung bestimmt werden können. Die Implementierung der Zeitraffung wurde ausgelassen. Sämtliche Spielaktivitäten laufen in angenäherter Echtzeit ab. Zur weiteren Erläuterung des Spielkonzepts werden die Objekte und Orte der virtuellen Baustelle und die Funktionsweise der Interaktion näher beschrieben.

5.1.1 Objekte und Orte

Hinsichtlich der Betrachtung der Objekte auf der virtuellen Baustelle kann unterschieden werden in Umgebungsobjekte und sich bewegende Objekte. Die Detailstufe bei der Visualisierung der Umgebungsobjekte wurde grob gehalten. Lediglich Himmel, Boden, eine auf dem Boden liegende Straße und eine Abladestelle wurden als Umgebungsobjekte dargestellt. Die Straße besteht aus einem fertiggestellten Fahrstreifen mit zwei Fahrtrichtungen. Die Bauaufgabe besteht darin, diesen Fahrstreifen um einen weiteren Fahrstreifen mit zwei Fahrtrichtungen zu ergänzen. Dazu soll der Aushub im Verlauf des neuen Fahrstreifens durchgeführt werden. Als bewegliche Objekte wurden ein Bagger und ein LKW implementiert. Um auch hier verschiedene Varianten im Verhalten der Objekte untersuchen zu können, wurde der LKW mit autonomem Verhalten implementiert, während der Bagger die interaktive Schnittstelle zum Kalkulator darstellt und auf dessen Aufträge wartet. Einen Überblick über die verwendeten Objekte und deren Eigenschaften gibt Abb. 50. Bagger und LKW befinden sich an der Entladestelle, die über einen Geländeeinschnitt erkennbar ist. Diese Position ist der Startpunkt der Anwendung. Von hier starten beide Fahrzeuge zu der vom Anwender bestimmten Arbeitsstelle.

Die Definition der Orte steht mit der Verfahrenslogik im Zusammenhang. Hier wurden Vereinfachungen vorgenommen, welche die Entwicklung der Verfahrenslogik erleichterten. Die Bestimmung des Ortes des LKW wird relativ zur Position des Baggers automatisch bestimmt.

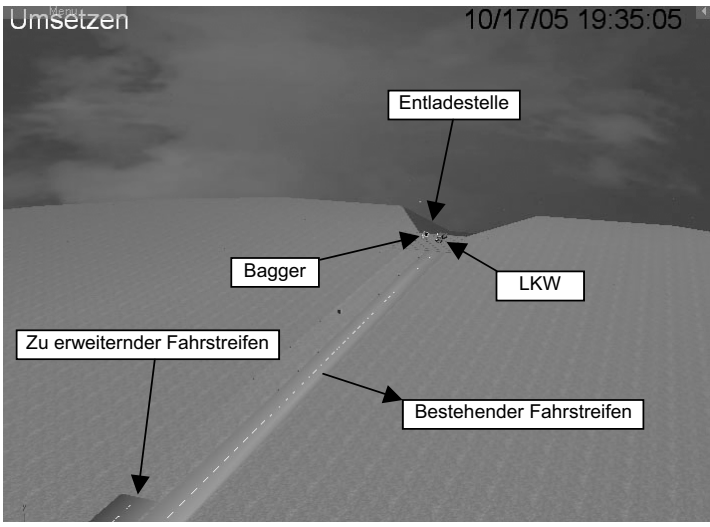

3D-Darstellung	Eigenschaften der Objekte
 	<p>Die Umgebung zeigt die Entladestelle sowie die dort vorgehaltenen Maschinen. Weiterhin ist die Bauaufgabe sichtbar, die in der Erweiterung einer Straße um einen zweiten Fahrstreifen besteht.</p> <p>Beim Bagger handelt es sich um einen Hydraulik-Kettenbagger mit Tieflöffel. Die Bewegungen sind an die Realität angelehnt. Ausleger und Oberwagen sind beweglich.</p> <p>Der LKW besitzt neben den üblichen Fahrfunktionen auch die Möglichkeit, die Bewegung zum Abkippen darzustellen.</p>

Abb. 50: Objekte auf der virtuellen Baustelle des Prototyps

Die Bestimmung des Ortes des Baggers wird in Interaktion mit dem 3D-Modell durch den Anwender festgelegt. Diese Funktionalität ist entscheidend für die Bestimmung von situativen Prozessdauern, da der Anwender selbst entscheidet, wann und wo der Bagger mit dem Aushubprozess beginnt (Tab. 18).

Ort	Eigenschaften des Ortes
Position des LKW	LKW folgt dem Bagger in relativem Abstand
Position des Baggers	Bestimmung erfolgt interaktiv durch Anwender durch Anklicken der Stelle
Entladestelle des LKW	Feste Koordinaten
Baggerstelle	Bestimmung erfolgt interaktiv durch Anwender durch Anklicken der Stelle

Tab. 18: Orte auf der virtuellen Baustelle des Prototyps

Ein weiterer Ort ist mit der Entladestelle des LKW gegeben. Dieser Ort ist Teil einer autonom ablaufenden Verfahrenslogik des LKW. Der Ort wird selbsttätig vom LKW angefahren, wenn dieser voll beladen ist. Die genaue Baggerstelle (Entnahmestelle für Boden) wird ebenso interaktiv vom Anwender bestimmt. Aspekte wie die Befahrbarkeit des Bodens oder die Interaktion zwischen Boden und Bagger bzw. LKW wurden aufgrund deren Komplexität nicht in

die Betrachtungen eingeschlossen. Demnach wurden Effekte wie schwerer Boden (Regen) oder Geschwindigkeitsveränderungen beim Übergang vom Gelände auf die Straße nicht abgebildet. Ebenso wurden keine Pfade für Bewegungen zwischen Orten definiert. Bagger und LKW bewegen sich überall auf der virtuellen Baustelle unter den gleichen Bedingungen. Eine weitere Vereinfachung besteht darin, dass der Boden nicht mit der Baggerschaufel interagiert. Es wird also kein 'virtueller Boden' bewegt, sondern lediglich die Schaufel animiert.

5.1.2 Interaktive Navigation

Die Interaktion ist im Prototyp auf den Bagger beschränkt. Dabei kann man Bewegungen des Baggers und die Phasenwechsel bei den Zeitarten einleiten. Die Bewegungen des Baggers führen automatisch zu den Bewegungen des LKW. Die Interaktionsmöglichkeiten zwischen Anwender und virtueller Umgebung sind in Tab. 19 aufgeführt.

Bewegung des Baggers	Interaktion über die Maus
Vom aktuellen Standort zum Zielort	Anklicken der Position des Zielorts (in der virtuellen Umgebung der Baustelle) mit der linken Maustaste
Ausrichtung auf Baggerstelle durch Drehung des Oberwagens	Anklicken der Position des Zielorts (in der virtuellen Umgebung der Baustelle) mit der rechten Maustaste
Phasenwechsel	Interaktion über die Tastatur
'Umsetzen' in 'Baggern und Beladen'	Eingabe-Taste (Return)
Starten des Aushubvorgangs	`s`-Taste

Tab. 19: Interaktionsmöglichkeiten zwischen Kalkulator und virtueller Umgebung

Als Eingabemedien für die Interaktion wurden Maus und Tastatur gewählt. Die Navigation des Baggers erfolgt durch die Maus. Die Phasenwechsel bei den Zeitarten erfolgen über die Tastatur. Lediglich der Phasenwechsel von 'Baggern und Beladen' zu 'Ablaufbedingtes Warten durch Abladen' erfolgt automatisch, wenn der LKW voll ist.

Die Interaktivität des Spiels bietet dem Anwender die Möglichkeit, komplexe Entscheidungen zu treffen, die aufgrund ihrer Vieldimensionalität von Algorithmen nicht sinnvoll gelöst werden können. Dazu gehört vor allem die Entscheidung, wo mit dem Baggern begonnen werden soll. Dazu kann der Aushub in kleine Einheiten unterteilt werden, die in einer vorgegebenen Chronologie abgearbeitet werden. Der automatische Ablauf von solchen Prozessen muss vom Anwender unterbrochen werden können. Dies kann notwendig sein, wenn Ressourcen spontan aus einem Prozess abgezogen werden und an einer anderen Stelle zum Einsatz kommen. Zur Wahrung dieser Flexibilität wird in Kauf genommen, dass der interaktive Anteil für den Anwender höher ist.

5.2 Entwicklung der Zeitsteuerung

Die Zeitsteuerung ist im Rahmen dieser Arbeit essenziell für die Ermittlung von realitätsnahen Prozessdauern. Da der Prototyp ohne Zeitraffung implementiert wurde, konnte die Systemuhr des Computers verwendet werden, um die Start- und Stoppzeiten zu erfassen. Da die Systemuhr in physikalischer Echtzeit läuft, kann auch das Spiel nur in Echtzeit gespielt werden.

5.2.1 Funktionsweise der virtuellen Uhr

Die virtuelle Uhr funktioniert wie eine computerinterne Stoppuhr. Der Anwender kann entscheiden, ob er im Registriermodus arbeitet (Zeitpunkte werden in die externe Datenbank geschrieben) oder ob er nur im Testmodus arbeitet (es werden keine Zeitpunkte erfasst). Die Steuerung des Modus erfolgt dabei über Buttons in der Spieloberfläche (Abb. 51).

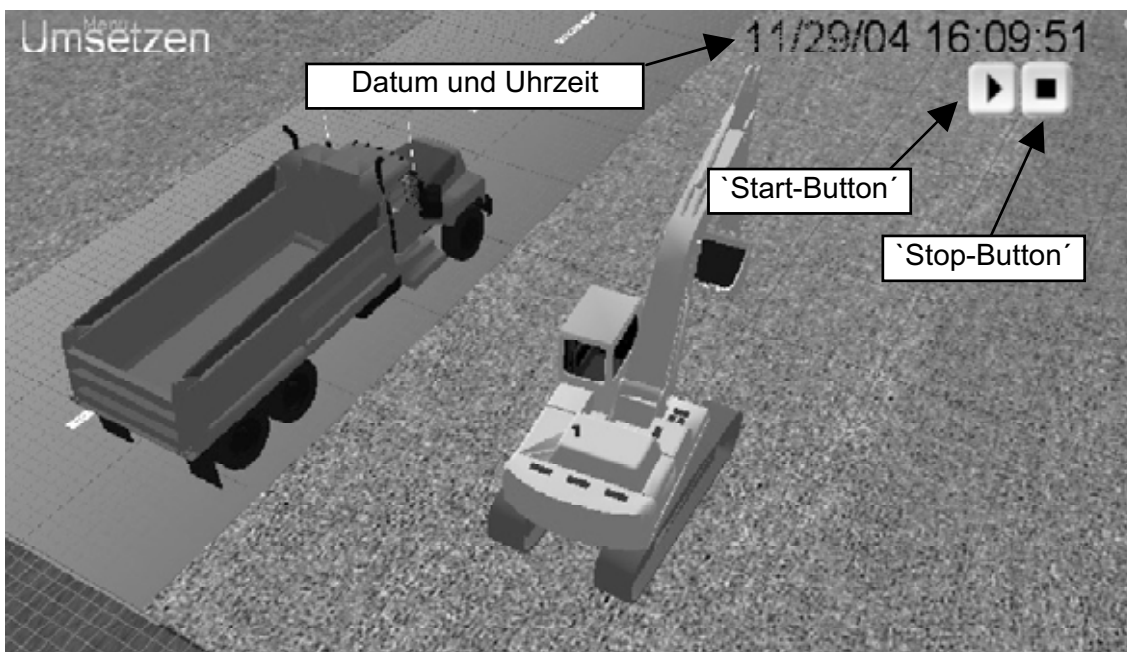


Abb. 51: Oberfläche des Computerspiels nach dem Start

Der linke 'Start-Button' beginnt die Erfassung der Zeitpunkte und mit dem rechten 'Stop-Button' wird die Erfassung wieder angehalten. Zusätzlich werden das aktuelle Datum und die aktuelle mitlaufende Uhrzeit angezeigt. Die Uhrzeit wird über einen speziellen Channel aus der Systemuhr des Computers gelesen und in der virtuellen Umgebung angezeigt. Beim Schreiben der Zeitpunkte in die externe Datenbank werden die ausgelesenen Daten in ein datenbanklesbares Format umgewandelt, damit die Datenbank die Dauer als Differenz zwischen Start- und Endzeit berechnen kann. Eine Interaktion des Anwenders mit der virtuellen Uhr erfolgt nur über die beiden Buttons.

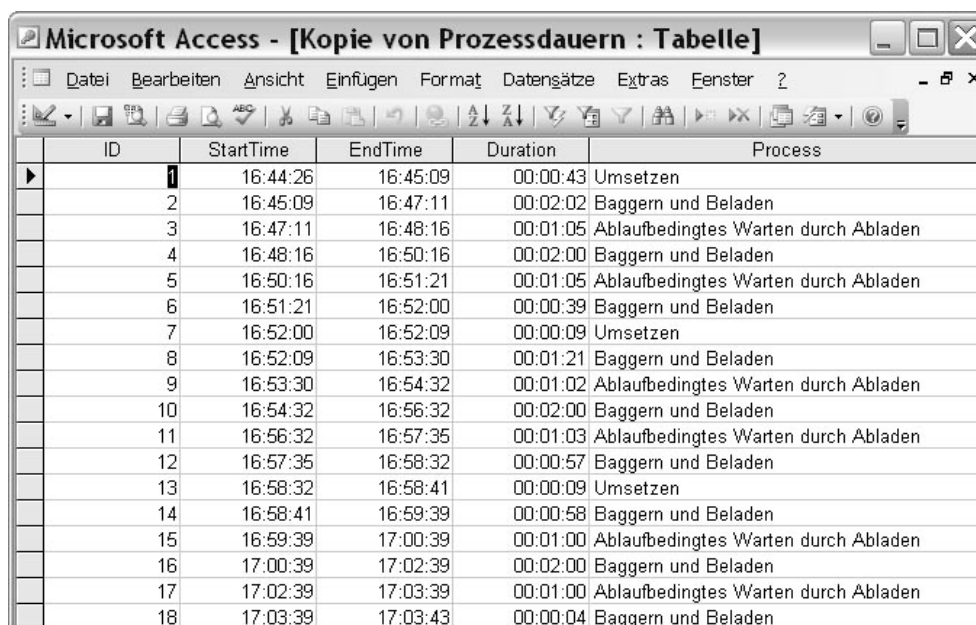
5.2.2 Bestimmung der Prozessdauern

Das Lösungskonzept der interaktiven Modellierung sieht vor, dass Parameter eines Prozesses in eine externe Datenbank geschrieben werden, während dieser Prozess in der virtuellen Umgebung in angenäherter Echtzeit abläuft. Die Zahl dieser Parameter musste für den Prototyp eingeschränkt werden. Die Berechnung der Prozessdauer erfolgt außerhalb der virtuellen Umgebung. Der Parameter Dauer ist deshalb in nachfolgender Tab. 20 nicht aufgeführt, obwohl er in der Datenbank existiert. Die Positionsdaten des Baggers ermöglichen die Rekonstruktion des gesamten Prozesses auch nach dem Durchspielen. Es wurde im Prototyp lediglich die Funktionsweise der Erfassung der Positionsdaten verifiziert. Folgende Positionsdaten und Prozessparameter werden erfasst:

Datenbank	Parameter	Beschreibung
Positionsdaten	<ul style="list-style-type: none"> • ID • Clock • PosX • PosY • PosZ • Process 	<ul style="list-style-type: none"> • Nummer des Datensatzes • Stand der Uhr • Koordinate X • Koordinate Y • Koordinate Z • Aktuelle Zeitart
Prozessparameter	<ul style="list-style-type: none"> • ID • StartTime • EndTime • Process 	<ul style="list-style-type: none"> • Nummer des Datensatzes • Startzeit des Prozesses • Endzeit des Prozesses • Aktuelle Zeitart

Tab. 20: Prozessparameter in der externen Datenbank

Eine nachträgliche Animation der gespielten Prozesse ist nicht implementiert worden. Die Erfassung der Start- und Endzeit von Prozessen war die Leitidee bei der Entwicklung des Prototyps. Es wurde nachgewiesen, dass die Erfassung von Prozessdauern in angenäherter Echtzeit auf der Grundlage des vom Kalkulator gespielten Spiels möglich ist. Als Ergebnis erhält man eine Datenbank mit den Zeitarten und deren Dauern (Abb. 52, Spalten `Process` und `Duration`).



