

Simulation von Logistikprozessen auf Baustellen auf Basis von 3D-CAD Daten

Dissertationsschrift
zur Erlangung des Doktorgrades
(Dr.-Ing.)

an der
Universität Dortmund
in der
Fakultät Maschinenbau

von
Dipl.-Ing. Jörg Weber
15. Oktober 2007

Die vorliegende Arbeit wurde von der Fakultät Maschinenbau der Universität Dortmund als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Vorsitzender der	
Prüfungskommission:	Prof. Dr.-Ing. K. Thermann
Erster Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. U. Clausen
Zweiter Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. M. Gralla (Fakultät Bauwesen, Uni Dortmund)
Dritter Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. A. Kuhn

Tag der mündlichen Prüfung 17. Dezember 2007

Abstract

In this paper a method is presented, which reproduces logistics processes on construction sites with a conventional material flow simulator. So it is possible to test and verify different logistics strategies before a civil work starts.

In the beginning the state of the art concerning the development of construction logistics and simulation of site processes is given. In this context different supply and warehouse strategies for construction sites are presented.

The method is structured in system load generation, building a conceptional model and development of reusable modules. To generate the system load the data of the CAD building model of the construction project was imported into a database and edited for simulation. Material-pure Parts were developed with material conform quantities (*piece, m³, t*, etc.), which were connected with the time component of the timetable. In the next step the parts were composed to sections, which is the basis of the material supply. Furthermore in the database logistics standing data were put in to build logistics unities as transport or handling unities.

The conceptional Simulation-Model was developed to describe logistics processes on construction sites independent to concrete projects. The question was how productive the logistics resources are in relation to different strategies.

To build the computer simulation model a unit orientated material flow simulator was used and new universal units were developed to describe the site resources. The universality of the units was important to use them for different projects.

With an example project different supply and warehousing strategies were tested and evaluated. It is shown, how the system reacts on variation of constrains and how the key figures like throughput or waiting times shift.

In the end a summary is given and universal conclusions are made. In the outlook the research demand is given concerning further units and a systematically analysis of further logistics site strategies.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Problemstellung	2
1.2.1 Wirtschaftliche Situation in der Bauwirtschaft	2
1.2.2 Trends	3
1.3 Ziel der Arbeit	5
1.4 Gliederung der Arbeit	7
2 Stand der Baulogistikforschung	9
2.1 Logistik	9
2.2 Baulogistik	11
2.2.1 Entwicklungsphase 1 'Ordnung auf der Baustelle' . . .	12
2.2.2 Entwicklungsphase 2 'Koordinierung und horizontale Gliederung der Logistik'	15
2.2.3 Entwicklungsphase 3 'Wertschöpfungsdenken, Logis- tikplanungsinstrumente'	16
2.3 Simulation von Prozessen auf Baustellen	20
3 Systemanalyse Baustelle	23
3.1 System Baustelle	23
3.2 Unterschiede zur stationären Industrie	24
3.2.1 Temporärer Standort	24
3.2.2 Unikatcharakter und Größe der Objekte	24
3.2.3 Kunden-Lieferanten Beziehungen	28

3.2.4	Gewerkesystematik und Auftragsvergabe	29
3.2.5	Datenlage im Bauwesen	31
3.3	Baustellenressourcen	36
3.3.1	Lkw für Ver- und Entsorgungstransporte	36
3.3.2	Baustellenkrane	38
3.3.3	Baustraßen und -wege	41
3.3.4	Baustellenlager	42
3.4	Logistikstrategien für Baustellen	43
3.4.1	Lagerstrategien im Bauwesen	44
3.4.2	Bevorratungsstrategien	45
3.4.3	Lieferstrategien	46
4	Grundlagen der Simulationsmethode	49
4.1	Begriffsbestimmungen	49
4.2	Modellierung	51
4.2.1	Konzeptmodell	52
4.2.2	Beobachtungszeitraum	54
4.2.3	Computermode ll	56
4.3	Ergebnisse	57
4.4	Modellprüfung	57
4.4.1	Begriffsbestimmung	57
4.4.2	Prüfung des Konzeptmodells	58
4.4.3	Prüfung des Computermode ll s	59
4.5	Die Simulationsumgebung <i>Enterprise Dynamics</i>	59
5	Modellbeschreibung	63
5.1	Einleitung	63
5.2	Systemlast	64
5.2.1	Nebenprozesse	67
5.3	Datenbank	67
5.3.1	Aufbau der Datenbank	67
5.3.2	Baubetriebliche Aufbereitung der Daten	69
5.4	Konzeptionelles Modell	72
5.4.1	Zielsetzung	72

5.4.2	Aufbau und Struktur	73
5.5	Die Atom-Bibliothek von SIMUBAU	76
5.5.1	Bauelemente	76
5.5.2	Lkw-Beladung	78
5.5.3	Einfahrt	81
5.5.4	Initialisierung	82
5.5.5	Wege	83
5.5.6	Lkw-Entladung	85
5.5.7	Kranmodul	87
5.5.8	Lager	90
5.5.9	Verarbeitung	93
5.5.10	Einbauort	94
5.6	Modellprüfung	95
5.6.1	Teilmodelle	96
5.7	Strategien und Regeln	99
5.7.1	Bevorratungs- und Lieferstrategien	100
5.7.2	Lagerstrategien	101
5.7.3	Strategien der operativen Lenkung	101
6	Anwendungsbeispiel	103
6.1	Beschreibung des Bauvorhabens	103
6.2	Leistungswerte der Ressourcen	106
6.2.1	Lkw Leistungswerte	106
6.2.2	Kran Leistungswerte	107
6.2.3	Leistungswerte Lager und Verarbeitung	110
6.3	Modellprüfung	110
6.4	Auswertungen und Strategien	111
6.4.1	Übersicht über die untersuchten Varianten	112
6.4.2	Variante 1 <i>Wegeminimierung</i>	113
6.4.3	Variante 2 <i>Minimierung der Lkw-Durchlaufzeit</i>	120
6.4.4	Variante 3 <i>Verkürzung der Bauzeit um 10 %</i>	123
6.4.5	Variante 4 <i>Verkürzung der Bauzeit um 15 %</i>	125
6.4.6	Sondervariante <i>Optimierung der Lkw-Ankunft</i>	127