ID	StartTime	EndTime	Duration	Process
1	16:44:26	16:45:09	00:00:43	Umsetzen
2	16:45:09	16:47:11	00:02:02	Baggern und Beladen
3	16:47:11	16:48:16	00:01:05	Ablaufbedingtes Warten durch Abladen
4	16:48:16	16:50:16	00:02:00	Baggern und Beladen
5	16:50:16	16:51:21	00:01:05	Ablaufbedingtes Warten durch Abladen
6	16:51:21	16:52:00	00:00:39	Baggern und Beladen
7	16:52:00	16:52:09	00:00:09	Umsetzen
8	16:52:09	16:53:30	00:01:21	Baggern und Beladen
9	16:53:30	16:54:32	00:01:02	Ablaufbedingtes Warten durch Abladen
10	16:54:32	16:56:32	00:02:00	Baggern und Beladen
11	16:56:32	16:57:35	00:01:03	Ablaufbedingtes Warten durch Abladen
12	16:57:35	16:58:32	00:00:57	Baggern und Beladen
13	16:58:32	16:58:41	00:00:09	Umsetzen
14	16:58:41	16:59:39	00:00:58	Baggern und Beladen
15	16:59:39	17:00:39	00:01:00	Ablaufbedingtes Warten durch Abladen
16	17:00:39	17:02:39	00:02:00	Baggern und Beladen
17	17:02:39	17:03:39	00:01:00	Ablaufbedingtes Warten durch Abladen
18	17:03:39	17:03:43	00:00:04	Baggern und Beladen

Abb. 52: Prozessdauern in der externen Datenbank

Die Zeitarten unter der Spalte `Process` lassen eine Gruppierung der Dauern und damit eine Aussage zur Effizienz des Prozesses zu. Es können beispielsweise die ablaufbedingten Wartezeiten oder die Umsetzzeiten bestimmt werden. Zur Ermittlung der Kosten der einzelnen Zeitarten werden die Dauern mit den entsprechenden Kalkulationsansätzen aus der Baugeräteleiste multipliziert. Da der Prototyp keine reine Vorhaltezeit kennt (der Motor läuft immer), ermitteln sich die Gerätekosten nach Formel 3 (siehe S. 85) ohne Berücksichtigung der Vorhaltezeit.

Neben dem Schreiben von Informationen in die externe Datenbank werden auch Informationen aus externen Datenbanken eingelesen. Dabei handelt es sich um zwei Datenbanken: eine mit Maschinentypen und eine mit Baggerzubehör. Zu Beginn des Spiels muss der Kalkulator entscheiden, welche Maschinen und welchen Baggerlöffel er einsetzen will. Die Maschinen (Baggerleistung, Fassungsvermögen des LKW) und die Parameter des Zubehörs (Löffelinhalt) bestimmen die Dauer des Teilprozesses 'Baggern und Beladen'.

5.3 Entwicklung der Prozesslogik

Der Ansatz folgt der gewonnenen Erkenntnis, dass repetitive logische Zusammenhänge auf Projektebene (ohne Berücksichtigung der besonderen Spezifika der Baustelle) im Vergleich zur Arbeitsvorgangsebene (unter Berücksichtigung der räumlichen Randbedingungen auf der virtuellen Baustelle) nur schwer auszumachen sind. Daher wurden die Logikbausteine auf der Detailstufe der Arbeitsvorgangsebene implementiert, wo der Anteil repetitiver Prozesse hoch ist und logische Zusammenhänge einfacher identifizierbar sind. Da neben der Abbildung der Verhaltenslogik auch Experimente mit autonomen Verhaltensweisen Gegenstand der Untersuchung waren, mag das resultierende Verfahrenssystem nicht in allen Punkten schlüssig sein. Es stellt sich die Frage, warum der LKW automatisch dem Bagger folgt. Der Anwender könnte auch den LKW interaktiv disponieren, um mehr Flexibilität zu erhalten. Diese besonderen Eigenschaften des implementierten Verfahrenssystems sind das Ergebnis von Experimenten. Daher bildet der Prototyp eine spezifische und nur für diese Aufgabe verwendbare Verfahrenslogik ab. Es wird unterschieden in automatisierte und manuell einzuleitende Verhaltenslogiken.

5.3.1 Logikbausteine für den automatisierten Ablauf

Automatisch ablaufende Verhaltenslogiken finden sich im Prototyp vorwiegend beim LKW. Beim Bagger sind ebenfalls einige Teilprozesse automatisiert. Während der LKW in Abhängigkeit vom Bagger voll autonom handelt, erwartet der Bagger einen interaktiven Eingriff des Kalkulators. Man kann sagen, dass auch der LKW indirekt über den Bagger vom Kalkulator gesteuert wird, da einige Zustände des Baggers Verhaltensweisen beim LKW auslösen. Zur Implementierung der Verhaltenslogiken beider Objekte wurde ein besonderer Channel, eine 'Finite State Machine' (FSM) benutzt. In Anlehnung an Petri-Netze können Zustände, Übergänge und Aktionen definiert werden. Die Definition der Finite State Machine für beide Objekte zeigt Abb. 53.

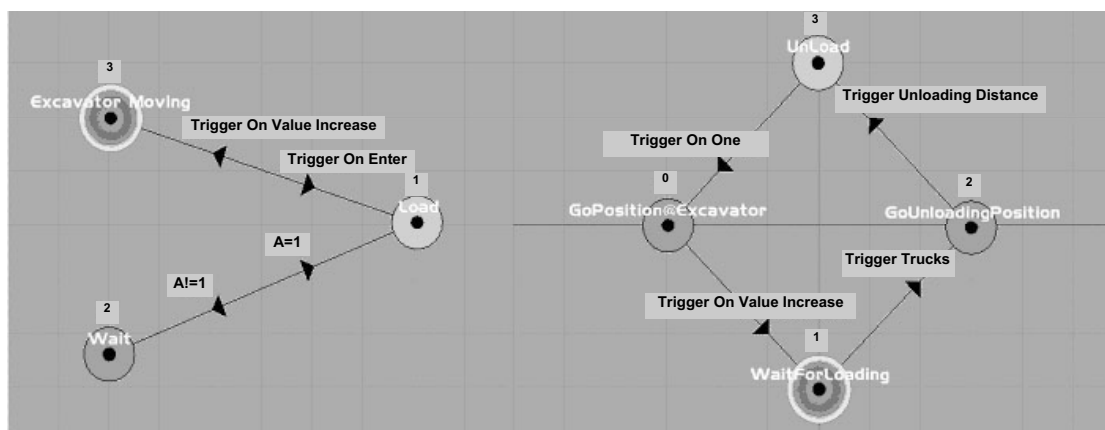


Abb. 53: Logikbausteine für Bagger (links) und LKW (rechts), aus [Mey05], S. 40

Die Definition obiger Netze findet auf der Arbeitsvorgangsebene statt. Der Bagger (links) ist mit drei Zuständen definiert. Diese sind `Wait`, `Load` und `Excavator Moving`. Der Zustand `Wait` liegt vor, wenn der LKW ablädt und nicht zur Beladung zur Verfügung steht. Der Zustand `Load` liegt vor, wenn der LKW zur Beladung zur Verfügung steht und der Bagger den Ladevorgang ausübt. Der Zustand `Excavator Moving` liegt vor, wenn der Bagger versetzt wird. Die drei Zustände entsprechen der Definition der Zeitarten `Ablaufbedingtes Warten durch Abladen`, `Baggern und Beladen` und `Umsetzen`. Bei der Betrachtung des Pfeils von `Excavator Moving` zu `Load` ist er interaktive Eingriff (`Trigger on Enter`) erkennbar. Es bedeutet, dass durch Drücken der Eingabe-Taste (Enter) der Phasenwechsel vollzogen wird. Analog dazu zeigt das Netz des LKW (rechts) das Verhalten des LKW in der virtuellen Umgebung. Die vier Zustände zeigen die abgebildete Logik. Der LKW wartet in relativer Position vom Bagger bis er voll ist, fährt dann zur Entladestelle, lädt ab und kommt zur Position des Baggers zurück. Hinter den einzelnen Kreisen verbergen sich Szenegraphen, deren Struktur an dieser Stelle nicht näher untersucht wird. Zur Vertiefung dieser Graphen wird auf die Diplomarbeit von Meyer verwiesen [Mey05, S. 86ff].

5.3.2 Logik für die Interaktion mit dem Benutzer über die Tastatur

Die Interaktion zwischen Anwender und virtueller Umgebung findet an ausgewählten Stellen im Ablauf der Logik statt. Ein Beispiel ist die anfängliche Entscheidung, wo Bagger und LKW sich einfinden sollen und wo mit dem Baggern begonnen wird. Die Stellen der Interaktion zwischen Anwender und virtueller Umgebung zeigt Abb. 54.

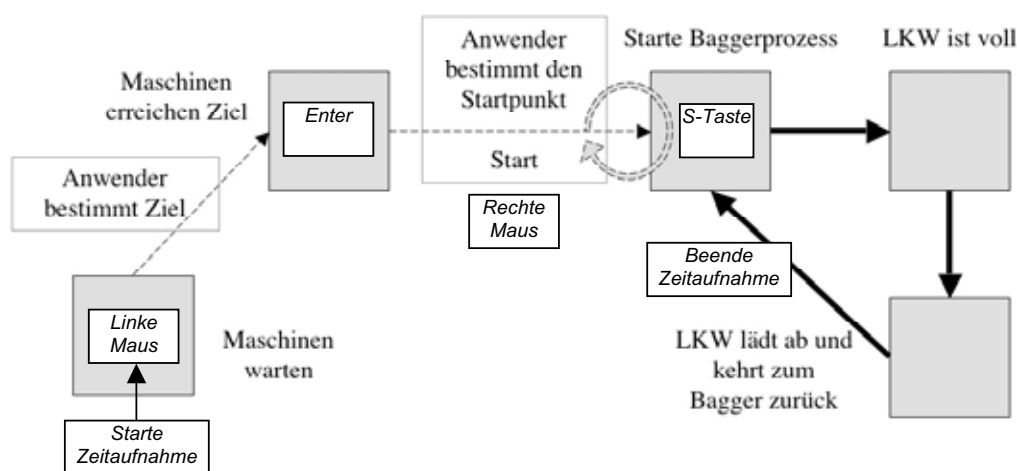


Abb. 54: Stellen der Interaktion im Computerspiel, [Barg05a]

Die Auswahl der interaktiven Stellen im Spiel ist in diesem Prototyp nicht zufällig getroffen. In einem weiter entwickelten Prototyp sollte es möglich sein, in Abhängigkeit der Komplexität der Bauverfahrenslogik jederzeit und mit möglichst vielen Objekten in Interaktion zu treten. Dazu ist jedoch erheblich mehr Implementierungsaufwand notwendig. Dennoch ist der entwickelte Prototyp flexibel. Der Anwender kann aus einem gerade gespielten Prozess aussteigen und den Bagger an eine andere Stelle versetzen. Diese Anforderung ist hinsichtlich der Implementierung von Logik wichtig, um den situativen und spielerischen Charakter der Lösung zu unterstreichen. Der eigentliche Bauablauf als Folge von automatisierten Verfahrenslogiken wird interaktiv und in Abhängigkeit individueller Entscheidungen des Anwenders definiert.

5.4 Ergebnisse aus dem Prototyp

Im Rahmen der vorgegebenen Bauaufgabe im Prototyp wird auf der virtuellen Baustelle untersucht, inwiefern die Verlagerung der Arbeitsstelle Einfluss auf die Prozessdauern hat. Damit kann quantifiziert werden, inwiefern örtliche Einflüsse eine Auswirkung auf Prozesskosten haben. Es werden dazu zwei Spiele gespielt und miteinander verglichen. Die Ausgangssituation lässt sich anhand von Abb. 55 schildern.

Die Ressourcen (Bagger und LKW) befinden sich unmittelbar neben der Entladestelle. Es werden die Prozessdauern für die Arbeitsstellen 1 und 2 getrennt ermittelt und ausgewertet. Anschließend wird dieselbe Leistung (zwei LKW-Ladungen Boden ausheben und abtransportieren) zum einen mit konventionellen Kalkulationsansätzen kalkuliert und zum anderen interaktiv modelliert und verglichen. Aufgrund der statischen Betrachtung bei der konventionellen Methode sind die Kosten bei beiden Arbeitsstellen gleich. Erwartungsgemäß sind bei individuell bestimmten Prozessdauern auch die Kosten unterschiedlich.

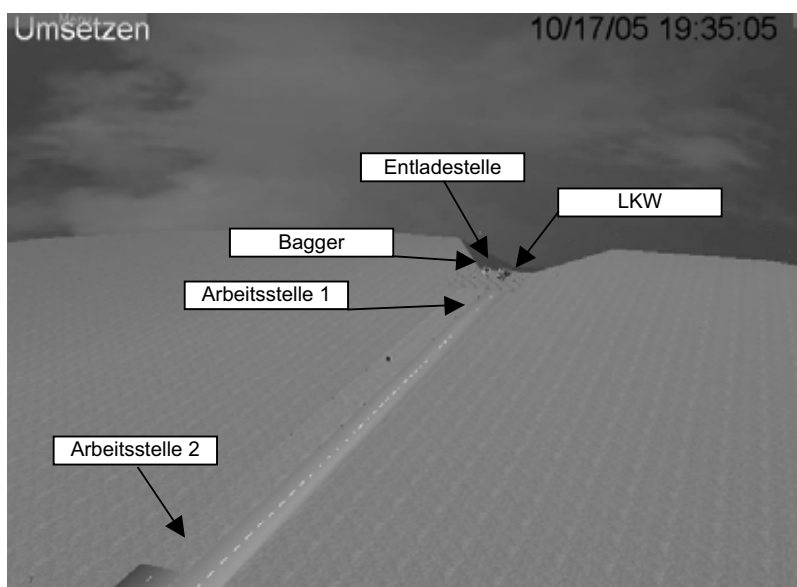


Abb. 55: Vergleich von Prozessdauern bei örtlichen Veränderungen auf der Baustelle

5.4.1 Ermittlung individueller Prozessdauern

Zur Ermittlung der individuellen Prozessdauern wurde das Ausheben und Entladen von zwei LKW-Füllungen durchgespielt. Im Einsatz sind ein LKW mit einem Ladevolumen von 6 m^3 und ein Hydraulik-Kettenbagger mit einem Löffelinhalt von 1 m^3 . Die Ermittlung der Dauern (h:mm:ss) für die Spiele an den beiden Arbeitsstellen sind in Tab. 21 dargestellt.

Die auszuhebende Menge an gelockertem Boden beträgt 12 m^3 . Es wird darauf hingewiesen, dass der Prototyp keine Umrechnungen zwischen verdichtetem und gelockertem Boden durchführt. Ebenso suggeriert die VR-Umgebung, dass es sich um eine grüne Wiese handelt. Die Problematik des Oberbodenabtrags wurde aus Vereinfachungsgründen vernachlässigt. Die Dauer des Teilprozesses 'Baggern und Beladen' bleibt in beiden Fällen (Arbeitsstelle 1 mit 0:10:44 und 2 mit 0:10:58) annähernd gleich. Die Abweichung ist auf unterschiedlich genaues Reagieren des Anwenders beim Einleiten des Aushubvorgangs zurückzuführen.

Prozessphase / Zeitart	Dauer	Umsetzen	Baggern+Beladen	Warten
Computerspiel Arbeitsstelle 1 (AS 1)				
Umsetzen	0:00:17	0:00:17		
Baggern und Beladen	0:05:25		0:05:25	
Ablaufbedingtes Warten durch Abladen	0:00:45			0:00:45
Baggern und Beladen	0:05:19		0:05:19	
Ablaufbedingtes Warten durch Abladen	0:00:45			0:00:45
SUMMEN	0:12:31	0:00:17	0:10:44	0:01:30
Computerspiel Arbeitsstelle 2 (AS 2)				
Umsetzen	0:02:56	0:02:56		
Baggern und Beladen	0:05:27		0:05:27	
Ablaufbedingtes Warten durch Abladen	0:01:36			0:01:36
Baggern und Beladen	0:05:31		0:05:31	
Ablaufbedingtes Warten durch Abladen	0:01:36			0:01:36
SUMMEN	0:17:06	0:02:56	0:10:58	0:03:12
FAKTOR (AS 2 zu AS 1)	1,366	10,35	1,02	2,13

Tab. 21: Vergleich der Prozessdauern aus zwei Spielen an zwei Arbeitsstellen

Beim Vergleich der Dauern für den Teilprozess `Umsetzen` treten aufgrund der unterschiedlichen Anfahrstrecke die stärksten Unterschiede auf. Die Prozessdauer wird bei der Arbeitsstelle 2 mehr als verzehnfacht. Auch bei der Wartezeit des Baggers erfolgt eine erhebliche Abweichung um mehr als den Faktor 2. Die Gesamtdauer verlängert sich insgesamt um den Faktor 1,366. Anhand der beiden Gesamtdauern können die Kosten für den Bagger anhand von Formel 3 (siehe S. 85) ermittelt werden:

$$Kosten(Bagger)_{12m^3(Stelle1)} = (0,21h \times 35,00EUR/h) = 7,35EUR$$

Obige Formel berechnet die Kosten des Baggers für die Arbeitsstelle 1 (0:12:31 = 0,21 h). Die Stundensätze des Baggers (inkl. Fahrer) für die Betriebszeit (35 EUR/h) können geschätzt werden. Als Gesamtkosten des Baggers für den Gesamtprozess bei Arbeitsstelle 1 fallen damit 7,35 EUR an. Bei Arbeitsstelle 2 wird dieselbe Menge an Boden bewegt, der Bagger kostet aber 7,35 EUR * 1,366 = 10,04 EUR. Die Kosten für den LKW können analog bestimmt werden.

Vergleicht man nun die interaktive Modellierung mit der konventionellen Methode mit standardisierten Richtwerten, so fallen Unterschiede auf. Die Herangehensweisen sind unterschiedlich, da sie auf verschiedenen Detail- und Abstraktionsstufen gründen. Die konventionelle Kalkulation bestimmt den Einheitspreis, d.h. den Preis pro 1 m³ Aushub als Summe aus allen relevanten Kostenarten. Im Gegensatz dazu wird bei der interaktiven Modellierung der Preis für den Gesamtprozess beim Aushub der 12 m³ bestimmt. In Anlehnung an Tab. 3 wird in Tab. 22 eine hypothetische Position für 12 m³ Aushub definiert. Es werden nur die Geräte-

kosten des Baggers berücksichtigt, da nur sie verglichen werden. Als Einheitspreis ergibt sich die Summe von 0,595 EUR/m³. Die Kosten für 12 m³ betragen 7,14 EUR.

Position-Nr.	Kurztext	Menge + Einheit (= Einheit aus LV-Position)	Kalkulationsrichtwert (Leistungswert) in Einheit/h geschätzt: 60 m ³ /h = 0,017 h/m ³	Lohn	Stoff	Gerätekosten pro Einheit bei Stundensatz von (35 €/h)	NU	Baggerkosten für 12 m ³
-	Ausheben und Entladen	12 m ³	0,017 h/m ³	- €/m ³	- €/m ³	0,595 €/m ³	- €/m ³	7,14 €
		(d. h. der Einheitspreis wird für 1 m ³ Aushub bestimmt)				0,017 h/m ³ * 35 €/h = 0,595 €/m ³		12 m ³ * 0,595 €/m ³ = 7,14 €

Tab. 22: Kalkulation mit standardisierten Kalkulationsrichtwerten

Die Kalkulation über Einheitspreise definiert einen Preis für die Einheit einer bestimmten Menge einer Leistung ohne Berücksichtigung der örtlichen Randbedingungen. Angewendet auf die beiden Arbeitsstellen 1 und 2 bedeutet dies, dass in beiden Fällen identische Preise ermittelt werden. Dies steht im Gegensatz zu den individuell ermittelten Dauern, wo unterschiedliche Preise für die beiden Arbeitsstellen ermittelt wurden. Die Unterschiede machen sich bemerkbar, wenn man die Summen aus den Arbeitsstellen 1 und 2 bildet. Dies gilt für den Fall, dass die Gesamtleistung darin bestünde, den gesamten Aushub entlang des bestehenden Streifens durchzuführen. Für beide Arbeitsstellen erhält man eine Gesamtmenge von 24 m³. Bei der konventionellen Methode wären die Gesamtkosten dann 0,595 EUR/m³ * 24 m³ = 14,28 EUR und bei der Methode mit individuellen Prozessdauern erhält man 7,35 EUR + 10,04 EUR = 17,39 EUR.

5.4.2 Bewertung des Entwicklungsansatzes

Im Laufe der Recherchen zu dieser Arbeit hat hinsichtlich der Auswahl einer Entwicklungsumgebung ein Umlenken von CAD zu interaktiven VR-Umgebungen (Game Development Engines) stattgefunden. Dieses Umlenken brachte Vor- und Nachteile mit sich, die im Folgenden kurz erläutert werden.

Ein wesentlicher Nachteil der VR-Umgebung liegt in der komplizierten Anbindung von Produktmodell Daten. Im Fall von Quest3D wurde das Modell in 3DStudio gebaut und als VRML-Datei in die virtuelle Umgebung importiert. Zwar verfügen einige CAD-Werkzeuge über die Möglichkeit, VRML-Dateien zu exportieren, doch sind die Daten im CAD-Modell zu detailliert, um sie effizient in VR verwerten zu können. Es besteht Bedarf an integrierten Schnittstellen, um die Daten des 3D-CAD-Modells direkt in die virtuelle Umgebung zu laden. Dies muss so geschehen, dass die Menge und Qualität der Daten für VR optimiert werden.

Ein weiteres Defizit ist erkennbar am Katalog der vordefinierten Programmbausteine. Viele der Bausteine sind nicht bauspezifisch. Sie berücksichtigen Standardfunktionen für übliche Computerspiele, z.B. Schlag- und Fahrbewegungen für Zweikampf- und Actionspiele. Es ist daher notwendig, bauspezifische Bausteine zu entwickeln. Alle für das Bauwesen nicht benötigten Logikbausteine sollten entfernt werden, da die Navigation durch die Verzeichnisse viel Zeit in Anspruch nimmt.

Für die Anforderungen im Rahmen dieser Arbeit waren es lediglich diese beiden Probleme, welche das Arbeiten mit der Entwicklungsumgebung einschränkten. Dem gegenüber stehen zahlreiche Vorteile im Vergleich zu CAD-Umgebungen.

Heutige CAD-Anwendungen bieten die Möglichkeit des Durchschreitens des 3D-Modells. Wenn zahlreiche Polygone gleichzeitig berechnet werden (z.B. Bäume mit Blättern oder Möbel), gelangen diese Anwendungen bezüglich der Echtzeit-Darstellung an ihre Grenzen. Diese Problematik ist in virtuellen Umgebungen nur bei extrem komplexen Objekten vorhanden. Dies liegt zum einen daran, dass überflüssige Polygone vor dem Import beseitigt werden können. Des Weiteren verfügen VR-Umgebungen über LoD-Funktionalitäten (LoD=Level of Detail). Dies erlaubt eine genaue Berechnung nur derjenigen Objekte, die im Blickfeld des Betrachters und in ausreichender Nähe liegen. Entfernte Objekte werden nicht genau berechnet und entlasten die Hardware.

Ein weiterer Vorteil von VR-Umgebungen ist die Darstellung in angenäherter Echtzeit sowie die Flexibilität im Umgang mit Zeit. Die Bewegungen in Echtzeit in Kombination mit interaktiven Funktionalitäten unterscheiden sich deutlich von den Funktionalitäten in heutigen CAD-Systemen. Letztere verfolgen den Zweck, die Konstruktion des Bauwerkes zu vereinfachen. Diese Funktionalität ist für Prozesssimulationen nicht essenziell. VR-Umgebungen bieten den Vorteil, über interaktive Methoden Aktionen im Modell auszulösen. Aus diesem Grund eignen sie sich sehr gut für interaktive Prozesssimulationen im Bauwesen. Die Verlangsamung und Beschleunigung der Zeit spielen dabei eine wichtige Rolle, da sie die Navigation im Modell stark beschleunigen und damit überhaupt erst Interaktion an allen Stellen im virtuellen Modell ermöglichen.

Schließlich besteht ein weiterer Vorteil in der einfachen Entwicklungsmethode ohne Zeilencode. Die grafische Programmiermethode ist intuitiver und erlaubt ein schnelles Verständnis und Einarbeiten in die Entwicklungsumgebung auch für Programmierlaien. Der Zugriff auf vordefinierte Verhaltenslogiken (z.B. Schwerkraft) für wiederkehrende Problemstellungen optimiert den Entwicklungsprozess weiterhin. Auf klassische Methoden wie Petri-Netze wird dabei nicht verzichtet.

6 Anwendung der Forschungsergebnisse

Die in dieser Arbeit vorgeschlagene Methode der interaktiven Modellierung zum Zweck der Soll-Spezifikation eines Bauvorhabens ist geprägt von der Idee der visuellen interaktiven Simulation (VIS). Visuelle Simulation hat dann ihre Berechtigung, wenn komplexe Zusammenhänge in Simulationsmodellen während des Ablaufs der Simulation auf einer niedrigen Abstraktionsstufe anschaulich gemacht werden müssen, damit der Anwender noch während des Ablaufs der Simulation Änderungen am Simulationsmodell vornehmen kann. Dadurch verlieren Simulationen ihren `Blackbox`-Charakter. Im Bauwesen gehören Reihenfolgen im Bauablauf sowie örtlich getrennte, parallel ablaufende Prozesse auf der Baustelle zu diesen komplexen Zusammenhängen. Erhebt man den Anspruch, Reihenfolgeprobleme und parallele Prozesse realitätsnah getreu der Situation auf der Baustelle zu betrachten, dann muss man spontane Entscheidungen des Bauleiters oder des Poliers berücksichtigen, die zu abrupten Unterbrechungen von bereits initiierten Reihenfolgen und zu spontanen Verlagerungen von parallelen Arbeiten an verschiedenen Orten auf der Baustelle führen. Die Anwendung der interaktiven Modellierung für die Definition von Reihenfolgen und die Steuerung paralleler Prozesse wird zunächst vorgestellt. Zusätzlich wird auf die Verwendung der Ergebnisse aus Varianten von Modellierungen unterschiedlicher Anwender eingegangen.

6.1 Definition von Reihenfolgen

Das Grundkonzept der interaktiven Modellierung geht davon aus, dass im Extremfall jedes einzelne Bauteil des Produktmodells vom Anwender unter Angabe einer Ressource und einer Prozesslogik virtuell gebaut wird. Es ist klar, dass diese Vorgehensweise selbst bei Raffung der Zeit zu einer hohen Anzahl an disponierbaren Aufträgen führt. Aus diesem Grund muss für Aufträge mit identischen Bauteilen, Ressourcen und Prozesslogiken die Möglichkeit bestehen, die Reihenfolge der Abarbeitung zu automatisieren. Wie bereits erwähnt, stehen zur Reihenfolgeoptimierung mathematische Lösungsmethoden aus dem Bereich des Operations Research zur Verfügung. Mit deren Hilfe können optimale Reihenfolgen für die Bauteile nach der Spezifikation des Optimierungsziels (z.B. schnellste Lösung, billigste Lösung u.a.) berechnet werden. Es ist damit unter Berücksichtigung der automatischen Zerlegung vorstellbar, dass z.B. eine kleine Baugrube völlig automatisch von einem Bagger ausgehoben wird. In der Regel sind jedoch diese Szenarien auf realen Baustellen eher eine Ausnahme. Steht der Mensch auf der Baustelle vor einem Reihenfolgeproblem, trifft er die Entscheidung nur selten auf der Grundlage einer eindimensionalen Betrachtung (nur schnell oder nur billig), sondern meist unter Berücksichtigung komplexer bauproduktionstechnischer Fragestellungen. Zu diesen gehört z.B. die Frage nach dem Folgeprozess nach Abschluss des Aushubs (Projektebene). Aufgrund dieses situativen Verhaltens auf realen Baustellen muss die interaktive Modellierung davon ausgehen, dass der Anwender selbst entscheiden muss, ob er eine Reihenfolge automatisiert oder manuell bestimmt.

Der Aspekt der Automatisierung von Reihenfolgen wird anhand eines Beispiels diskutiert. Abb. 56 zeigt drei Entscheidungsprobleme bei drei Varianten A, B und C einer Baggeraufgabe. Es soll ein einschichtiger Aushub durchgeführt werden. Ein nummerierter Würfel stellt dabei die abstrahierte statische Arbeitsstelle des Baggers und ein abgeschlossenes Bauteil dar. Der Bagger setzt von Würfel zu Würfel um. Das linke Bild zeigt die Aufgabe mit wenigen Randbedingungen. Es sind nur die Anzahl und Maße der Würfel bekannt. Es ist möglich, die optimale Lösung für den Bagger mathematisch zu bestimmen, wenn der Aufbewahrungsort für das Aushubgut definiert wird und der Bagger selbsttätig abladen muss. Die Reihenfolge-

entscheidung im linken Bild (eine mögliche Lösung) lässt sich über mathematische Methoden, z.B. aus dem Operations Research, gut optimieren. Im mittleren Bild wird die Komplexität gesteigert, indem vier Fundamente in den Aushubbereich gelegt werden.

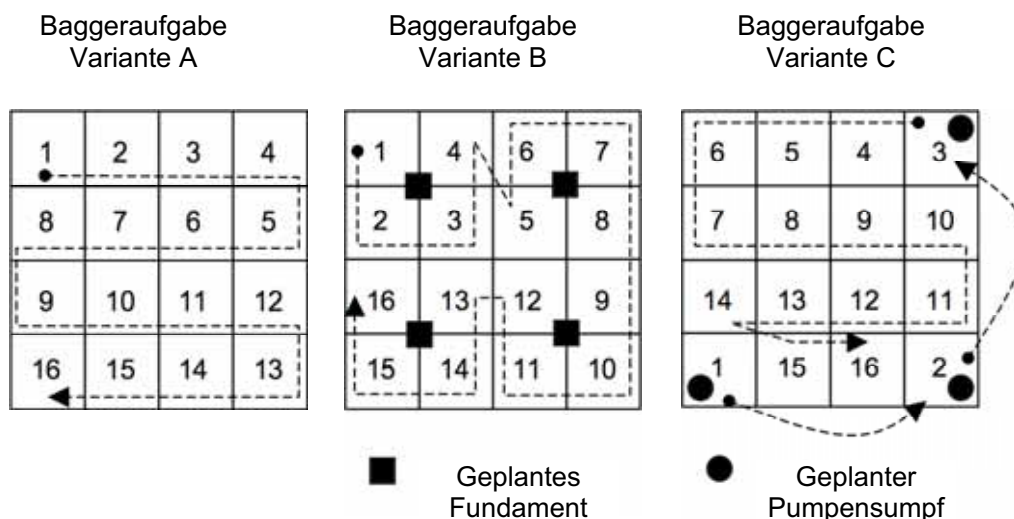


Abb. 56: Beispiel Entscheidungsprobleme auf der Baustelle

Bereits in diesem Bild zeigen sich die Grenzen computergestützter Algorithmen im Rahmen von Entscheidungen zur Folge von Bauprozessen. Prüft man die Reihenfolge aus Variante A auch für B, könnte man mit der Arbeit an Fundament (1,2,3,4) erst beginnen, wenn Fundament (5,6,7,8) schon ausgehoben ist. Die Reihenfolge wäre (1,4,6,7,8,5,3,2). Diese Überlegung geht davon aus, dass die Arbeit an Fundament (1,2,3,4) möglichst früh beginnen soll. Diese nicht formalisierbaren Entscheidungen stellen für den Menschen keine große Schwierigkeit dar, da spontan und situativ entschieden werden kann, ob ein frühes Beginnen an Fundament (1,2,3,4) sinnvoll ist oder nicht. Eventuell muss zuerst mit Fundament (5,6,7,8) oder an anderer Stelle begonnen werden. Eine wirtschaftliche Umsetzung in einem wieder verwendbaren Algorithmus ist aufgrund der Komplexität der Entscheidung in Frage gestellt. Variante C zeigt ebenso, dass menschliche Entscheidungen oftmals die Strenge in computergestützten Algorithmen aufbrechen müssen. Die drei Pumpensümpfe sollen dafür sorgen, dass der Grundwasserspiegel gesenkt wird, bevor mit dem restlichen Aushub begonnen wird. Die im menschlichen Gehirn ablaufenden Überlegungen zum Zusammenhang zwischen Pumpensümpfen und Aushub können nicht verallgemeinert werden. Es besteht kein zwingender logischer Zusammenhang zwischen der Existenz der Pumpensümpfe und der Reihenfolge des Baggervorgangs. Spontane, situative und persönliche Entscheidungen des bauerfahrenen Anwenders können über computergestützte Methoden nicht sinnvoll abgebildet werden. Die Lösung der Varianten B und C in Abb. 56 ist nach dem heutigen Stand der Forschung über computergestützte Algorithmen nicht wirtschaftlich lösbar. Es wäre eine Lösung für den Einzelfall, da die Detailstufe der Ablauflogik nicht hoch genug ist. Dennoch kann bei Kenntnis der genauen Sachlage für jede Variante von einem erfahrenen Prozessmodellierer ein Simulationsmodell entwickelt werden, über welches eine optimale Reihenfolge für die Bauaufgabe ermittelt werden kann. Insbesondere der große Aufwand hierzu wird oftmals als Hindernis für den Einsatz von Simulationen auf Baustellen genannt. Dazu kommt, dass damit nur ein kleiner Ausschnitt der gesamten Baustelle abgebildet werden kann. Die einmal entwickelten Lösungen sind kaum wieder verwendbar.