6.4.7	Sondervariante <i>Zusammenladungsmöglichkeiten</i>	129
6.4.8	Tabellarische Zusammenstellung	131
6.5	Diskussion der Ergebnisse und Übertragbarkeit	133
7	Zusammenfassung und Ausblick	135
7.1	Zusammenfassung	135
7.2	Ausblick	136
	Literaturverzeichnis	139
	Glossar	150
A	Umrechnungen von Zeiten und Koordinaten	155
A.1	Simulationszeit \rightarrow Realzeit	155
A.2	Realzeit \rightarrow Simulationszeit	155
A.3	Umrechnung kartesischer Koordinaten	157
B	Ergänzende Tabellen	161
B.1	Datenbanktabellen	161
B.1.1	Materialtabelle	161
B.1.2	Arbeitsabschnitte	162
B.1.3	Materiallieferabschnitte	162
B.1.4	Lagertabelle	163
B.2	Logistische Materialwerte	164
B.2.1	Packmittel-Ladeeinheit-Transporteinheit	164
B.2.2	Lagerflächenbedarf	165

Abbildungsverzeichnis

1.1	Planungsreihenfolge	7
2.1	Ganzheitliche Betrachtung der Logistik nach [Kra01] und [Jün98]	10
2.2	Die drei Säulen der Logistik nach [Jün00]	11
2.3	Die drei Entwicklungsphasen der Baulogistik	12
2.4	Inselversorgung	13
2.5	Strategiealternativen hinsichtlich der Logistik nach [Lei03] . .	17
2.6	Einordnung der Simulation nach DIN 19226 Teil 1	20
3.1	Wegeproblem	25
3.2	Taktfertigung	26
3.3	Materialfluss im Hochbau	26
3.4	Beispiel für eine Quelle-Senke-Matrix	27
3.5	Kosten für Subunternehmertätigkeiten im Bauhauptgewerbe .	28
3.6	Der Paradigmenwechsel von der Zeichnung zum Modell . . .	32
3.7	Spezialfahrzeug für Transportbeton	36
3.8	Exemplarisch ausgewählte Spezialfahrzeuge im Bauwesen nach [Neu00]	37
3.9	Baustellenkrane	38
3.10	Turmdrehkran, obendrehend, Katzausleger, Quelle: Wolffkran	39
3.11	Prozesskette Kranspiel	40
3.12	Geschwindigkeitsprofile I und II	41
3.13	Platzbedarf beim Wenden und Abbiegen nach [Neu00]	41
3.14	Schleppkurven nach [Neu00] in Abhängigkeit vom Fahrzeugtyp	42
3.15	Etagenlager nach [Boe04]	43
3.16	Optimale Bestellmenge unter Berücksichtigung der Lagergröße	45

3.17	Einsatz eines Gebietsspediteurs	46
3.18	Shuttle-Verkehre	47
4.1	Beziehungen zwischen Original, Modell und Experimentator nach [Pag91]	50
4.2	Modellierung nach [Rob04]	51
4.3	Normal-Verteilung	52
4.4	Erlang-Verteilung mit $k = 2$	53
4.5	Negativexponential-Verteilung	53
4.6	Gleichverteilung-Verteilung	54
4.7	Diskrete-Verteilung	54
4.8	Bauzeitenplan und Simulationszeithorizont	55
4.9	Zusammenhang zwischen Anzahl der Stichproben, dem be- rechneten Mittelwert der Zielgröße und dem Konfidenzintervall	56
4.10	Simulationsumgebung von <i>Enterprise Dynamics</i>	60
5.1	Bauteil–Bauelemente	65
5.2	Vorgehensweise Teil 1	66
5.3	Vorgehensweise Teil 2	68
5.4	Arbeitsabschnitte-Materiallieferabschnitte	69
5.5	Darstellung der Arbeitsabschnitte und Materiallieferabschnit- te in einem Gantt-Diagramm	70
5.6	Kopplung der Arbeitsabschnitte	71
5.7	Manipulationsmöglichkeiten der Materiallieferabschnitte . . .	72
5.8	Allgemeine Prozesskette Baustelle	73
5.9	Ablauf der Simulation	75
5.10	Die Atombibliothek von SIMUBAU	76
5.11	Verschiedene Liefereinheiten	76
5.12	Transporteinheit	77
5.13	Lkw-Beladung	78
5.14	Lkw-Beladung-Atomgruppe	79
5.15	Deterministischer und stochastischer Anteil der Lkw-Taktung	80
5.16	Gewichtete Gleichverteilung	81
5.17	Einfahrt	82

5.18	Wege	83
5.19	Lkw-Entladung	85
5.20	Stückgut-Liefereinheiten	86
5.21	Nicht Stückgut-Liefereinheiten	86
5.22	Kranmodul	87
5.23	Fallunterscheidungen Normalfall – Sonderfall	89
5.24	Lager	91
5.25	Lageratomgruppe	91
5.26	Verarbeitung	93
5.27	Einbauort-Atomgruppe	94
5.28	Teilmodell Kran	97
5.29	Transport in den 4. Quadranten im Teilmodell	97
5.30	Teilmodell Verarbeitung	98
5.31	Übersicht Strategien und Regeln	100
6.1	Ansicht von Nord-Ost	103
6.2	Grundriss Baustelleneinrichtung	104
6.3	Ansicht des 3D-Modells	105
6.4	Simulationsmodell	106
6.5	Arbeitsgeschwindigkeit Drehen nach Herstellerangaben	108
6.6	Arbeitsgeschwindigkeit Katzfahren nach Herstellerangaben . .	109
6.7	Arbeitsgeschwindigkeit Heben nach Herstellerangaben	110
6.8	Modell während der Simulation	112
6.9	Kumulierte Liefermenge Systemlast A über die Bauzeit	115
6.10	Kransauslastung und Anzahl Lkw	116
6.11	Auslastung Lager	116
6.12	Kumulierte Liefermenge Systemlast C über die Bauzeit	117
6.13	Kransauslastung und Anzahl Lkw	118
6.14	Auslastung Hauptlager und Etagenlager 2	118
6.15	Auslastung Etagenlager 3 und 4	119
6.16	Anzahl der Lkw und der wartenden Lkw	121
6.17	Lagerauslastung bei Optimierung der Lkw-Auslastung	122
6.18	Kransauslastung und Anzahl der Lkw sowie der wartenden Lkw bei 10 % Bauzeitreduzierung	124