Die Problematik der Reihenfolgen macht die Entwicklung von alternativen Ansätzen notwendig. Für die Bilder in Abb. 56 ergeben sich vom Anwender interaktiv und individuell festgelegte Reihenfolgen. Damit grenzt sich die interaktive Modellierung bewusst von rein mathematischen Methoden der Reihenfolgeoptimierung ab und ermöglicht menschliches Eingreifen in den Entscheidungsprozess. Manuell festgelegte Reihenfolgen wurden in den Varianten B und C beispielhaft mit Zahlen belegt. Um nicht für jeden einzelnen Würfel einen getrennten Auftrag vergeben zu müssen, kann der Anwender bei der Zusammenstellung der Bauteilgruppe eine Chronologie in der Bearbeitung festlegen. Alle Bauteile dieses Auftrags werden dann in der vorgegebenen Reihenfolge mit derselben Verfahrenslogik bearbeitet.

6.2 Parallele Prozesse an getrennten Orten

Neben der Problematik der Reihenfolge von Bauteilen zeichnen sich Baustellen durch weitere Spezifika aus. Dazu gehören spontane, parallele Prozesse an verschiedenen Orten auf der Baustelle. Oft ist hiermit der Bedarf nach synchronem Zugriff auf eine bestimmte Ressource verbunden. Anhand eines Vergleichs wird die Methode der interaktiven Modellierung in solchen Fällen geschildert.

Lösungsalgorithmen aus dem Operations Research finden optimale Prozessreihenfolgen, die ohne visuelle Rückkopplung von der virtuellen Baustelle auskommen und die von der festen Definition von Randbedingungen ausgehen (Kausalnetz, Abb. 57). Ziel ist es, die Prozessfolge so zu bestimmen, dass die Ressource nicht gleichzeitig bei beiden Vorgängen A und D im Einsatz ist. Es wird hier die vereinfachende Annahme getroffen, dass die Ressource ausschließlich an einen Vorgang geknüpft ist. Dies trifft in der Realität nur selten zu. Wenn dringender Bedarf an einem Wechsel der Ressource zwischen den Vorgängen A und D bestünde, würde diese auch umgesetzt werden.

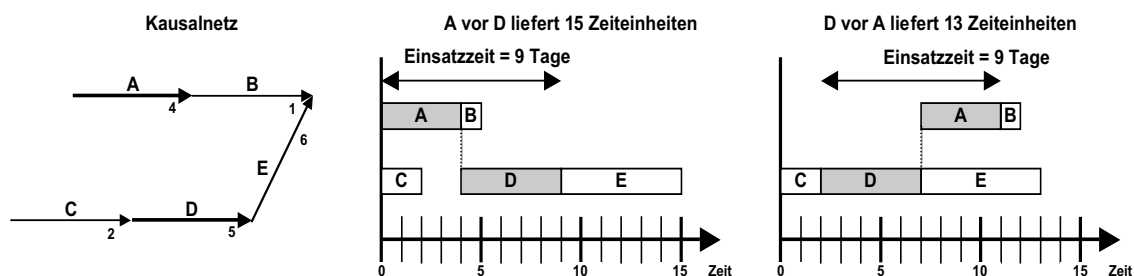


Abb. 57: Optimierung im Operations Research, in Anlehnung an: [Seeling72], S. 1902

Sicher gibt es neben der hier verwendeten Netzplantechnik höher entwickelte Graphen, über die auch ein Wandern der Ressource berücksichtigt werden könnte. Das Problem wäre die Definition des Zeitpunkts. An dieser Stelle bietet die interaktive Modellierung den Vorteil, dass der Anwender aufgrund der visuellen Bewertung der auf der virtuellen Baustelle ablaufenden Prozesse den Wechsel der Ressource selbst initiieren kann (Abb. 58).

Die interaktive Modellierung verfolgt demnach einen anderen Ansatz. Sie geht grundsätzlich vom parallelen Einsatz von Ressourcen aus. Eine Situation wie in Abb. 57 würde gelöst, indem der Anwender entscheidet, wo die Ressource zum Einsatz kommt. Die Prozessfolge in Anlehnung an die Balkenpläne aus Abb. 57 würde anders aussehen. Die beiden Vorgänge A und C laufen parallel. Da Vorgang C kürzer ist, würde es zu einer Wartezeit kommen, da die Ressource in A noch gebunden ist, wenn sie bereits in D benötigt wird.

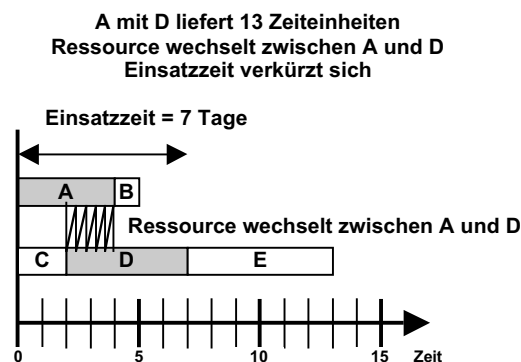


Abb. 58: Parallele Prozesse mit manuell gesteuertem Ressourcenwechsel

An dieser Stelle würde der Anwender entscheiden, ob die Ressource in beiden Vorgängen zum Einsatz kommen kann. Wenn ja, würde der Anwender die Ressource abwechselnd einsetzen. Dadurch würde die Wartezeit der Ressource im Vorgang A genutzt werden, um im Vorgang D eine Leistung auszuführen. Die Kausalität, dass A und D nicht gleichzeitig ablaufen können, wäre verhindert. Die Einsatzzeit der Ressource würde sich um 2 Tage verringern. Das obige Beispiel zeigt, dass die interaktive Modellierung auf virtuellen Baustellen Situationen auf realen Baustellen besser zu berücksichtigen vermag als abstrahierte Prozessmodelle mit kausalen Regeln.

6.3 Varianten der Soll-Spezifikation

Im Rahmen der Soll-Spezifikation wird das vom Anwender interaktiv bestimmte Produktionsmodell auf hoher Detailstufe visualisiert. Dabei ist im Vorfeld klar, dass diese Soll-Vorgaben nicht direkt in der vom Anwender konzipierten Weise auf der realen Baustelle in die Tat umgesetzt werden. Das vordefinierte Produktionsmodell soll aber als Vorgabe für den nachgelagerten Produktionsprozess auf der Baustelle gelten. Für die Erfassung des Ist auf der realen Baustelle spielt der Polier dasselbe Projekt nochmals in Anlehnung an seine Tagesleistungen auf der virtuellen Baustelle durch. Durch diese Vorgehensweise entstehen das Bautagebuch und angenäherte Ist-Daten der realen Baustelle. Es existieren damit zwei Varianten für dasselbe Bauprojekt. Abb. 59 zeigt den Zusammenhang zwischen Soll- und Ist-Produktionsmodell. Das Produktionsmodell der Soll-Spezifikation ist für den Polier eine Vorgabe, an die er sich halten kann oder von der er nach eigenem Ermessen abweichen kann oder muss. Um aus Soll-Spezifikationen und erfolgten Abweichungen zu lernen, müssen sowohl Soll als auch Ist erfasst und miteinander verglichen werden. Eine visuelle Prüfung von Soll und Ist ist notwendig, um zu ermitteln, wo Abweichungen auftraten.

Neben der Bildung von Soll und Ist können auch mehrere Soll-Spezifikationen mehrerer Anwender miteinander verglichen werden. Dies kann beispielsweise im Rahmen der Angebotsfindung geschehen, wenn in einem Bauunternehmen mehrere Anwender 'gegeneinander spielen'. Auch hier ist klar, dass mit unterschiedlichen Ergebnissen gerechnet werden muss. Der große Vorteil liegt darin, dass anschließend visuell geprüft werden kann, wer an welcher Stelle im Bauablauf die optimale verfahrenstechnische Lösung erzielt hat. Ebenso lassen sich Fertigstellungstermine einzelner Bauteile und Bauteilgruppen oder die Auslastung von Ressourcen überprüfen.

Der rechnergestützte Vergleich von interaktiven visuellen Simulationen ist schwierig. Die Gründe für die Schwierigkeit lassen sich wie folgt anführen:

- Es werden zwei unterschiedliche Prozessmodelle mit individuellen Ausprägungen miteinander verglichen.
- Die verwendeten Logikbausteine können bei zwei Anwendern unterschiedlich sein, da beide über unterschiedliches Verfahrenswissen verfügen.
- Die Bauteilfolge und damit der zeitliche Bauablauf werden bei beiden Anwendern unterschiedlich sein.

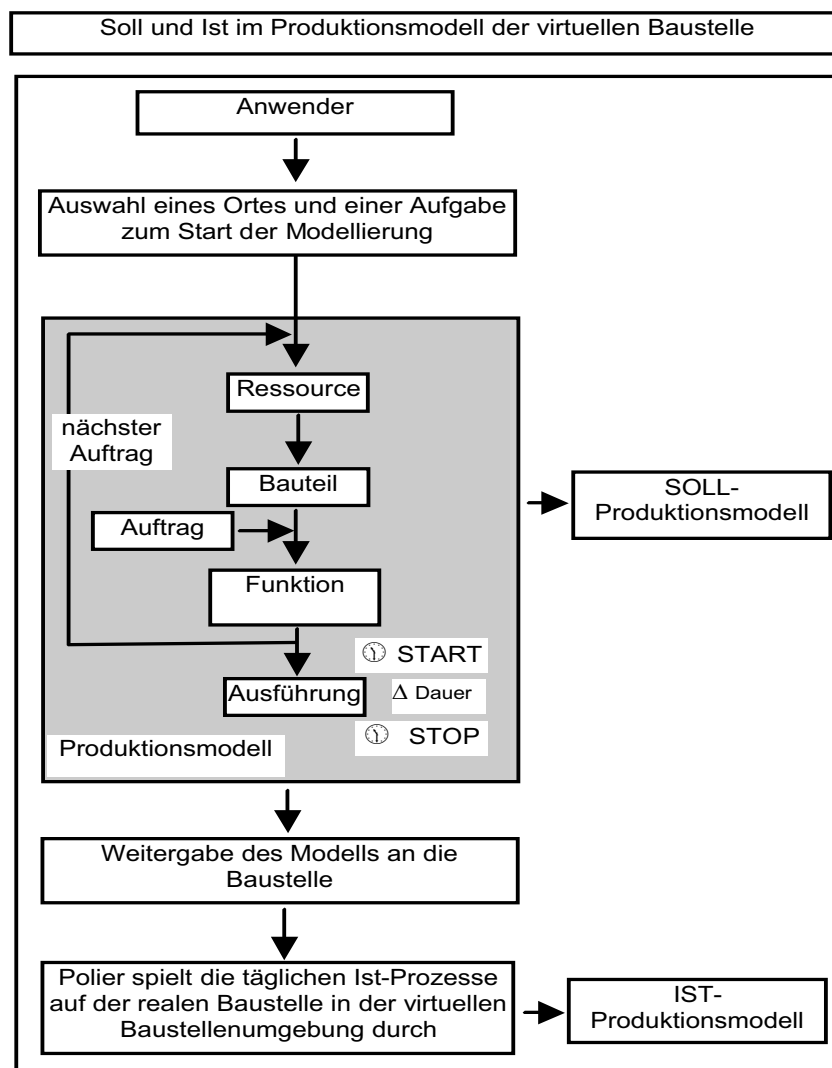


Abb. 59: Soll und Ist im Produktionsmodell der virtuellen Baustelle

Somit lassen sich lediglich die Ergebnisse von mehreren Anwendern vergleichen. Die in dieser Arbeit betrachteten Ergebnisse sind die Kosten und die Bauzeit. Die Vorgabe von terminlichen Meilensteinen ist eine Möglichkeit, den Bauablauf auch qualitativ miteinander zu vergleichen. Das Ziel der Anwender wäre dann, eine Soll-Spezifikation unter Einhaltung dieser Meilensteine zu definieren.

7 Schlussbetrachtung

Der Anlass zur Erstellung dieser Arbeit geht auf Erfahrungen des Verfassers in der Bauleitung zurück. Dabei wurden Prozesse und Rollenverteilungen auf Baustellen untersucht und als Grundlage für die wissenschaftliche Arbeit herangezogen. Die Methode der interaktiven Modellierung zielt auf die Verbesserung des Prozesses zur Soll-Spezifikation. Das Prozesswissen ist Grundlage von Soll-Spezifikationen. Es kann nur dann trainiert werden, wenn die Produktionsprozesse neu durchdacht werden. Dies geschieht, indem der Anwender sein Prozesswissen dazu benutzt, Produktionsprozesse auf einer virtuellen Baustelle situativ durchzuspielen. Diese Methode führt dazu, dass die Qualität der eigenen technischen Lösung besser hinterfragt wird. Abschließend wird eine Zielbetrachtung vorgenommen und Raum für weitere Forschungsarbeit aufgezeigt.

7.1 Zielbetrachtung

Zu Beginn der Arbeit wurde das Problem dahingehend definiert, dass eine Methode zur Fügung von Bauteilen, Ressourcen und Prozessen in interaktiven virtuellen Umgebungen entwickelt werden soll. Zweck dieses Vorgangs ist die Spezifikation des Bau-Solls. Die räumliche Betrachtung von Baustellenprozessen verlangte nach neuen Modellierungswerkzeugen zur Abbildung der Bauproduktion auf hoher Detailstufe. Die zu Beginn definierten drei Ziele werden im Folgenden den erreichten Ergebnissen gegenübergestellt.

1. Analyse des Stands der Forschung für Bauteile, Ressourcen und Prozesse

Die Analyse zum Stand der Forschung dient der Einordnung und Abgrenzung der Arbeit zu bestehenden und laufenden Forschungsarbeiten auf nationaler und internationaler Ebene. Die Arbeit erfüllt dieses Ziel durch die Referenzierung nationaler und internationaler Quellen. Methoden zur Soll-Spezifikation wurden insbesondere im Kontext der Bauprozessforschung und Simulationsansätze analysiert. Die Erkenntnis aus der Analyse resultierte in einem Lösungsvorschlag, der Interaktion zwischen Anwender und 3D-Modell verlangt. Aus diesem Grund wurde eine Erweiterung bestehender Ansätze um einen interaktiven visuellen Ansatz vorgenommen.

2. Entwicklung einer Methode zur interaktiven Disposition von Bauteilen, Ressourcen und Prozessen in einer virtuellen Baustellenumgebung

Zur Lösung des identifizierten Problems wurde ein theoretisches Konzept beschrieben, welches sich Strategien aus dem Computerspielbereich entlehnt. Methoden der Interaktion zwischen Spieler und virtueller Umgebung wurden auf virtuelle Baustellen und Bauproduktionsprozesse übertragen. Insofern kann behauptet werden, dass die entwickelte Methode zur Fügung von Bauteilen, Ressourcen und Prozessen vorsieht, dass die Produktion des Bauwerks `durchgespielt` wird. Der grundlegende Algorithmus zur Vergabe von Aufträgen an Ressourcen unter Angabe eines Bauteils und einer Prozesslogik stellt den Kern der entwickelten Methode dar. Für das entstehende Problem der Dauer des `Spielprozesses` wurden Lösungsstrategien aufgezeigt. Die entwickelte Lösung stellt eine Alternative zu deterministischen und stochastischen Modellen dar und integriert die menschliche Fähigkeit zum Treffen von komplexen Entscheidungen. Das Ziel der Entwicklung einer theoretischen Methode zur interaktiven Disposition von Bauteilen, Ressourcen und Prozessen auf virtuellen Baustellen wurde erreicht.

3. Entwicklung eines Software-Prototyps als interaktives Computerspiel für einen ausgewählten Arbeitsprozess zum Zweck der Verifikation der vorgeschlagenen Lösung

Im Prototyp konnten wesentliche Prinzipien des theoretischen Ansatzes realisiert werden. Dazu gehören die interaktive Disposition von Ressourcen (Anwender spielt den `Bagger`) und die Erfassung von Parametern und deren Lesen und Speichern in Datenbanken. Die bidirektionale Anbindung der Datenbank an die virtuelle Umgebung wurde erfolgreich umgesetzt. Damit wurde eine Grundlage für das Monitoring auf virtuellen Baustellen gelegt. Es wurde auch nachgewiesen, dass über das Durchspielen von virtuellen Baustellen die Prozessdauern von Einzelprozessen ermittelt werden können. Seine Aufgabe ist, zu antizipieren, was auf der virtuellen Baustelle aufgrund seiner aktuellen Kenntnislage zu tun ist, um das Bauwerk zu erstellen. Damit werden verstärkt Rechengvorgänge auf den Computer und Entscheidungen auf den Menschen übertragen. Insgesamt verlief die Entwicklung des Prototyps zur Verifikation der vorgeschlagenen Methode erfolgreich. Das Computerspiel liegt als Programmdatei vor und benötigt zur Ausführung lediglich das Aufsetzen der ODBC-Schnittstelle für die Datenbankanbindung. Es ist auf aktuellen Rechnern mit einer Standardausstattung lauffähig.