6.19	Lagerbestand bei 10 % Bauzeitreduzierung	124
6.20	Kransauslastung und Anzahl der Lkw sowie der wartenden Lkw bei 15 % Bauzeitreduzierung	125
6.21	Lagerbestand bei 15 % Bauzeitreduzierung	126
6.22	Kransauslastung und Anzahl der Lkw sowie der wartenden Lkw bei Kranreichweitenreduzierung	127
6.23	Lagerbestandskurve für die Systemlast B (vgl. Kap. 6.4.3) und der Optimierung	128
6.24	Anzahl der Lkw sowie der wartenden Lkw bei Systemlastop- timierung	129
A.1	Umrechnung Realzeit in Simulationszeit	157
A.2	Kartesische/Zylinderkoordinaten	157
A.3	Vektor im Raum	158

Tabellenverzeichnis

3.1	Daten anderer Anwendungen für die Simulation	33
3.2	Zustand von Daten	34
3.3	Informationen im Warengruppenschlüssel	35
5.1	Systemlastneutral versus systemlastverändernd	64
5.2	Label der Bauelemente	77
5.3	Durchschnittliche Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der Gesamtstrecke und der Maximalgeschwindigkeit	84
5.4	Fallunterscheidungen am Beispiel	90
5.5	Inputdaten und 'Handrechnung' für Teilmodell Verarbeitung	98
6.1	Transporteinheiten der Bauelemente	107
6.2	Kran Grundleistungswerte	108
6.3	Leistungswerte Kran 'Drehen'	108
6.4	Leistungswerte Kran 'Katzfahrt'	109
6.5	Leistungswerte Kran 'Heben'	110
6.6	Lager- und Verarbeitungswerte	111
6.7	Ausprägungsmöglichkeiten verschiedener Merkmale	113
6.8	Varianten mit ihren Ausprägungen	114
6.9	Kennzahl Einheit-Abstand Lagerort zu Einbauort	119
6.10	Ergebnisse der Abfrage zur Zusammenlegung von Material	130
6.11	Erläuterung der Tabellenspalten von 6.12	131
6.12	Zusammenstellung aller Ergebnisse	132
B.1	Feldnamen der Materialtabelle mit logistischen Eigenschaften	161
B.2	Aufwandswerte Materialverarbeitung	162
B.3	Spalten der Arbeitsabschnittstabelle	162

B.4	Spalten der Materiallieferabschnittstabelle	162
B.5	Spalten der Lagertabelle	163
B.6	Logistikstammdaten 1	164
B.7	Logistikstammdaten 2	165

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Ausgangssituation

„Bauen ist Krieg!“

ist das Zitat eines Bauprojektleiters und beschreibt die Lage der Bauwirtschaft sehr treffend. Der baugewerbliche Umsatz im Bauhauptgewerbe ist seit 1996 mit Ausnahme von 1999 kontinuierlich zurückgegangen. Erst seit 2006 sind wieder positive Zahlen zu verzeichnen [Wei07]. Die Unternehmen kämpfen dennoch weiter ums Überleben. Ein schrumpfender Markt mit gleichzeitig hohen Überkapazitäten in den Unternehmen führt auf Grund der Konkurrenzsituation zu einem hohen Kostendruck. Die Logistik hat man im Gegensatz zu anderen Branchen nicht oder nur sehr begrenzt als Wettbewerbsfaktor [Sch03] entdeckt, obwohl die Logistik ihren Ursprung im Militär hat [Bau00].

Aufgabe der Logistik war der Nachschub und die Versorgung der kämpfenden Truppe mit Material und Munition. Man betrachtete die Versorgung des Heeres als eigenständige Aufgabe und erarbeitete Konzepte zu deren Optimierung. Eine effektive Logistik war und ist im Krieg wie in der Wirtschaft nicht selten entscheidend.

Dass Bauen und Logistik zusammengehören, wird allein dadurch deutlich, dass 2005 45 % des gesamten Primärmaterialeinsatzes auf das Baugewerbe entfällt [NNa07]. Die Entsorgungsmengen lagen 2003 in der Größenordnung von 61 % des gesamten Abfallaufkommens [NN06a].

Ein Grund, warum die Logistik im Bauwesen sich noch nicht ausreichend durchsetzen konnte, liegt in der sehr heterogenen Struktur und dem extrem hohen Anteil an Kleinunternehmen in der Bauwirtschaft. Die Durchsetzung von bestimmten Standards, die in der Logistik nötig sind, ist dadurch erschwert. Die Besonderheiten des Bauwesens (vgl. Kap. 3) lassen eine direkte

Übertragung von Logistikkonzepten der stationären Industrie und des Handels nicht zu.

In vielen Bereichen des Bauwesens werden vereinzelt Logistikprinzipien, wie z. B. die zeitfenstergesteuerte Lkw-Anlieferung, angewendet, ohne dass diese als solche explizit benannt werden und in der Regel auf Erfahrungswissen der Bauleitung beruhen. Dies führt teilweise dazu, dass die Notwendigkeit einer eigenständigen, logistischen Betrachtungsweise der Bauwerkserstellung in Frage gestellt wird, da „Logistik ja schon immer betrieben“ wurde. Ein zentraler Ansatzpunkt ist aber die systematische und standardisierte Anwendung von Logistik auf dem Bau. Auf den Treffen des Kompetenzzentrums Baulogistik in Dortmund wurde daher die Erstellung eines Leistungsbildes Baulogistik angeregt, um Baulogistik als eigenständige Leistung zu etablieren.

In der stationären Industrie ist daraus ein eigener Wirtschaftszweig mit über 1 Mio. Beschäftigten und eigenen Ausbildungszweigen auf allen Ebenen entstanden, obwohl auch hier der o. a. 'Vorwurf' anfangs im Raum stand. Die Entwicklung hat aber gezeigt, dass das Herauslösen logistischer Teilprozesse und die separate Betrachtung zu einer deutlichen Verbesserung der Produktivität geführt hat. Die Logistik hat sich zur dritt größten Branche entwickelt, auch wenn sie als eigenständige Branche noch nicht aufgeführt wird [Kla06].