Aufgrund der Komplexität der Anforderungen konnten nicht alle in der Theorie beschriebenen Funktionalitäten implementiert werden. Die Möglichkeit der Zuordnung von Kosten zu Bauteilen wurde nur theoretisch beschrieben und im Prototyp nicht umgesetzt. Da der Prototyp eine Bauaufgabe aus dem Tiefbau behandelt und das Bauteil `Boden` nicht unterteilt wurde, konnte diese Methode im Prototyp nicht verifiziert werden. Der Zugriff auf die Bauteile des 3D-Produktmodells wurde nicht umgesetzt. Die Implementierung der Prozesslogiken erwies sich als der komplizierteste Teil der Arbeit. Die abgebildeten Logiken behandeln nur ausgewählte Teilprozesse und lassen einen flexiblen Einsatz der Logiken im Prototyp nicht zu. Erwartungsgemäß wurden nur einige Logiken erfolgreich abgebildet. Dies liegt jedoch vorwiegend daran, dass nur das grundlegende Prinzip verifiziert werden sollte und kein vielfältig anwendbarer Prototyp implementiert werden sollte. Die grundsätzliche Eignung von Computerspiel-Entwicklungsumgebungen zur Implementierung von interaktiven visuellen Simulationen im Bauwesen konnte damit festgestellt werden. Es sind jedoch weitere Forschungen notwendig, um die Eignung auch für komplexere Szenarien nachzuweisen.

7.2 Weiterführende Forschung

In dieser Arbeit wird ein kleiner Teil des virtuellen Lebenszyklus eines Bauwerkes betrachtet. Die Tatsache, dass dies auf der Basis des virtuellen 3D-Modells geschieht, ist auf Entwicklungen im Bereich der Digitalen Fabriken zurückzuführen. Diese bilden die Grundlage für Betrachtungen zum virtuellen Lebenszyklus von baulichen Anlagen. Die virtuelle Baustelle der Zukunft wird eine digitale virtuelle Fabrik sein, deren Design sich von Bauprojekt zu Bauprojekt ändert.

Daher stellen Forschungsarbeiten um diese Thematik eine erste Grundlage für Konzepte zu virtuellen Baustellen und für weiterführende Forschung dar. Ansätze für virtuelle Baustellen sollten das Ziel haben, den Status quo in der stationären Industrie zu analysieren und darauf aufbauend neue Ideen für das Bauwesen zu entwickeln [Barg04d]. In der stationären Industrie finden sich zahlreiche Ansätze zu Digitalen Fabriken. Japan gehört aufgrund seiner hoch entwickelten Roboterindustrie zu den Innovationstreibern in diesem Bereich. Dort forscht man an der Simulation von verteilten virtuellen Fabriken unter betriebswirtschaftlichen Ge-

sichtspunkten [Sashio04] und an der Integration virtueller Fabriken im Planungsstadium mit realen Fabriken im Implementierungsstadium [Hibino04]. Letztere Entwicklung wurde gestartet, um eine Brücke zwischen den unterschiedlichen Sprachen in Robotik und Simulation zu schaffen. Aktuelle Systeme zur Entwicklung virtueller Fabriken gehen von integrierten Umgebungen aus. Eigenmann und Aßmann [Eig04] stellen ein System vor, welches alle Produkt-, Prozess- und Ressourcendaten in einer zentralen Datenbank, dem PPR-Hub, verwaltet. Der Vorteil dabei ist, dass Planungsänderungen direkt an das Simulationsmodell weitergegeben werden (Planungsbegleitende Simulation).

Ein zweiter Punkt liegt in der Erforschung von Kollaborationsmodellen zur Nutzung integrierter 3D-Umgebungen über den virtuellen Lebenszyklus eines Bauwerks. Olofsson [Olof05] verweist auf ein Projekt in Schweden, bei welchem bereits im Vertrag (Partnering-Modell) gemeinschaftlich vereinbart wurde, dass innovative Kooperationsmethoden (Concurrent Engineering) zur Anwendung kommen sollen. Dies ist ein Indiz für den Trend, Innovationen von Seiten des Bauherrn vertraglich zu fordern. In Deutschland besteht kein rechtliches Rahmenwerk, auf dessen Basis virtuelle 3D-Modelle als Dokumentengrundlage bei Partnering-Modellen im Bauwesen Akzeptanz finden. Auch hier müssen Vertragsmodelle aus anderen Branchen (Schiffsbau, Flugzeugbau) auf Tauglichkeit im Bauwesen untersucht werden. Vorstellbar ist eine Erweiterung der VOB um ein Konzept, welches sowohl bei der Ausschreibung (VOB/A) als auch während der Ausführung (VOB/B) von einem virtuellen 3D-Modell als Informationsgrundlage ausgeht.

Ein dritter wichtiger Punkt besteht in der Erforschung des Einsatzes von mathematischen Methoden des Operations Research auf virtuellen Baustellen. Der Aspekt der Optimierung des von einem Anwender situativ und spontan erstellten Produktionsmodells wurde in dieser Arbeit nur optional betrachtet. Aus der stationären Industrie wurden bereits Lösungsalgorithmen aus dem Operations Research auf das Bauwesen angewendet. Diese Ansätze gehen meist den Weg, Bauprozesse in ihrer Komplexität so stark zu vereinfachen, bis sie in ein mathematisches Konzept eingebunden werden können. Dieser Ansatz nimmt nicht ausreichend Rücksicht auf die in dieser Arbeit aufgeführten Spezifika von Bauprozessen. Für einen erfolgreichen Ansatz von mathematischen Methoden muss der Raum der Baustelle ebenso in das mathematische Modell integriert werden wie spontane Änderungen in der kurzfristigen Produktionsplanung auf der Baustelle. Die Erforschung der Baustelle als Raum hat mit der 4D-Modellierung begonnen und ist auch heute aktuell. Es ist neben dem interaktiven Ansatz in dieser Arbeit weiter zu erforschen, wie Spontaneität in der Produktionsplanung in die Simulation der Bauproduktion eingebaut werden kann. Es ist weiterhin davon auszugehen, dass sich größere Bauprojekte nicht komplett in einem vordefinierten Prozessmodell abbilden lassen und spontane und interaktive Eingriffe des Menschen notwendig bleiben. Die Kombination von interaktiven und deterministischen Simulationsansätzen sollte daher weiter erforscht werden.

Hinsichtlich der interaktiven Modellierung besteht weiterer Forschungsbedarf zum Umgang mit der Zeitproblematik. Die Modellierung in Echtzeit scheidet aus und die beiden vorgestellten Lösungsstrategien lassen noch Raum für weitere Ansätze. Es ist zu klären, wie zur Verringerung der Darstellungszeit wichtige von unwichtigen Prozessen getrennt werden können.

Ein weiteres Forschungsfeld tut sich auf, wenn Logiken von Bauprozessen abgebildet werden. In Anlehnung an das Business Process Re-engineering (BPR) aus dem Bereich der

Wirtschaftsinformatik sollten auch für das Bauwesen Referenzlogiken entwickelt werden. Im Unterschied zu anderen Industriezweigen muss berücksichtigt werden, dass dies im Bauwesen nur auf hoher Detailstufe sinnvoll ist, da nur dort repetitive Prozessabläufe identifizierbar sind. Ein erster Schritt zur Referenzierung von Geschäftsprozessen im Bauwesen wurde im Rahmen des BMBF-Forschungsprojektes ArKoS (Architektur Kollaborativer Szenarien)³⁹ getan. Auch für Bauproduktionsprozesse müssen wiederkehrende Algorithmen isoliert und zur Wiederverwendung abgelegt werden. Dazu ist eine genaue Erforschung von Baustellenprozessen vor Ort notwendig.

Bei der Behandlung von Personal wurden in dieser Arbeit einige Vereinfachungen vorgenommen. Die Mitglieder einer Kolonne durchlaufen nach Vergabe eines Auftrags alle dieselbe Prozesslogik. Die Prozesslogik bestimmt demnach hauptsächlich die Dauer des Prozesses. Es ist zu erforschen, wie die Mitglieder der Kolonne in Arbeitssysteme einzugliedern sind, die den einzelnen Avataren Einzelaufträge mit eigenen Prozesslogiken zuordnen können. Dazu muss die Position des Vorarbeiters einer Kolonne so abgebildet werden, dass Aufträge innerhalb einer Kolonne durch ihn ohne weitere Interaktion des Anwenders vergeben werden können.

Der entwickelte Computerspiel-Prototyp zeigt erste Lösungsansätze für die interaktive Modellierung von Bauprozessen. Das wesentliche Defizit besteht in der eingeschränkten Anwendbarkeit des Prototyps. Dieser kann nur für die vorgegebene Baustelle und für die dort vordefinierten Logikbausteine benutzt werden. Eine Übertragung auf andere Problemstellungen ist nicht möglich. Zur Entwicklung eines flexiblen Spiels für verschiedene Baustellen und Bauverfahren sind Weiterentwicklungen notwendig. Es besteht weiterer Forschungsbedarf in folgenden Punkten:

- Methode der Beschreibung der Leistung am 3D-Modell (Ausschreibung)
- Verbesserung der Interaktion zwischen Anwender und VR
- Navigation des Anwenders im Produktmodell
- Abgrenzung und Entwicklung von komplexeren autonomen Logiken
- Berücksichtigung von komplexeren Bauprozessen
- Reduktion der Dauer der Modellierung für den Anwender
- Entwicklung einer Schnittstelle zum Import von Bauteilen aus dem Produktmodell in die virtuelle Umgebung der Baustelle

Eine für virtuelle Baustellen sehr interessante Entwicklung stellt schließlich die Möglichkeit zum kollaborativen Aufbau von virtuellen Umgebungen über die Browser-Schnittstelle im Internet dar⁴⁰. In Analogie zu verteilten Online-Spielen ist es möglich, zusammen an einer virtuellen Baustelle zu planen und zu bauen. In diesem Zusammenhang sei auf die Nutzung von virtuellen Baustellen für Trainingszwecke verwiesen. Schumann [Schuma04] beschreibt eine am Fraunhofer IFF entwickelte virtuelle Entwicklungs- und Trainingsplattform (VDT-Plattform) und stellt die Verbindung zu verteilten Computersimulationen und -spielen her. Diese Plattformen können zukünftig auch im Bauwesen Anwendung finden.

³⁹ Siehe <http://www.arkos.info> (08.02.06)

⁴⁰ Siehe <http://www.activeworlds.com> (20.10.05)

7.3 Zusammenfassung und Ausblick

Das Arbeiten mit 3D-Modellen hat sich im Bauwesen noch nicht auf breiter Basis durchgesetzt. Insbesondere Bauunternehmen scheuen den Aufwand und die Komplexität im Umgang mit 3D-Technologien. Nichtsdestotrotz entwickelt die Forschung intensiv modellbasierte Lösungen. Im Architekturbereich haben diese Lösungen – verglichen mit Lösungen aus dem Automobil- und Anlagenbau – einen beachtlichen Stand erreicht. Die ausführenden Bauunternehmen hinken diesen Entwicklungen noch hinterher, auch wenn bereits von klassischen CAD-Anbietern integrierte Lösungen, z.B. für das 4D-Modeling, angeboten werden. Zusammenfassend kann man feststellen, dass diese Lösungen für produzierende Bauunternehmen noch nicht ausreichend entwickelt sind.

Während andere Branchen große Summen in die Erfassung und Optimierung ihrer Prozesse investieren, sehen sich Bauunternehmen oftmals mit uneinheitlichen Prozessen konfrontiert. Dies macht eine Bewertung von Soll-Spezifikationen auf der Basis von Erfahrungen sehr schwierig. Ein typisches Szenario auf Baustellen ist die spontane Einleitung von Prozessen aufgrund eines spontanen Bedarfs. Da es unmöglich scheint, alle Abhängigkeiten in einem vordefinierten Modell – selbst mit Varianten – abzubilden, wurde in dieser Arbeit der Ansatz der interaktiven visuellen Simulation untersucht. Die Tätigkeit des Anwenders am Bildschirm soll die Aufgabe eines Baustellenmanagers (Bauleiter oder Polier) simulieren. Dadurch ist der Anwender während der Spezifikation des Bau-Solls der typischen Baustellensituation ausgesetzt. Es wird eine wesentlich realitätsnähere Bewertung des Produktionsaufwands möglich.

Die Reduktion des Abstraktionsgrades bei Simulationen stellt eine Ergänzung zu bisherigen Ansätzen in der Simulation von Bauprozessen dar. Der Einsatz von VR zum Zweck der interaktiven Simulation von Bauprozessen ist bisher nur wenig erforscht. 4D-Modelle bieten erste Ansätze auf der Detailstufe der Produktionsprozesse. Das Vordringen auf die Detailstufe der Arbeitsvorgänge erschließt neue Problemfelder. Dazu gehören der Umgang mit räumlichen Gegebenheiten und deren Veränderung im Zuge des Bauablaufs. Abstrahierte Modelle auf hoher Detailstufe behandeln nur einen kleinen Ausschnitt aus dem Prozessmodell. Die Modellierung von dynamischen Abhängigkeiten – insbesondere räumlicher Natur – vermögen derartige Modelle kaum zu bewerkstelligen. Zur Bildung sinnvoller Reihenfolgen sind hier interaktive Ansätze notwendig. Auch die Betrachtung paralleler Prozesse ist mit visuellen Methoden in VR besser zu bewerkstelligen als mit abstrahierten Modellen.

Der Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten zeigt eine intensive Beschäftigung mit modellbasierten Ansätzen über den gesamten Lebenszyklus von baulichen Anlagen. Betrachtet man letzte Fortschritte in der baubetrieblichen Forschung, dann geht die Entwicklung in Richtung einer digitalen, virtuellen Baustelle in Analogie zur Digitalen Fabrik. Dabei dürfen die wesentlichen Unterschiede zwischen stationärer Industrie und Baustelle nicht ignoriert werden. Es bedarf neuer Lösungen für die virtuelle Bauproduktion, die speziell auf die kurzen Planungsfristen von Bauproduktionsprozessen einzugehen vermögen. Daher scheint der spielerische Umgang mit der Simulation der Bauproduktion ein berechtigter Ansatz neben bestehenden anderen Konzepten zu sein.