Die Produktivität von Baustellen, auf denen Logistikkonzepte umgesetzt wurden, hat sich verbessert. Daher ist es Aufgabe der Forschung bereits vorhandene Konzepte zu analysieren und zu bewerten sowie neue zu generieren. Hierzu sind Planungsinstrumente notwendig, die sowohl in der Forschung als auch in der Praxis einsetzbar sind.

In dieser Arbeit wird ein Verfahren vorgestellt, das es ermöglicht, verschiedene Logistikkonzepte zu simulieren, um auf diesem Wege Erkenntnisse über deren Effektivität zu erhalten und eine Vergleichbarkeit auf Simulationsebene zu erreichen *bevor* eine Baumaßnahme durchgeführt wird. Damit erweitert sich das Erfahrungswissen auf virtuelle Baustellen, was zu Produktivitätssteigerungen führt, da einige mögliche Fehler im Vorfeld erkannt werden.

1.2 Problemstellung

1.2.1 Wirtschaftliche Situation in der Bauwirtschaft

Die deutsche Bauwirtschaft befindet sich nach einer fast 10-jährigen Krise in einem Aufschwung [Wei07] und ist für die Volkswirtschaft trotz allem von hoher Bedeutung. Bezogen auf das Bruttoinlandsprodukt betrugen die Bauinvestitionen 2006 9,5 %. Allerdings hat sich dieser Anteil seit 1995

(14,3%) [NNa05], [NNb07] stark verringert. Die deutsche Bauwirtschaft ist trotz des derzeitigen Aufschwungs eine schrumpfende Branche. Die Krise der letzten Jahre am Bau wurde von einigen Experten auch als Strukturwandel [Hoc02], [Gir03], [Wei05] bezeichnet. Leere öffentliche Kassen und die Zurückhaltung der gesamten Wirtschaft führten zu einer Verstärkung des Abwärtstrends, der u. a. auch durch den demografischen Wandel der Gesellschaft hervorgerufen wurde. Die dadurch entstandenen Überkapazitäten führten zu einem z. T. ruinösen Preiskampf, der wiederum nicht selten zu Schwarzarbeit und Unterwanderung des Mindestlohns führte. Ob der derzeitige Aufschwung diese Trends nachhaltig verändern kann, bleibt abzuwarten. Im europäischen Vergleich steht die deutsche Bauwirtschaft mit 216 Mrd. € Bauvolumen in 2006 weiterhin der Spitze, wenngleich andere Länder dynamischere Zuwachsraten ausweisen können [NNb07].

Ein weiteres wichtiges Merkmal kennzeichnet die Bauwirtschaft in Deutschland: fast 89 % aller Bauunternehmen sind Kleinunternehmen mit weniger als 20 Beschäftigten. Die Anzahl dieser Unternehmen stieg seit 1995 durch Betriebsaufspaltungen, Verkleinerungen und Neugründungen um 20 %, während sich im gleichen Zeitraum die Zahl der Betriebe mit mehr als 20 Beschäftigten halbierte [Wei05]. Die Bauwirtschaft ist durch Kleinbetriebe geprägt, die stark autonom agieren.

Die wirtschaftliche Situation macht es notwendig die Produktivität in der Bauwerkserstellung zu erhöhen. Hierzu müssen die Logistikkosten aller Beteiligten auf den Baustellen reduziert werden.

1.2.2 Trends

Vor dem Hintergrund der wirtschaftlichen Situation sind die zukünftigen Herausforderungen der Bauwirtschaft groß. Nicht zuletzt auch durch die Computerentwicklung mit zunehmender Rechnerleistung werden Bauaufgaben komplexer. Die Entwürfe werden gewagter. Infolge dessen steht nicht nur die Tragwerksplanung sondern daran anschließend auch der Baubetrieb vor größeren Herausforderungen.

- **Bauzeit:** Eine kurze Bauzeit garantiert dabei einen schnellen Beginn des *Return on Invest.* Damit steigt der Koordinierungsaufwand vor allem im Bereich des Informationsflusses.
- **Anzahl der Gewerke:** Die technische Gebäudeausrüstung wird immer aufwändiger. Dies hat weitere Spezialisierung zur Folge und mehr Einzelgewerke, die koordiniert werden müssen.
- **Lage der Baustelle:** Hinzu kommen vermehrt innerstädtische Problemzonen mit schwierigen Zufahrtssituationen und geringen Arbeitsräumen, weil attraktives Bauland immer knapper wird. Die Lage eines

Bauwerks wird immer wichtiger, sei es die Logistikimmobilie mit einer guten Verkehrsanbindung, das Kaufhaus in der Fußgängerzone oder das Einfamilienhaus in ruhiger und trotzdem stadtnaher Lage.