In Zukunft sind Konsolidierungen hinsichtlich der Vielfalt bestehender und nicht kompatibler Methoden zu erwarten. Dabei steht die Konzentration auf einige wenige Standards für Produktmodelle (z.B. STEP und IFC) im Mittelpunkt. Die Standards müssen in der Lage sein,

den Lebenszyklus eines Bauwerks durchgehend abzubilden und die Informationen konsistent zu halten. Es ist zu erwarten, dass klassische CAE-Anbieter neben bisher erfolgten Systemintegrationen auch weitere Funktionalitäten wie VR integrieren. Dabei wird die VR-Engine direkt in die CAE-Applikation eingebaut und nicht – wie bisher – als externe Applikation mit proprietärem Datenformat angeboten. Vorreiter solcher Lösungen werden heute im Automobil- und Anlagenbau bereits eingesetzt. Die Baubranche ist heute angehalten, Lösungen aus anderen Industriezweigen zu erforschen, um daraus angepasste Lösungen für den eigenen Bedarf zu entwickeln.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Argumentation im Vorfeld der Entscheidung zur Forschung.....	4
Abb. 2: Ausgangssituation bei der interaktiven Modellierung	5
Abb. 3: Arten der Kalkulation, in Anlehnung an: [Drees02, S. 20].....	9
Abb. 4: Austauschphasen nach dem GAEB-Standard, aus [GAEB2000, S. 51].....	12
Abb. 5: Zeitgliederung beim Menschen, [REFA84, S. 122]	15
Abb. 6: Schalten eines Bedingungs-Ereignis-Netzes, aus [Böh04], S. 6/7	18
Abb. 7: Zahl der Vergabenaachprüfungsverfahren von 1999-2003, [Baublatt05]	23
Abb. 8: Struktur eines Bauteilkataloges analog zu PLM/PDM-Systemen, aus [Barg03].....	25
Abb. 9: Verknüpfung von 'Jobs' mit LV-Positionen, [Geh92, S. 105].....	26
Abb. 10: 4D Analysis of Cost and Productivity, [Fisch98, S. 6]	30
Abb. 11: Allokation und Bewertung von Zeit-Raum-Konflikten, [Mall04, S. 268].....	30
Abb. 12: Die drei Raumdefinitionen um ein virtuelles Bauteil, [Mall04, S. 269].....	31
Abb. 13: Gliederung menschbezogener Zeitarten, in Anl. an [VDI3633, Blatt 6, Punkt 5.1]...	37
Abb. 14: Personal in der Simulation, nach [VDI3633, Blatt 6, S. 2]; aus [Zülch04, S. 4]	39
Abb. 15: Gliederung betriebsmittelbezogener Zeitarten, nach [VDI3633, Blatt 6, Punkt 5.1] .	41
Abb. 16: Erweiterung der Experimentiermöglichkeiten, in Anlehnung an [Böh04, S. 2].....	42
Abb. 17: Klassifikation der Simulationsmodelle, aus: [Böh04, S. 5]	43
Abb. 18: Erdbauprozess in CYCLONE, aus [Gar79, S. 73].....	49
Abb. 19: Konzept der Simulationssoftware SIMPHONY, [Haj99, S. 999].....	50
Abb. 20: Agenten interagieren über Sensoren und Effektoren, [Maher03, S. 49]	53
Abb. 21: Das Modell eines Agenten, [Maher03, S. 50].....	53
Abb. 22: Elemente einer funktionsbasierten Simulationsumgebung, [Moh05, S. 280].....	55
Abb. 23: Verbindung von Prozess- und Produktmodell, [Vad02, Abb. 2]	57
Abb. 24: Prototyp einer VR-basierten Simulationsumgebung für Baustellen, [Retik99].....	58
Abb. 25: Architektur der CAD-basierten Simulationsumgebung, [Chah04, S. 337]	59
Abb. 26: Unklare Abgrenzung von Bauteilen, nach [Rösel04, S. 55]	63
Abb. 27: Anbindung des Produktdatenmodells an die virtuelle Umgebung.....	64
Abb. 28: Ressourcen, Bauteile und Prozesslogik, in Anlehnung an [Barg04a, S. 8]	65
Abb. 29: Ermittlung der Prozessdauern und -typen durch den Anwender.....	67
Abb. 30: Konventionelle und situative Bestimmung von Prozessdauern	69
Abb. 31: 3D-Modell einer Fundamentplatte als 'Spielwiese' des Anwenders.....	70
Abb. 32: Referenz-Orte mit variablen Entfernungen.....	70
Abb. 33: Interaktive Eingriffe und Zeitsprünge in der Prozessfolge.....	72
Abb. 34: Abtrennung von baubetrieblichen Produktionssystemen	74
Abb. 35: Architektur des Lösungsansatzes zur Methode der interaktiven Modellierung.....	76
Abb. 36: Zerlegung eines Bauteils der Ausführungsplanung in Einzelelemente	78
Abb. 37: Gruppierung von Einzelelementen zu einer Einheit	78
Abb. 38: Automatische Zerlegung über Parameter.....	79
Abb. 39: Temporäres Bauteil 'Auffahrt' für einen Bagger	80
Abb. 40: Berechnung der Lohnkosten.....	83
Abb. 41: Zusammenhang zwischen Detailstufe und Automatisierbarkeit von Prozessen	86
Abb. 42: 'Virtual Workbench' im Maschinenbau, (Quelle: Tecnomatix).....	88
Abb. 43: 'Virtuelle Baustelle' als Pendant zur 'Virtual Workbench', aus [Barg05].....	88
Abb. 44: Raffung der Darstellungszeit durch Verringerung der Frameanzahl.....	94
Abb. 45: Raffung der Darstellungszeit durch Verringerung der Framedauer	95

Abb. 46: Orte, Bauteil, Ressourcen und Wege in der virtuellen Umgebung.....	96
Abb. 47: Folge der Bewegungen zur Erstellung der Mauerwerkswand.....	97
Abb. 48: Interaktive Eingriffe des Anwenders bei der Modellierung der Wand	100
Abb. 49: Ablauf der Programm-Logik in Quest3D.....	101
Abb. 50: Objekte auf der virtuellen Baustelle des Prototyps.....	103
Abb. 51: Oberfläche des Computerspiels nach dem Start.....	105
Abb. 52: Prozessdauern in der externen Datenbank.....	106
Abb. 53: Logikbausteine für Bagger (links) und LKW (rechts), aus [Mey05], S. 40	107
Abb. 54: Stellen der Interaktion im Computerspiel, [Barg05a].....	108
Abb. 55: Vergleich von Prozessdauern bei örtlichen Veränderungen auf der Baustelle.....	109
Abb. 56: Beispiel Entscheidungsprobleme auf der Baustelle	114
Abb. 57: Optimierung im Operations Research, in Anlehnung an: [Seeling72], S. 1902	115
Abb. 58: Parallele Prozesse mit manuell gesteuertem Ressourcenwechsel.....	116
Abb. 59: Soll und Ist im Produktionsmodell der virtuellen Baustelle.....	117

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Einordnung der interaktiven Modellierung in die aktuelle Forschung.....	7
Tab. 2: Gliederung der Kalkulation über die Endsumme (aus: [Drees02, S. 42])	10
Tab. 3: Kalkulation der Einzelkosten mit den 4 Kostenarten Lohn, Stoff, Gerät und NU	11
Tab. 4: Detailstufen der Prozesse bei der Spezifikation des Bau-Solls.....	15
Tab. 5: Vergleich innerbetrieblicher Richtwerte mit Standardwerten [Schneid90, S. 10].....	20
Tab. 6: Unklare Zuordnung von Kosten in Leistungsverzeichnissen, [Drees02, S. 46]	24
Tab. 7: Aufbau eines Vorgabewertes für eine Großflächenschalung, [Fleisch04, S. 43].....	38
Tab. 8: Vorgehensweise beim Erteilen eines Auftrags zur Erstellung von Bewehrung.....	71
Tab. 9: Anforderungen an die interaktive Modellierung der Bauproduktion	75
Tab. 10: Überblick über die Parameter eines Avatars	82
Tab. 11: Überblick über die Parameter einer Maschine in VR.....	84
Tab. 12: Autonome Bestimmung der Zeitarten von Geräten durch Regeln	84
Tab. 13: 'Atomare' Bewegungen für Ressourcen auf virtuellen Baustellen.....	87
Tab. 14: Referenzlogik für 'Mauerwerk aus kleinformatischen Steinen mit Mörtel'	89
Tab. 15: Repetitive und variable Dauern von Einzelschritten einer Verhaltenslogik	91
Tab. 16: Ermittlung der Tätigkeitszeit der ersten Arbeitsschleife im Auftrag	98
Tab. 17: Aufträge und Verfahrenslogiken für eine Mauerwerkswand mit Türöffnung	99
Tab. 18: Orte auf der virtuellen Baustelle des Prototyps	103
Tab. 19: Interaktionsmöglichkeiten zwischen Kalkulator und virtueller Umgebung.....	104
Tab. 20: Prozessparameter in der externen Datenbank.....	106
Tab. 21: Vergleich der Prozessdauern aus zwei Spielen an zwei Arbeitsstellen	110
Tab. 22: Kalkulation mit standardisierten Kalkulationsrichtwerten	111

Literaturverzeichnis

- Abo93 AbouRizk, S.M.: Subjective and interactive duration estimation. Canadian journal of civil engineering. 20, 3/1993, S. 457-470, 0315-1468.
- Abo98 AbouRizk, S.M., Hajjar, D.: A framework for applying simulation in construction. Canadian journal of civil engineering. 25, 3/1998, S. 604-617, 0315-1468.
- Abo99 AbouRizk, S.M., Ruwanpura, J.Y., Er, K.C., Fernando, S.: Special Purpose Simulation Template for Utility Tunnel Construction. Hrsg.: Farrington, P.A., Nembhard, H.B., Sturrock, D.T., Evans, G.W.: Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference. 1999, S. 948-955.
- Abo00 AbouRizk, S.M., Mather, K.: Simplifying Simulation Modeling Through Integration With 3D CAD. Journal of Construction Engineering and Management. 126, 6/2000, S. 475-483, 0733-9634.
- Akinci02 Akinci, B., Fischer, M., Kunz, J.: Automated generation of work spaces required by construction activities. Journal of Construction Engineering and Management. 128, 4/2002, S. 306-315, 0733-9634.
- Akinci97 Akinci, B., Staub, S., Fischer, M.: Productivity and Cost Analysis Based on a 4D Model. CIB Proceedings IT Support for Construction Process Re-engineering, Publication 208. Cairns, Australia, James Cook University of North Queensland, Division of Construction Management, Townsville, Queensland 4811, Australia, 1997, S. 23-32.
- Alf88 Alfeld, L.E.: Construction Productivity - On-Site Measurement and Management. New York, Mc Graw Hill, 1988, 234 S.
- Allw96 Allweyer, T., Babin-Ebell, T., Leinenbach, S., Scheer, A.-W.: Model-Based Re-Engineering in the European Construction Industry. Hrsg.: Turk, Z.: Proceedings of CIB Workshop 'Construction on the Information Highway'. Ljubljana, Slowenien, 1996, S. 21-31.
- Aouad97 Aouad, G., Child, T., Marir, F., Brandon, P.: Developing a Virtual Reality Interface for an Integrated Project Database Environment. Proceedings of the IEEE International Conference on Information Visualization. London, UK.
- ARH05 Hrsg.: Institut für Zeitwirtschaft und Betriebsberatung Bau (izb): Arbeitszeit Richtwerte (ARH). ARH-Tabellen Hochbau/Tiefbau/Holzbau/Trockenbau. Zeittechnik Verlag, <http://www.zeittechnik-verlag.de/ztv/ztv.htm> (29.08.05).
- ARHHoch99 Arbeitszeit-Richtwerte Tabellen für den Hochbau. 1999, Neu-Isenburg, ztv-Verlag.
- Au69 Au, T., Bostleman, R., Parti, E.: Construction management game-deterministic model. ASCE Journal of the Construction Division. 1969, 95 (CO1), S. 25-38.
- Barg02 Bargstädt, H.-J., Blickling, A.: Nutzung eines Datenbanknetzwerkes mit Internetzugang auf der Baustelle des Theaterneubaus in Erfurt. Tagungsband zur VDI-Tagung "Bauen mit Computern". Bonn, 2002.

- Barg03 Bargstädt, H.-J., Blickling, A.: Eine neue Methode für die bauteilorientierte Ausschreibung und Kalkulation unter Beachtung des Integrated Product Lifecycle Management (PLM/PDM) von Bauwerken. Proceedings des 16. Internationalen Kolloquiums über Anwendungen der Informatik und der Mathematik in Architektur und Bauwesen (IKM 2003), 10.-12. Juni `03. (Volltext in deutscher Sprache auf Tagungs-CD-Rom oder online). Bauhaus-Universität Weimar. http://e-pub.uni-weimar.de/portal/IKM2003/fulltext_link.php?id=8, (04.04.06)
- Barg04 Bargstädt, H.-J., Blickling, A.: Unit-oriented tendering and calculation of buildings using data generated by the method of Integrated Product Lifecycle Management (PLM/PDM) of buildings. Proceedings of the IABSE-Symposium 'Metropolitan Habitats and Infrastructure', Shanghai, 22-24th September 2004. IABSE Reports Vol. 88. (full text on CD-ROM proceedings only), Shanghai, 2004, S. 108-109, 3-85748-110-2.
- Barg04a Bargstädt, H.-J., Blickling, A.: Effective cost estimate and construction processes with 3D interactive technologies: Towards a virtual world of construction sites. Proceedings of the Xth International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (digital proceedings only). ICCCBE, Weimar, June 2-4, 2004. Weimar, Bauhaus University, 2004. http://e-pub.uni-weimar.de/volltexte/2004/240/pdf/icccbex_051.pdf (04.04.06).
- Barg04b Bargstädt, H.-J., Blickling, A., Kath, T.: Optimierung der Planung von Baustelleneinrichtungen mit 3D-Technologien. Hoch- und Tiefbau. 1-2/2004, S. 24-27.
- Barg04c Bargstädt, H.-J., Blickling, A.: Use of 3D gaming technologies for simulation of process costs in virtual environments of construction sites. Hrsg.: Salles Dias, J.M., Leitao, A.R., Jorge, J.: Proceedings of 4th Conference of Construction Applications of Virtual Reality. CONVR 2004, 14-15 September. ADETTI/ISCTE, Lisbon, Portugal, 2004, S. 71-77, 972-8862-00-8.
- Barg04d Bargstädt, H.-J., Blickling, A.: Bauteilorientiertes Bauen auf der Basis von virtuellen nD-Welten - Chancen für die Logistik. CD-Rom Proceedings der Fachtagung Baulogistik 2004 (Baulog 2004). Dortmund, 2004.
- Barg05 Bargstädt, H.-J., Blickling, A.: Determination of process durations on virtual construction sites. Proceedings of the Winter Simulation Conference WSC, December 4-7, 2005. Orlando (FL, USA), 2005, 0-7803-9520-4.
- Barg05a Bargstädt, H.-J., Blickling, A.: Implementation of logic for earthmoving processes with a game development engine. Hrsg.: Scherer, R.J., Katranuschkov, P., Schapke, S.-E.: Proceedings of Conference on Information Technology in Construction. 22nd CIB-W78, 19-21 July, 2005. Dresden, 2005 S. 425-430, ISBN 3-86005-478.
- Barg05b Bargstädt, H.-J., Blickling, A.: A game prototype to determinate construction process parameters by partly automated simulation. Hrsg.: Dawodd, N.: Proceedings of 5th Conference of Construction Applications of Virtual Reality. CONVR 2005 (CD-Rom only). 12-13 September Durham (UK), CCIR, University of Teeside (UK), 2005.

- Baublatt05 N.N.: Eine alternde Gesellschaft auf Wohnungssuche. Deutsches Baublatt. 32. Jahrgang, *Juli/August 2005*, S. 1-2, 0939-8791.
- Bauch94 Bauch, U.: Beitrag zur Risikobewertung von Bauprozessen. Zugl. Dissertation. Fakultät Bau-, Wasser- und Forstwesen, Technische Universität Dresden, 1994, 125 S.
- BaySt04 Körner, B.: Bundesrechnungshof-Gutachten: Vergabe an Billigstbieter oft unwirtschaftlich. Bayerischer Staatsanzeiger (Beilage Ausschreibung und Vergabe 2/2004). *7/2004 vom 13.02.04*, Titelseite der Beilage.
- BDG02 'Beer Distribution Game'. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. http://www.beergame.lim.ethz.ch/Bullwhip_Effect_Article.pdf (12.10.2000).
- Beiss04 Beissert, U.: Simulation eines Bauprozesses in einer VR-Umgebung. Studienarbeit an der Professur Baubetrieb und Bauverfahren. Bauhaus-Universität Weimar, 2004, 61 S.
- Bell95 Bell, P.C., O'Keefe, R.M.: An Experimental Investigation into the Efficacy of Visual Interactive Simulation. *Management Science*. 41, *6/1995*, S. 1018-1038.
- BGL2001 Hauptverband der Deutschen Bauindustrie (Hrsg.): Baugeräteliste 2001 - Technisch-wirtschaftliche Baumaschinendaten. 1. Auflage Berlin, Bauverlag, ca. 850 S.
- Bier03 Bierlaire, M., Antonini, G., Weber, M.: Behavioral dynamics for pedestrians. Hrsg.: Axhausen, K.: *Moving through nets: the physical and social dimensions of travel*. International Conference on Travel Behavior Research. 10.-15. August 2003, Luzern, Elsevier, 2003.
- Binn01 Binner, H.F., Appold, W.: Vorstellung der Ergebnisse der Entwicklung eines Referenz-Prozessmodells für den REFA-Fachausschuss Fahrzeugbau. *REFA-Nachrichten*. *6/2001*, S. 27-31.
- Bleck84 Blecken, U.: Optimierung der Baustelleneinrichtung. *Baumaschine und Bau-technik (BMT)*. 31, *3/1984*, S. 111-114.
- Blick03 Blickling, A.: Die Verwendung von virtuellen 3D-Modellen bei der SiGeKo-Planung auf Baustellen. Hrsg.: Bargstädt, H.-J.: *Schriften der Professur Baubetrieb und Bauverfahren*. Nr. 5 (2003). Beiträge zur 3. Fachtagung "Sicherheit auf Baustellen" am 11.03.2003 Bauhaus-Universität Weimar, 2003 S. 73-78.
- Boers93 Boers, H., Fonken, A., Schmidt-Weinmar, G.: *Lernspiel: Ablaufsimulation als Entscheidungshilfe in der Fertigungssteuerung*. Hrsg.: Biethahn, J.: *Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe*. Göttingen, 1993.
- Böh04 Böhnlein, C.-B.: *Simulation in der Betriebswirtschaft*. Hrsg.: Mertins, K., Rabe, M.: *Experiences from the Future*. Tagungsband 11. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Berlin, 04.-05. Oktober 2004. Stuttgart, Fraunhofer IRB-Verlag, 2004, S. 1-23, 3-8167-6640-4.