- **Bauen im Bestand:** Das vermehrte Bauen im Bestand ist ebenfalls ein wesentlicher Trend [Are03], [Str06]. Die Renovierung, Modernisierung und Umnutzung bestehender Gebäude und Anlagen sowie der Verkehrsinfrastruktur sind vermehrt Aufgaben in der Bauwirtschaft. Die reinen Neubauten sind wegen Kosten und Platzmangel zunehmend seltener. Gründe hierfür sind einerseits im privaten Bereich der demografische Wandel und der Trend zu mehr Single-Haushalten und andererseits im gewerblichen Bereich kürzer werdende Produktzyklen sowie ein erhöhter Innovationsdruck, der laufende Anpassungen auch der Immobilien erfordert. Randbedingungen sind die in der Regel noch schlechteren Platzverhältnisse als im Neubau und der unter Umständen notwendige Weiterbetrieb des Gebäudes, der Anlage oder auch der Infrastruktur. Im Gewerbe- und Industriebau sind Weiternutzungen während eines Umbaus die Regel.
- **Vorfertigung:** Die verstärkte Vorfertigung und das industrialisierte Bauen ([NNb03], [Hoc02]) verlangen eine entsprechende Vorplanung und damit Daten und Informationen über Planungsentscheidungen. Hier kommt es auf der Baustelle immer wieder zu Konflikten, wenn es zu Umplanungen kommt [Ols77]. Darüber hinaus hat das industrialisierte Bauen Auswirkungen einerseits auf längere Transportwege, da die Spezialisierung auf Vorfertigung die Lieferdistanzen erhöht, und andererseits reduziert sich die Bauzeit auf der Baustelle, da es sich 'fast nur' noch um eine Montage handelt.
- **Informationstechnologie:** In der Nutzung der Informationstechnologie hinkt die Bauwirtschaft der stationären Industrie weiter hinterher. Eine Erhebung des statistischen Bundesamtes für das Jahr 2005 ermittelte niedrige Nutzungswerte im Vergleich zu den anderen Wirtschaftszweigen [NNb06]. Die Prognosen und Perspektiven für das B2B-Geschäft [Pfo05] deuten zwar hier auf eine deutliche Verbesserung hin, aber dies gilt auch für die anderen Branchen.
- **Personal:** Mit dem derzeitigen positiven Zahlen kommt ein weiteres Problem auf die Bauunternehmen zu: der Fachkräftemangel auf allen Ebenen eines Unternehmens. Neben dem demografischen Wandel hat die Baukrise zu immer kleiner werdenden Ausbildungs- und Studienzahlen geführt.

Alle Trends weisen darauf hin, dass die Komplexität von Bauaufgaben und deren Erstellung weiter steigen wird und Instrumente notwendig sind dieser

Komplexität zu begegnen. Logistik ist dabei ein Bereich, dem mehr Aufmerksamkeit gewidmet werden muss, da die oben genannten Aspekte mittelbar oder unmittelbar mit Logistik kohärieren.

1.3 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, ein simulationsgestütztes Verfahren zu entwickeln, dass es ermöglicht, im Vorfeld verschiedene Logistikkonzepte für ein konkretes Bauvorhaben zu vergleichen und zu bewerten. Mit Hilfe der Methode der Simulation werden die Logistikprozesse auf einer Baustelle transparent und steuerbar, wobei der Untersuchungsraum auf den Hochbau beschränkt wird. Die Ergebnisse ergänzen das Expertenwissen durch konkrete Zahlenwerte und unterstützen den Entscheidungsprozess über den Vergleich von Alternativen. Damit lassen sich mögliche Produktivitätssteigerungen auch bei komplexer werdenden Bauvorhaben schnell und kostengünstig im Vorhinein testen. Das Instrument für dieses Verfahren („SIMUBAU“) nutzt weitestgehend vorhandene Daten und ist modular aufgebaut. In einer vorhandenen Simulationsumgebung wird eine branchenspezifische Bibliothek erstellt, aus deren Bausteinen ein Modell zusammengestellt werden kann.

Es werden die wesentlichen Materialflüsse einer Baustelle simuliert, die an der Baustellengrenze beginnen, eine evtl. Zwischenlagerung beinhalten und mit dem Erreichen des Einbauortes enden. Datengrundlage für die Materialströme der Baustoffe ist das bauteilorientierte 3D-CAD-Modell (Gebäudemodell). Das Modell stellt über eine Schnittstelle alle Eigenschaften der Bauteile wie

- Baustoffe,
- Volumen,
- Masse,
- Lage im Raum, usw.

bereit. Die Terminplanung liefert die Informationen des Arbeitsbeginns und des Fertigstellungszeitpunktes der Bauteile, sowie die Verknüpfung der Tätigkeiten. Darüber hinaus werden die Transportwege, die Transportmittel, die Umschlagmittel und die Zwischenlagerorte der Arbeitsvorbereitung entnommen. Die Kapazität bzw. die Leistung und die Lage im Raum dieser Ressourcen sind erforderlich. Ein weiterer Punkt ist die Festlegung der Liefer- und Lagerstrategien. Diese beinhalten die geplanten Lieferzeitpunkte und -mengen, sowie die Lagernutzung. Nicht abgebildete Prozesse, die die Materialflüsse beeinflussen können, werden abgeschätzt. Dies ist z. B. die Nutzung des Krans für den Transport von Bauhilfsstoffen und sonstigem Hilfsmaterial wie Schalung oder Gerüstmaterial. Unplanmäßige Störfaktoren wie

Witterungseinflüsse oder Maschinenausfälle werden im Rahmen dieser Arbeit als Erweiterungsmöglichkeit angesehen. Mit Hilfe der Simulation werden mögliche Schwachstellen im Transport, der Lagerung, des Umschlags und der Verarbeitung aufgedeckt. Durch Aktualisierung der Datenbasis ist zu jedem Zeitpunkt die Bewertung einer bestimmten Strategie mittels Simulation möglich. Eine Visualisierung der Materialströme auf Grund der in der Simulation ermittelten Daten ist ein 'Nebenprodukt', welches die Ergebnisse transparent und in gewissen Grenzen überprüfbar macht.

Sowohl in der Forschung als auch in der Praxis gibt es bisher wenige Instrumente und Methoden, die die logistischen Prozesse auf Baustellen im Fokus haben, um die Produktivität zu steigern. Die Arbeitsvorbereitung wird in der Praxis aus Kostengründen häufig vernachlässigt. Das Expertenwissen ist meist die Entscheidungsgrundlage im Baubetrieb. In der vorliegenden Arbeit werden erstmals die Daten eines Gebäudemodells mit denen des Bauzeitenplans zu einer Systemlast für eine Materialfluss-Simulation kombiniert. Damit ist es möglich Materialfluss-Simulationen, wie sie aus der stationären Industrie bekannt sind, auch im Bauwesen zu nutzen. SIMUBAU enthält mehrere Komponenten mit denen die Materialflüsse individueller Bauvorhaben schnell und flexibel modelliert werden können. Der modulare Aufbau ermöglicht es SIMUBAU zu erweitern und zu verfeinern. Durch den laufenden Abgleich mit der Baupraxis werden langfristig die Simulationsergebnisse das bisherige Expertenwissen weiter ergänzen.

Abgrenzung:

Der Materialfluss ist nur eine Komponente, die die Terminplanung und damit den Bauablauf beeinflusst. Weitere Komponenten sind Komplexität des Bauvorhabens, Qualität, Anzahl und Motivation der Bauarbeiter, Qualität der Baustelleneinrichtungsplanung usw. Die Optimierung des Materialflusses kann nur in Abhängigkeit vom vorgegebenen Bauablauf erfolgen. Abbildung 1.1 zeigt, dass die Baulogistik vom Baubetrieb abhängt und diese wiederum vom gewählten Bauverfahren, bzw. der Tragwerksplanung (vgl. [Len96]).

Eine Beeinflussung und damit eine Änderung der vorgelagerten Bereiche ist die Ausnahme, da dann in diesen Umplanungen erforderlich sind, die wiederum auf die nachgelagerten Bereiche einwirken, was zu Mehraufwand führt, der vermieden werden sollte. Ein Beispiel einer solchen Ausnahme wäre die Umstellung des Bauverfahrens von Fertigteile auf Ortbeton, wenn die Transportkapazitäten für Fertigteile nicht ausreichen. Die Umplanungen würden die Datengrundlage des Modells verändern und auch den Bauablauf. Zu Beginn eines Projekts sind die Einflussmöglichkeiten und damit die Zahl der Freiheitsgrade sehr hoch und nehmen mit zunehmendem Verlauf ab. Die Simulation in dieser Arbeit setzt an einer festgelegten Datengrundlage bzw. einem vorgegebenen Bauverfahren an und liefert Auslastungen der genutzten Ressourcen im Verlauf der Bauzeit.

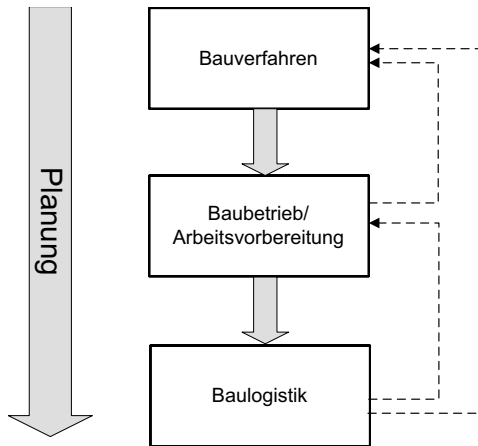


Abbildung 1.1: Planungsreihenfolge

1.4 Gliederung der Arbeit

In der *Einleitung* wurden die Problemstellung, Trends im Bauwesen und das Ziel der Arbeit beschrieben.

Nach der Einführung des Logistikbegriffs im Allgemeinen werden in *Stand der Baulogistikforschung* die Entwicklungsphasen der Baulogistik beleuchtet und mit der Entwicklung der allgemeinen Logistik verglichen, wobei sowohl die horizontale als auch die vertikale Differenzierung der Baulogistik herausgearbeitet werden. Zudem werden nationale und internationale Forschungsarbeiten vorgestellt, die sich mit der Methode der Simulation im Bauwesen beschäftigen. Hierbei werden verschiedene Ansätze aus unterschiedlichen Bereichen des Bauwesens dargestellt, die Petri-Netze, diskrete Event Simulatoren oder CAD-Daten als Basis verwenden.

Die Herausarbeitung der Besonderheiten des Bauwesens im Hinblick auf die logistischen Prozesse erfolgt in der *Systemanalyse Baustelle*, wobei nach Fertigungsmerkmalen, Organisation und Datenlage differenziert wird. In diesem Kapitel werden des Weiteren die Baustellenressourcen, die in dem entwickelten Modell abgebildet werden, analysiert und charakteristische Eigenschaften, die für die Modellbildung wichtig sind, erläutert. Darauf aufbauend werden Logistikstrategien für Baustellen beschrieben, die im Modell getestet werden.

Das Kapitel *Simulation* geht auf die allgemeine Vorgehensweise bei der diskreten Ereignis-Simulation ein und dient der Begriffsbestimmung und -definition. Zudem wird die verwendete Simulationsumgebung vorgestellt, in der SIMUBAU entwickelt wird.

In der *Modellbeschreibung* wird über verschiedene Darstellungsweisen ein allgemeines Konzeptmodell einer Baustelle aufgebaut. Aus 3D Gebäudemodellen

delldaten wird mit Hilfe des Bauzeitenplans eine Systemlast für das Modell generiert. Daran anschließend werden die entwickelten Modellbausteine von SIMUBAU beschrieben, die für die Abbildung der logistischen Prozesse notwendig sind. Die Erläuterungen zur Modellprüfung und die entsprechenden Nachweise folgen im Anschluss. Die Beschreibung der Strategien und Regeln aus 'Simulationssicht', die zu den oben erwähnten Logistikstrategien korrespondieren, beendet das Kapitel.

In dem Kapitel *Anwendungsbeispiel* folgt nach einer Beschreibung eines Bauvorhabens, das simuliert wurde, die Auswertung der Strategien und die Darstellung der Ergebnisse. Speziell wird der Einsatz von Etagenlagern, die Einführung von Lieferzeitfenstern sowie die Bauzeitverkürzung untersucht. Zusätzlich werden einige Sondervarianten untersucht, deren Ergebnisse ebenfalls bewertet und auf Allgemeingültigkeit hin geprüft werden.

Im diesem letzten Kapitel wird eine Zusammenfassung und ein Ausblick gegeben, wobei insbesondere auf den weiteren Forschungsbedarf für die Simulation von Logistikprozessen eingegangen wird.

Kapitel 2

Stand der Baulogistikforschung

Ausgehend von einer kurzen Einführung des Logistikbegriffs mit einer horizontalen und einer vertikalen Sichtweise wird in diesem Kapitel die Baulogistikforschung dargestellt und, so weit möglich, mit Praxisbeispielen ergänzt. Des Weiteren wird der Stand der Forschung hinsichtlich der Anwendung von Simulationsmethoden im Bauwesen wiedergegeben.

2.1 Logistik

Neben einer Reihe weiterer Definitionen für Logistik sei hier stellvertretend die Definition von Jünemann wiedergegeben: Logistik ist die „wissenschaftliche Lehre von der Planung, Steuerung und Überwachung der Material-, Personen-, Energie-, und Informationsflüssen in Systemen“ [Jün98]. Verkürzt kann man Logistik auch als die 4-R-Aufgabe [Pfo03] bezeichnen: Die richtigen Produkte im richtigen Zustand zur richtigen Zeit am richtigen Ort. Diese Begriffe werden häufig noch durch weitere wie richtige Menge, richtige Qualität oder richtiger Preis ergänzt.

Die Logistik wurde bis 1945 im rein militärischen Zusammenhang gebraucht. Die logistischen Planungsteams des amerikanischen Militärs legten im zweiten Weltkrieg die Grundlagen einerseits für das Operations Research als mathematische Planungswissenschaft als auch die Grundlage der wissenschaftlichen Betrachtung der Logistik [Bau00]. Seit den 1960er Jahren wird der Begriff auch in der Wirtschaft verwendet. In den 1970er Jahren standen die Auslastung der Produktion und die Produktionsverfahren in der Industrie im Vordergrund. Zunehmend wurde das Rationalisierungspotenzial durch die ganzheitliche Betrachtung von Beschaffung, Produktion, Lagerung

und Distribution entdeckt [Kra01], was von Jünemann auch als horizontaler Aufbau der Unternehmenslogistik bezeichnet wird [Jün98]. Die vertikale Gliederung der Unternehmenslogistik bezieht sich auf die drei Ebenen Management, Logistik und Materialfluss [Jün98]. Das bereichsorientierte Denken

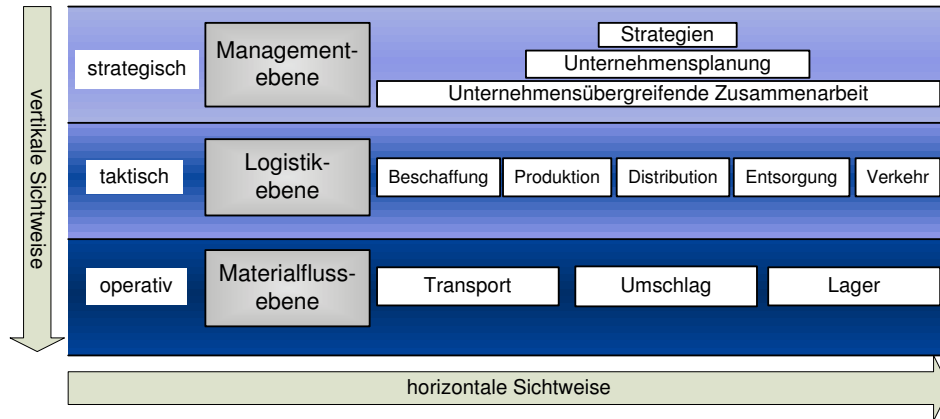


Abbildung 2.1: Ganzheitliche Betrachtung der Logistik nach [Kra01] und [Jün98]

(Abteilungsdenken) wird durch ein flussorientiertes Prozessdenken ersetzt [Kra01], [Wom92]. Dieses beinhaltet immer eine Quelle-Senkenbeziehung, womit einerseits eine *Kunden-Lieferantenbeziehung* und andererseits eine *Wertschöpfung* innerhalb des Prozesses ausgedrückt wird. Mit Kunden sind nicht nur die Endkunden gemeint, sondern alle beteiligten Akteure entlang der Logistikkette innerhalb eines Unternehmens und über Unternehmensgrenzen hinweg. Das Kundendenken mit dem Ziel dessen Bedürfnisse zu befriedigen [Pfo03] bricht das Abteilungsdenken auf und integriert die Voraussetzungen für den darauffolgenden Prozess.

Der andere Aspekt, die *Wertschöpfung*, verdeutlicht, dass Prozesse einen wertschöpfenden Beitrag zum Gesamtprodukt leisten sollen. Womack spricht von „mudda“ [Wom92], dem japanischen Wort für Verschwendung, wenn dies nicht der Fall ist. Logistikaktivitäten erhöhen den Gebrauchswert eines Gutes durch eine bessere Verfügbarkeit und nicht zwangsläufig durch eine bessere Eignung [Pfo03].

Prozesse sind selbstähnlich, d. h. jeder Prozess kann in eine eigene Prozesskette mit höherer Genauigkeit überführt werden [Kuh95]. Prozesse können damit auf einer größeren, übersichtlicheren Ebene bis hin zur Detailebene auf diese beiden Aspekte hin untersucht werden, womit die ganzheitliche Sichtweise ausgedrückt wird. Zielsetzung logistischer Aktivitäten ist es, die Materialien schnell durch die Teilsysteme eines Unternehmens oder einer Organisation „fließen“ zu lassen, um eine hohe Wertschöpfung zu generieren.

Die Basis der Logistik bilden die Säulen *Technik*, *Informatik* und *Betriebs-*

wirtschaft (vgl.2.2). Zur Technik gehören alle Materialflusselemente, die an

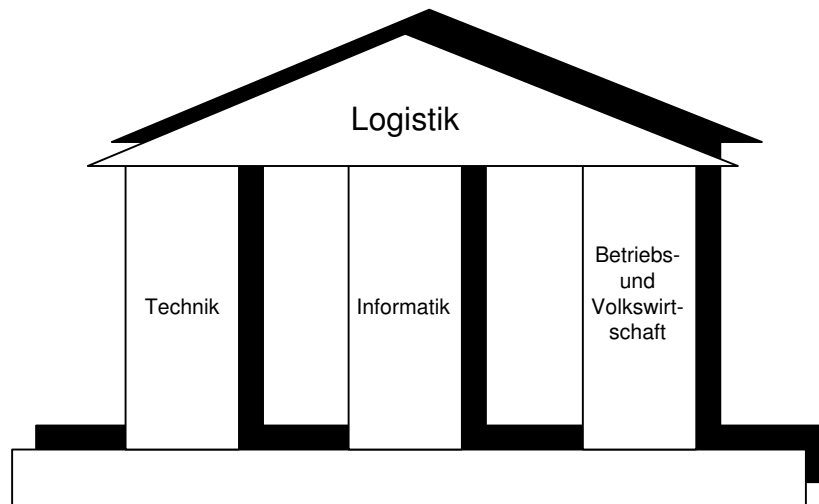


Abbildung 2.2: Die drei Säulen der Logistik nach [Jün00]

der physikalischen Umsetzung der logistischen Grundprozesse Transport, Umschlag, Lagerung (TUL-Prozesse) beteiligt sind. Dazu gehören außer- und innerbetriebliche Transportmittel, Behälter, Fördersysteme, Umschlagmittel sowie Be- und Entladesysteme. Angesiedelt ist die Technik auf der Materialflussebene (vgl. Abb. 2.1), wenn man von der Entwicklung, Gestaltung und Konstruktion absieht [Jün00].