- Bol98 Bolivar, A., Halpin, D.: Simplified simulation system for construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*. 1998, *Jan./Feb.*, S. 72-81, 0733-9634.
- Bos92 Bossel, H.: Modellbildung und Simulation - Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme. Braunschweig, Vieweg, 1992.
- Bra02 Bracht, U.: Ansätze und Methoden der Digitalen Fabrik. Eröffnungsvortrag im Tagungsband "Simulation und Visualisierung 2002". Universität Magdeburg, 2002.
- Brum02 Brumme, C.: Bauteilorientiertes Planen und Bauen. Zugl. Diplomarbeit Nr. B/2002/1. Fakultät Bauingenieurwesen, Bauhaus-Universität Weimar, 2002, 95 S.
- BVBS95 BVBS-Richtlinie - Datenaustausch von Bewehrungsdaten - Version 1.0. September 1995, Bundesvereinigung Bausoftwarehäuser e.V.
- BVMB05 Floerecke, M.: Zuschlag für Wagnis und Gewinn - ein alter Hut. *Hoch&Tiefbau*, 58. Jahrgang, 8-9/2005, S. 22, 0342-5169.
- Castro04 Castro, S., Dawood, N.: RoadSim: an integrated simulation system for road construction management. Hrsg.: Dikbas, A., Scherer, R.: eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction. Proceedings of the 5th European Conference on Product and Process Modelling in the Building and Construction Industry - ECPPM 8-10 September 2004, Istanbul, Turkey. London, UK, Taylor & Francis Group plc, 2004, S. 237-243, 04 1535 938 4.
- Chah04 Chahrouh, R., Franz, V.: Computersimulation im Baubetrieb - Forschungsstand, innovative Einsatzmöglichkeiten. Hrsg.: Mertins, K., Rabe, M.: Experiences from the Future. Tagungsband 11. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Berlin, 04.-05. Oktober 2004. Stuttgart, Fraunhofer IRB-Verlag, 2004, S. 329-339, 3-8167-6640-4.
- Chang87 Chang, D.Y., Carr, R.I.: A resource oriented simulation system for multiple resource constrained processes. Proceedings of the PMI Seminar/Symposium. 1987, S. 4-19.
- Chern91 Cherneff, J., Logcher, R., Sriram, D.: Integrating CAD with construction schedule information. *Journal of computing in civil engineering*. 5, 1/1991, S. 64-83, 0887-3801.
- Clev89 Cleveland, A.B.Jr.: Real-Time Animation of Construction Activities. Proceedings of Construction Congress I - Excellence in the Construction Project. San Francisco, Calif., American Society of Civil Engineers ASCE, 1989, S. 238-243.
- Cohrs04 Cohrs, H.H.: Bagger mit Köpfchen. *bd baumaschinendienst*. 3/2004, S. 18-26.
- Conlin97 Conlin, J., Retik, A.: The applicability of project management software and advanced IT techniques in construction delays mitigation. *International Journal of Project Management*. Vol. 15, 2/1997, S. 107-120.

- Dell'Isola97 Dell'Isola, A.: Value engineering: Practical applications for design, construction, maintenance and operations. Kingston, Mass., RS Means Company, 1997.
- Dhar95 Dharwadkar, P.V., Gatton, T.M.: An object-oriented building model for CAD/schedule integration. Proceedings of the 2nd Congress on Computing in Civil Engineering, Atlanta, Georgia (USA). New York, American Society of Civil Engineers, 1995, S. 1248-1251.
- Drees02 Drees, G., Paul, W.: Kalkulation von Baupreisen. Hochbau, Tiefbau Schlüsselwertiges Bauen mit kompletten Berechnungsbeispielen. 7., erw. und aktual. Aufl. Berlin, Bauwerk Verlag, 2002, 351 S., 3-89932-007-7.
- Eig04 Eigenmann, U., Aßmann, J.: Simulation im Rahmen der Digitalen Fabrik - Nutzen einer integrierten Softwarelösung. Hrsg.: Mertins, K., Rabe, M.: Experiences from the Future. Tagungsband 11. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Berlin, 4.-5. Oktober 2004. Stuttgart, Fraunhofer IRB-Verlag, 2004, S. 511-514, 3-8167-6640-4.
- Fayek99 Fayek, A., Ghoshal, I., AbouRizk, S.M.: A survey of the bidding practices of Canadian civil engineering construction contractors. Canadian Journal of civil engineering. 1999, 1, S. 13-25, 0315-1468.
- Firm02 Firmenich, B.: CAD im Bauplanungsprozess: Verteilte Bearbeitung einer strukturierten Menge von Objektversionen. Zugl. Dissertation Bauhaus-Universität Weimar, 2001. Aachen, Shaker Verlag, 2002.
- Fisch02 Fischer, H., Moosecker, C., Biethahn, J.: Modulare Planspiele: Die Konzeption eines Gestaltungsansatzes. Hrsg.: Biethahn, J.: Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe. Göttingen, 2002, S. 19-38.
- Fisch98 Fischer, M., Staub, S.: Constructability reasoning based on a 4D facility model. Hrsg.: Structural Engineering Worldwide: CD-Rom Proceedings. Elsevier Science Ltd., 1998.
- Flade78 Flade, G.: Verbessern Sie den Bauablauf - Zeitrafferfilm deckt Schwächen auf. Baupraxis. 12/1978, S. 8-11.
- Fleisch02 Fleischmann, H.D.: Baubetrieb. Hrsg.: Schneider: Bautabellen für Ingenieure. 15. Aufl. Neuwied, Werner Verlag, 2002.
- Fleisch04 Fleischmann, H.D., Hemmerich, R.: Angebotskalkulation mit Richtwerten. 4. überarb. und aktual. Aufl. Düsseldorf, Werner Verlag, 2004, 167 S.
- Franz89 Franz, V.: Planung und Steuerung komplexer Bauprozesse durch Simulation mit modifizierten höheren Petri-Netzen. Dissertation Gesamthochschule Kassel. Kassel, 1989.
- Franz97 Franz, V.: Steuerung und Kontrolle des Ablaufes der Ausführungsplanung durch Petri-Netze. Projekt Management. 1997, 1, S. 16-27.
- Franz98 Franz, V., Schopbach, H.: Optimierung von Montageabläufen im Zuge der Baustelleneinrichtungsplanung. BW-Bauwirtschaft. 1998, 1.

-
- Franz98a Franz, V., Enkelmann, M.: Simulation optimiert Pflastersteinproduktion. BFT Betonwerk und Fertigteil-Technik, Bauverlag, Walluf. 1998, 9, S. 62-78.
- Gab95 Gabisch, G.: OECOSIPRO - Ein volkswirtschaftliches Planspiel. Hrsg.: Biethahn, J.: Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe. Göttingen, 1995, S. 47-62.
- GAEB2000 DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): Regelungen für Informationen im Bauvertrag. Version 1.0. Ausgabe November 1999 Berlin, Beuth Verlag, 240 S.
- Gaert05 Gärtner, M.: Entwicklung eines Algorithmus für die Produktionssimulation von Mauerwerk innerhalb einer VR-Umgebung. Studienarbeit an der Professur Baubetrieb und Bauverfahren. Bauhaus-Universität Weimar, 2005, 44 S.
- Gar79 Gareis, R., Halpin, D.W.: Planung und Kontrolle von Bauproduktionsprozessen (Originalausgabe: Halpin, D.W., Woodhead, R.W.: Design of Construction and Process Operation, John Wiley & Sons. Inc., 1976). aus dem Englischen übersetzt und für den deutschen Markt neu bearbeitet von R. Gareis und D.W. Halpin. Berlin, Heidelberg, New York, Springer, 1979, 197 S., 3-540-09316-8.
- Geh92 Gehri, Markus: Computerunterstützte Baustellenführung. Zugl. Diss ETH Nr. 9583 Zürich, vdf Verlag der Fachvereine an den schweizerischen Hochschulen und Techniken AG, 1992.
- Gehb72 Gehbauer, F.: Anwendung mathematischer Modelle auf Probleme der Erdbauplanung, dargestellt am Beispiel einer Dammbaustelle. Baumaschine und Bautechnik. 19, 6/1972, S. 229-233.
- Gehb72a Gehbauer, F.: Methoden zur Ermittlung von Zeitverlusten und zur Steigerung der Effektivität auf Baustellen. Baumaschine und Bautechnik. 19, 10/1972, S. 401-410.
- Gehb74 Gehbauer, F.: Stochastische Einflussgrößen für Transportsimulationen im Erdbau. IMB Reihe F, Heft 10. Karlsruhe, 1974.
- Geo04 Georgijevic, M., Radanovic, R.: Simulation als modernes Optimierungswerkzeug. Hrsg.: Biethahn, J.: Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe. Göttingen, 2000, S. 307-321.
- Girm01 Girmscheid, G., Borner, R.: Einsatz und Potenziale von Wissensmanagement in Unternehmen der Bauwirtschaft. Bauingenieur. Band 76, 2001.
- Gra02 Graf, H., Putzlocher, S.: Daimler Chrysler: Integrierte Beschaffungsnetzwerke. Hrsg.: Corsten, D., Gabriel, C.: Supply Chain Management erfolgreich umsetzen - Grundlagen, Realisierung und Fallstudien. Berlin, Springer, 2002.
- HAB90 Gold, S.C., Pray, T.F.: Die Modellierung der Produktion in computerisierten Geschäftssimulationen. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar. 36. Jahrgang, 4/1990 (Reihe B), S. 173-175, 0863-0720.

-
- Haide05 Haide, J.: Arbeitswissenschaftlich ermittelte Zeitaufwandswerte für den Baubetrieb. *Baumarkt+Bauwirtschaft. Heft 4/2005*, S. 32-35.
- Haj96 Hajjar, D., AbouRizk, S.M.: Building a Special Purpose Simulation Tool for Earth Moving Operations. *Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference*. S. 1313-1320.
- Haj99 Hajjar, D., AbouRizk, S.M.: SIMPHONY: An environment for building special purpose construction simulation tools. *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*. S. 998-1006.
- Halp77 Halpin, D.: CYCLONE - method for modeling job site processes. *Journal of the construction division*. 1977, *September*, S. 489-499.
- Halp93 Halpin, D.W.: Subjective and interactive duration estimation: Discussion. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 20, *4/1993*, S. 719-721, 0315-1468.
- Halp99 Halpin, D.W., Martinez, L.-H.: Real World Applications of Construction Process Simulation. Hrsg.: Farrington, P.A., Nembhard, H.B., Sturrock, D.T., Evans, G.W.: *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*. 1999, S. 956-962.
- Henr03 Henrichsén, J.: Communicating Project Concepts and Creating Decision Support from CAAD. Hrsg.: Atkin, B., Borgbrant, J., Josephson, P.-E.: *Construction Process Improvement*. Oxford, Blackwell Science, 2003, S. 255-265.
- Hibino04 Hibino, H., Inukai, T., Fukuda, Y.: A Study on Efficient Digital Engineering - Combination between Real Factory and Virtual Factory. Hrsg.: Mertins, K., Rabe, M.: *Experiences from the Future. Tagungsband 11. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik*, Berlin, 4.-5. Oktober 2004. Stuttgart, Fraunhofer IRB-Verlag, 2004, S. 461-469, 3-8167-6640-4.
- Hohm03 Hohmann, R. (Hrsg.): *Simulationstechnik. Tagungsband 17. Symposium in Magdeburg. Reihe Frontiers in Simulation*, FS 13 Ghent, 2003.
- IITB05 Jahresbericht 2004 des Fraunhofer-Instituts für Informations- und Datenverarbeitung IITB. Karlsruhe, 2005, 80 S.
- Issa99 Issa, R.: *Virtual Reality in Construction - state of the art report. TG24 Final report*. UK, 1999.
- Issa99a Issa, R.: *Virtual Reality: A solution to seamless technology integration in the AEC industry?.* *Proceedings of the Berkley-Stanford CE&M Workshop: Defining a Research Agenda for AEC Process/Product Development in 2000 and Beyond*. 1999, Stanford University, USA.
- Kamat00 Kamat, V., Martinez, J.C.: 3D Visualization of Simulated Construction Operations. Hrsg.: Joines, J.A., Barton, R.R., Kang, K., Fishwick, P.A.: *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*. 2000, S. 1933-1937.
- Kamat02 Kamat, V., Martinez, J.C.: Scene Graph and Frame Update Algorithms for Smooth and Scalable 3D Visualization of Simulated Construction Operations. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. *17/2002*, S. 228-245.

- Kamat03 Kamat, V.R., Martinez, J.C.: Variable-Speed Resource Motion in Animations of Discrete-Event Process Models. Hrsg.: Chick, S., Sánchez, P.J., Ferrin, D., Morrice, D.J.: Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference. 2003, S. 1518-1526.
- Kamat04 Kamat, V.R., Martinez, J.C.: Practical 3D Animation of Multiply Articulated Construction Equipment. Hrsg.: Ingalls, R.G., Rossetti, M.D., Smith, J.S., Peters, B.A.: Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference. 2004, S. 1229-1237.
- Kantel97 Kantelberg, A.: Prognose von Bauabläufen auf der Basis stochastischer Petri-Netze am Beispiel des Bauvorhabens Potsdamer Platz Berlin. Entwurf komplexer Systeme, 5. Fachtagung EKA 97 / 22.-23.05.1997. Band II. Braunschweig, 1997, 675 S.
- Kapell05 Kapellmann, K.D., Langen, W.: Einführung in die VOB/B - Basiswissen für die Praxis. 14. Aufl. München, Werner Verlag, 2005, 284 S., 3-8041-5165-5.
- Keil01 Keil, W., Martinsen, U., Vahland, R., Fricke, J.: Einführung in die Kostenrechnung für Bauingenieure. 9. neu bearb. Aufl. Düsseldorf, Werner Verlag, 2001, 181 S., 3-8041-4937-5.
- KLR01 Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V. und Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e.V. (Hrsg.): Kosten- und Leistungsrechnung der Bauunternehmen: KLR Bau. 7. aktual. Aufl. Wiesbaden, Bauverlag, Berlin, 2001, 123 S., 3-7625-3578-7.
- König04 König, M.: Ein Prozeßmodell für die kooperative Gebäudeplanung. Zugl. Diss. Univ. Hannover 2003. Aachen, Shaker Verlag, 2004, 204 S., 3-8322-2970-1.
- Kub82 Kubica, J., Beißwenger, K.: Spieltheorie zur optimalen Produktionssteuerung in Bauunternehmen. Zeitschrift für Operations Research. Band 26, 1982, S. B25-B34, 0340-9422.
- Kunze02 Kunze, G., Renndorf, T.: Simulationsmodelle als virtuelle Prototypen. Online-Ausgabe 1(2002). Wissensportal <http://www.baumaschine.de> (08.02.06).
- Law00 Law, A., Kelton, W.: Simulation Modeling und Analysis. Boston, McGraw-Hill, 2000.
- Lein00 Leinenbach, S.: Interaktive Geschäftsprozessmodellierung: Dokumentation von Prozesswissen in einer virtual-reality-gestützten Unternehmensvisualisierung. 1. Auflage Wiesbaden, Dt. Univ.-Verl., 2000, 208 S., 3-8244-9042-0.
- Lein96 Leinenbach, S., Scheer, A.-W.: Geschäftsprozeßvisualisierung: Neue Wege mit Virtual Reality?. Information Management. 11, 4/1996, S. 73-76.
- Lein99 Leinenbach, S., Seel, C., Scheer, A.-W.: Interaktive Geschäftsprozessmodellierung - Prozesswissen in virtuellen Welten spielerisch beschreiben. Information Management & Consulting. 14, 3/1999, S. 53-58.
- Li03 Li, H., Ma, Z., Shen, Q., Kong, S.: Virtual experiment of innovative construction operations. Automation in Construction. 12, 5/2003, S. 561-575.