Die Informatik bildet die Grundlage für den überwiegend elektronischen Informationsfluss, der Daten und Informationen verwaltet, und dem Materialfluss vorausseilt. Die Informatik durchdringt alle Unternehmensebenen und verbindet sie über den Informationsfluss.

Die Betriebswirtschaft leistet den entsprechenden wirtschaftlichen Beitrag zu den oben genannten Prozessen und ist letztendlich der Treiber für jegliche logistische Aktivität in Wirtschaftssystemen [Pfo03].

2.2 Baulogistik

Wie die klassische Logistik durchläuft auch die Baulogistik bestimmte Entwicklungsphasen, nur dass diese entsprechend zeitlich versetzt sind. Der Stand der Forschung und der Baupraxis werden an Hand dieser Phasen erläutert. Abbildung 2.3 liefert einen Überblick über die drei Phasen der Baulogistik, die natürlich nicht ganz trennscharf zu sehen sind.

Logistische Fragestellungen wurden auch vor Einführen des Begriffs *Baulogistik* behandelt [Kra05], wie dies in der klassischen Logistik ebenfalls der

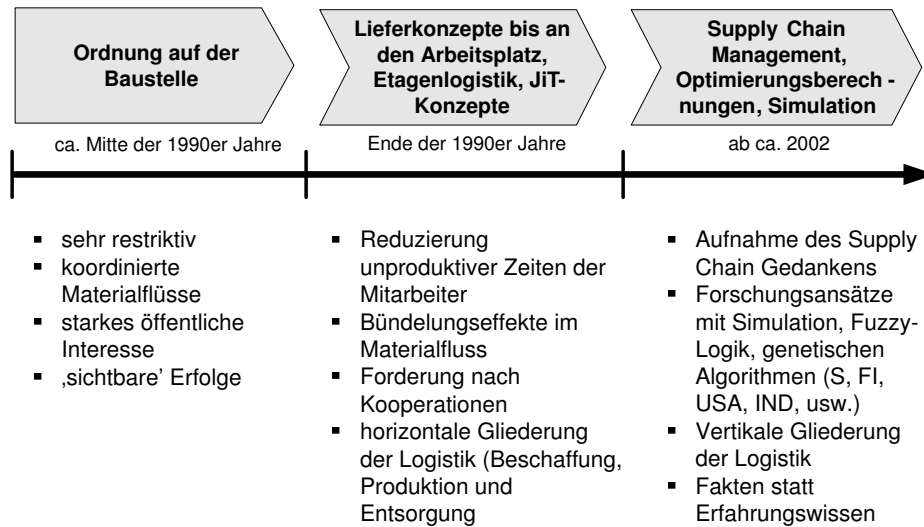


Abbildung 2.3: Die drei Entwicklungsphasen der Baulogistik

Fall war. Da sich der Begriff aber weitgehend etabliert hat, wird der Schwerpunkt auf 'baulogistische' Arbeiten gelegt und durch offensichtlich logistikkaffine Arbeiten ergänzt.

2.2.1 Entwicklungsphase 1 'Ordnung auf der Baustelle'

Die ersten Artikel, in denen Logistik und Bauen in einen Zusammenhang gestellt wurden, stammen im Wesentlichen aus dem Anfang der 1980er Jahren [Kul81], [Ble84] und dann aus den Anfängen der 1990er Jahre [Eng91], [Les94], [Mai95]. Dort wurde der Begriff Logistik im Zusammenhang mit dem Bauwesen eingeführt [Kul81], [Eng91] und auf die materialflusstechnischen Besonderheiten hingewiesen (vgl. Kap. 3.2). Lessmann [Les94] verweist darauf, dass ein Erfolgsfaktor bei Auslandsbaustellen im Gegensatz zu der hohen Versorgungsdichte im Inland immer eine methodische Beschaffung ist. Die praktische Umsetzung der Beschaffung bei Auslandsbaustellen beschreibt Kulick in [Kul81]. Logistik wird zu einer gleichberechtigten Aufgabe im Baubetrieb.

Weiterhin weist Lessmann auf die Notwendigkeit der Entsorgung von Baustellen hin. Ein Grund für die mangelhafte Sensibilität im europäischen Raum sieht Lessmann in der Intransparenz der Logistikkosten. Die Logistik an sich funktioniert durch die hohe Versorgungsdichte. In diesem Sinne gab es Logistik im Baubetrieb schon immer. Es fehlte nur an der durchgehenden Strukturierung der Logistik. Der Anlass für die Auseinandersetzung mit dem Thema Logistik und Bauen liefert zweifelsohne die Bebauung um den Potsdamer Platz und den Spreebogen in Berlin. Schmidt sieht hierin die Ge-

burtsstunde der Baulogistik [Sch03]. Im folgenden Kapitel wird die Situation in Berlin Anfang bis Mitte der 1990er Jahre beschrieben, welche im Gegensatz zu vielen anderen Bauprojekten auch forschungsseitig gut dokumentiert ist.

Großbaustelle Berlin

Die Neugestaltung des Potsdamer Platz und des Spreebogens in Berlin war ein Bauvorhaben (ca. 20 Mrd. DM), welches hohe Anforderungen an die Materialströme der Ver- und Entsorgung stellte. Man muss dabei zwischen dem Bereich Nord und dem Bereich Süd mit dem Potsdamer Platz unterscheiden. Berechnungen eines einzelnen Bauvorhabens haben ergeben, dass ca. 60.000 LKW-Einheiten pro Jahr erforderlich gewesen wären. Für alle Bauvorhaben hätte dies 1.700 LKW-Einheiten/d und damit den Verkehrsinfarkt für den Innenstadtbereich