- Lor03 Lorenz, C.: Untersuchungen zur bauteilorientierten Kalkulation auf der Grundlage von 3-D-CAD-Modellen unter Verwendung von Standardleistungsbeschreibungen. Zugl. Diplomarbeit Nr. B/2003/50. Fakultät Bauingenieurwesen, Bauhaus-Universität Weimar, 99 S.
- Maher03 Maher, M.L., Liew, P.-S., Gu, N., Ding, L.: An Agent Approach to Supporting Collaborative Design in 3D Virtual Worlds. Hrsg.: Dokonal, W., Hirschberg, U.: eCAADe21 Digital Design. Proceedings of eCAADe 2003. Graz University of Technology, Austria, 2003, S. 47-52.
- Mall04 Mallasi, Z., Dawood, N.: Space competition on construction sites: assignment and quantification utilising 4D space planning tools. Hrsg.: Dikbas, A., Scherer, R.: eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction. Proceedings of the 5th European Conference on Product and Process Modelling in the Building and Construction Industry – ECPPM, 8-10 September 2004, Istanbul, Turkey. London, UK, Taylor & Francis Group plc, 2004, S. 263-271, 04 1535 938 4.
- Mantsch04 Mantscheff, J., Helbig, W.: Baubetriebslehre II. 5. Aufl. München, Werner-Verlag, 2004, 199 S., 3-8041-4322-9.
- Mart96 Martinez, J.C.: STROBOSCOPE - State- and resource- based simulation of construction processes. Proceedings of the 1995 construction congress, ASCE. San Diego, CA, October, 1996, S. 22-26.
- Mart96a Martinez, J.C.: STROBOSCOPE: State and Resource Based Simulation of Construction Processes. Ph.D. Dissertation, University of Michigan, 1996, http://www.cem.umich.edu/loannou/StrobWeb/Stroboscope/StrbPubs/UM96_Thesis/UMThesis.pdf (05.04.06).
- Mey05 Meyer, M.: Erfassung der Zeitparameter eines in einer VR-Umgebung simulierten Arbeitsprozesses aus dem Bauwesen. Zugl. Diplomarbeit. Bauhaus-Universität Weimar, 2005, 115 S.
- Moh05 Mohamed, Y., AbouRizk, S.M.: Framework for Building Intelligent Simulation Models of Construction Operations. Journal of computing in civil engineering. 19, 3/2005, S. 277-291, 0887-3801.
- Nies93 Niestroj, C.: Objektorientierte Analyse für den bauteilorientierten Datenaustausch von der Objekt- zur Tragwerksplanung. Zugl. Dissertation. Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, Technische Hochschule Darmstadt, 1993.
- NIST04 U.S. Department of Commerce Technology Administration, National Institute of Standards and Technology (Hrsg.): Cost Analysis of Inadequate Interoperability in the U.S. Capital Facilities Industry. NIST GCR 04-8687. USA, 2004.
- Obe99 Oberweis, A., Lenz, K., Gentner, C.: Simulation betrieblicher Abläufe. wisu - das wirtschaftsstudium. 1999, 2, S. 216-223.
- Oehme82 Oehme, J., Fleischmann, H.D.: Aufstellung und Anwendung von Kostenrichtwerten. Berichte aus Forschung und Entwicklung der FH Bielefeld. Nr. 1/1982.

- Oglesby89 Oglesby, C.H., Parker, H.W., Howell, G.A.: Productivity Improvement in Construction. McGraw-Hill Series in construction engineering and project management. New York, McGraw-Hill, 1989, 588 S., 0-07-047802-3.
- Olof05 Olofsson, T., Jongeling, R.P.M., Woksepp, S.: The use of Virtual Reality in a large scale industry project. Hrsg.: Scherer, R., Katranuschkov, P., Schapke, S.-E.: CIB W78 - 22nd Conference on Information Technology in Construction, 19-21 July 2005. CIB Publication No. 304. Technische Universität Dresden, Institute for Construction Informatics, 2005, 718 S., 3-86005-478-3.
- Opitz67 Opitz, G.: Selbstkostenermittlung für Bauarbeiten. Teile 1 und 2. Düsseldorf, Werner Verlag, 1967.
- Pauls87 Paulson, Boyd C.Jr.: Interactive graphic for simulating construction operations. Journal of the construction division, ASCE. 1987, 104(1), S. 69-76.
- Pekrul05 Pekrul, S., Seefeldt, M.: Zukunftsstrategien der Bauindustrie. Baumarkt+Bauwirtschaft. Heft 4/2005, S. 16-21.
- Perd01 Perdomo, J.L.: Detailed Haul Unit Performance Model. Master Thesis, Department of Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University (Virginia Tech), 156 S., <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-09112001-163046/unrestricted/Thesis.pdf> (01.09.2005).
- Petri62 Petri, C.A.: Kommunikation mit Automaten. Schriften des rheinisch-westfälischen Instituts für instrumentelle Mathematik an der Universität Bonn. Zugl. Diss. Technische Universität Darmstadt, Bonn, Darmstadt, 1962.
- Poesch04 Poesch, T., Schildwächter, R., Zeile, P.: Eine Stadt wird dreidimensional: 3D Stadtmodell Bamberg. Hrsg.: Schrenk, M.: Proceedings of the 9th International Symposium on Planning & IT, Symposium CORP 2004 & Geomultimedia04, February 2004, Wien. Technische Universität Wien, 2004, S. 543-548, 3-901673-11-2.
- REFA84 Küstner, G.: REFA in der Baupraxis - Teil 2: Datenermittlung. Frankfurt, ZTV-Verlag, 1984, 197 S.
- REFA91 REFA-Methodenlehre der Betriebsorganisation: Arbeitsgestaltung in der Produktion. München, C. Hanser Verlag, 1991, 541 S., 3446173870.
- Retik90 Retik, A., Warszawski, A., Banai, A.: The Use of Computer Graphics as a Scheduling Tool. Building and Environment. 25, 2/1990, S. 133-142.
- Retik95 Retik, A.: VR System Prototype for Visual Simulation of the Construction Process. Hrsg.: Powel, A.: Proceedings of EPSRC Conference, VR & Rapid Prototyping for Engineering. Salford, UK, S. 90-93.
- Retik97 Retik, A.: Planning and monitoring of construction projects using virtual reality. Project Management. 3/1997, S. 28-31.
- Retik99 Retik, A., Shapira, A.: VR-based planning of construction site activities. Automation in Construction. 8/1999, S. 671-680.

- Riel04 Riel, A.E., Brenner, E.: Shape to Function: From DMU to BMU. Hrsg.: Mertins, K., Rabe, M.: Experiences from the Future. Tagungsband 11. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Berlin, 04.-05. Oktober 2004. Stuttgart, Fraunhofer IRB-Verlag, 2004, S. 275-288, 3-8167-6640-4.
- Rod05 Rodriguez, W., Opdenbosch, A., Santamaria, C.: Managing Construction Operations Visually: 3-D Techniques for Complex Topography and Restricted-Visibility. e-Operations Research. Working paper number 2005-004, <http://www.fgcu.edu/wrodriguez/managingvisually.doc> (23.10.2005).
- Rösel04 Rösel, W., Busch, A.: AVA-Handbuch Ausschreibung - Vergabe - Abrechnung. 5. Aufl. Wiesbaden, Vieweg & Sohn Verlag, 2004, 205 S., 3-528-11693-5.
- Rüp04 Rüppel, U., Meissner, U., Greb, S.: Modeling processes and processing product model information based on Petri Nets. Hrsg.: Dikbas, A., Scherer, R.: eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction. Proceedings of the 5th European Conference on Product and Process Modelling in the Building and Construction Industry - ECPPM 8-10 September 2004, Istanbul, Turkey. London, UK, Taylor & Francis Group plc, 2004, S. 291-296, 04 1535 938 4.
- Ruw01 Ruwanpura, J., AbouRizk, S.M., Fernando, S.: Implementation of Computer-Based Planning and Estimating Tools for a Public Utility. Cost Engineering. 43, 10/2001, S. 39-46.
- Sashio04 Sashio, K., Kaihara, T., Fujii, S., Sugimori, M.: Distributed Virtual Factory under E-Business Environment. Hrsg.: Mertins, K., Rabe, M.: Experiences from the Future. Tagungsband 11. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Berlin, 4.-5. Oktober 2004. Stuttgart, Fraunhofer IRB-Verlag, 2004, S. 451-460, 3-8167-6640-4.
- Sawh03 Sawhney, A., Bashford, H., Walsh, K., Mulky, A.R.: Agent-based Modeling and Simulation in Construction. Hrsg.: Chick, S., Sánchez, P.J., Ferrin, D., Morrice, D.J.: Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference. 2003, S. 1541-1547.
- Sawh98 Sawhney, A., AbouRizk, S.M., Halpin, D.W.: Construction project simulation using CYCLONE. Canadian Journal of Civil Engineering. 1998, 1, S. 16-25, 0315-1468.
- Schäf95 Schäfer-Kunz, J.: Simulation Based Costing - Kostenrechnung in der virtuellen Fabrik. Hrsg.: Biethahn, J.: Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe. Göttingen, 1995, S. 99-108.
- Schmitt02 Schmitt, R., Wendenburg, M.: Parameterbasierter Engineering-Workflow: Dokumente als Bremsklötze der Produktentwicklung. CAD CAM. 2/2002, S. 48-51.
- Schneid00 Schneider, U.: Standardisierung der Kommunikation als Integrationsansatz für das Bauwesen. Zugl. Dissertation. Fakultät Bauingenieurwesen, Bauhaus-Universität Weimar, 2000.

- Schneid90 Schneider, W.: Ermittlung von innerbetrieblichen Leistungswerten für Baubetriebe. REFA-Nachrichten. 6/1990, S. 5-10.
- Schopb02 Schopbach, H.: Ansätze zur Kostensenkung in Konstruktion und Baubetrieb durch Einsatz mathematischer Optimierungsmethoden. Zugl. Diss. Universität Kassel, 2001. Schriftenreihe Bauwirtschaft des Instituts für Bauwirtschaft (IBW): I, Forschung Kassel, kassel univ. press, 2002, 184 S., 3-933146-81-X.
- Schum03 Schumann, M.: Bauteilorientierte Ausschreibung. Studienarbeit an der Professur Baubetrieb und Bauverfahren. Bauhaus-Universität Weimar, 2003, 61 S.
- Schuma04 Schumann, M.: Zeit- und Konsistenzmanagement verteilter, interaktiver Echtzeitanwendungen am Beispiel einer virtuellen Trainingsumgebung. Hrsg.: Mertins, K., Rabe, M.: Experiences from the Future. Tagungsband 11. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Berlin 4.-5. Oktober 2004. Stuttgart, Fraunhofer IRB-Verlag, 2004, S. 423-432, 3-8167-6640-4.
- Seeling72 Seeling, R.: Reihenfolgeprobleme in Netzplänen. Bauwirtschaft. 50/1972, S. 1897-1904.
- Seeling78 Seeling, R.: Operations Research im Baubetrieb. Bauingenieur. 53 (1978), S. 9-19.
- Shi97 Shi, J., AbouRizk, S.M.: Resource-based modeling for construction simulation. Journal of construction engineering and management, ASCE. March, 1997, S. 26-33.
- Shir03 Shiratuddin, M., Thabet, W.: A Framework for a Collaborative Design Review System Utilizing the Unreal Tournament (UT) Game Development Tool. Proceedings of the CIB W78 Conference on IT in Construction. Auckland, New Zealand, 2003.
- Shira01 Shiratuddin, M.F., Zulkifli, A.N.: Making Virtual Reality a Reality: Bringing CAD and Game Engine together. Proceedings of the International Conference on Information Technology and Multimedia at UNITEN (ICIMU 2001). Recent Advances and Future Trends in Information Technology and Multimedia. Universiti Tenaga Nasional, Malaysia, 2001.
- STEP05 Memorandum of Understanding (MoU) zur Anwendung von STEP-CDS im Bauwesen. Pressemitteilung des Hauptverbandes der Deutschen Bauindustrie vom 14.01.05. <http://www.bauindustrie.de/seiten/presse/artikel.php3?id=325> (23.10.2005).
- StLB-Bau05 Standardleistungsbuch Bau (StLB-Bau) - Dynamische BauDaten. <http://www.dbd.de> (10.08.2005).
- Stork02 Stork, F.: Supply Chain Event Management - Dynamisches Prozessmanagement in Echtzeit mit Geschäftsregeln. Industrie Management. 6/2002, S. 57-60.
- Sva00 Svaransky, S.D.: Engineering of creativity: Introduction to TRIZ methodology of inventive problem solving. Boca Raton, Florida, USA, 2000.

- Teicho63 Teicholz, P.: A simulation approach to the selection of construction equipment. Technical Report 26 Construction Institute, Stanford University, Palo Alto, Calif., 1963.
- Theiß02 Theiß, M.: Dynamische Integration von technischem Wissen in den Bauplanungsprozess. Hrsg.: Bilek, J.: Forum Bauinformatik 2002 - Junge Wissenschaftler forschen. Düsseldorf, VDI-Verlag, 2002, S. 117-123.
- Vad02 Vad, J.S., Beer, D., Heinrich, T., Huhnt, W.: Werkzeuge zur Planung der Planung. Hrsg.: Bilek, J.: Forum Bauinformatik 2002 - Junge Wissenschaftler forschen. Düsseldorf, VDI-Verlag, 2002, S. 197-204.
- VDI3633 VDI-Richtlinie 3633, Blätter 1-11. Berlin, Beuth Verlag, 2001.
- VDINach04 Messen bringen Computer und Industrieautomation zusammen. VDI-Nachrichten. 1-2/2004, Düsseldorf, S. 10.
- VDINach04a Ciupek, M.: Automobilhersteller strukturieren Arbeitsprozesse neu. VDI Nachrichten 42/2004, Düsseldorf, S. 4.
- VHB99 Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.): VHB-Vergabehandbuch für die Durchführung von Bauaufgaben des Bundes im Zuständigkeitsbereich der Finanzbauverwaltungen. 1999.
- Weeb01 Weeber, H., Bosch, S.: Vergabeverfahren und Baukosten. Reihe 'Bauforschung für die Praxis', Band 56. Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, 2001.
- Wenk04 Wenk, G.: Am Gängelband der Satelliten. bd baumaschinendienst. 3/2004, S. 28-35.
- Wer02 Werner, A.: Datenbankgestützte Risikoanalyse von Bauprojekten - Eine Methode zur rechnergestützten Monte-Carlo-Simulation des Bauablaufes für die Risikobewertung und Risikoklassifizierung im Bauunternehmen. Zugl. Dissertation. Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Universität Rostock, 2002, 97 S.
- Wied96 Wiederkehr, U.: Informatikgestützte Leistungsdefinition und Baukostenplanung. Zugl. Dissertation ETH Nr. 11'408. Zürich, vdf Hochschulverlag ETH Zürich, 1996.
- Will02 Willenbacher, H.: Interaktive verknüpfungsbasierte Bauwerksmodellierung als Integrationsplattform für den Bauwerkslebenszyklus. Zugl. Dissertation. Fakultät Bauingenieurwesen, Bauhaus-Universität Weimar, 2002, 158 S.
- Winch03 Winch, G.M.: Critical Space Analysis: Planning the Use of Spatial Resources on Projects. Proceedings 3rd Nordic Conference on Construction Economics and Organisation. Lund University, 2003, S. 375-392.
- Woks01 Woksepp, A.: Centralhuset - A Virtual Reality project at the building site. Proceedings of the AVR II & CONVR 2001 conference on Applied Virtual Reality in Engineering & Construction. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2001.

-
- Woks04 Woksepp, S., Tullberg, O., Olofsson, T.: Virtual Reality at the building site: investigating how the VR model is experienced and its practical applicability. Hrsg.: Dikbas, A., Scherer, R.: eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction. Proceedings of the 5th European Conference on Product and Process Modelling in the Building and Construction Industry - ECPPM 8-10 September 2004, Istanbul, Turkey. London, UK, Taylor & Francis Group plc, 2004, S. 587-593, 04 1535 938 4.
- Wooldr95 Wooldridge, M., Jennings, N.R.: Intelligent Agents: Theory and Practice. <http://www.csc.liv.ac.uk/~mjlw/pubs/ker95.pdf> (29.08.05).
- Xu03 Xu, J., AbouRizk, S.M., Fraser, C.: Integrated three-dimensional computer-aided design and discrete-event simulation models. Canadian journal of civil engineering. 30, 2/2003, S. 449-459, 0315-1468.
- Ziegl02 Ziegler, F.: Eine formale Beschreibung der Bauauftragsrechnung - Grundlage zur Anpassung und Entwicklung eines Informationssystems. Zugl. Diss. Bauhaus-Universität Weimar. Weimar, 2002, 267 S.
- Zülch04 Zülch, G.: Zeitwirtschaftliche Voraussetzungen für die simulationsgestützte Planung von Produktionssystemen. REFA-Nachrichten. 57. Jahrgang, Heft 2/April 2004, S. 4-11, 0033-6874.
- Zülch97 Zülch, G., Heel, J.: Personalorientierte Simulation - Grundsätze und Anwendungsaspekte. Hrsg.: Kuhn, A., Wenzel, S.: Simulationstechnik. Braunschweig, Wiesbaden, Vieweg, 1997, S. 57-66.

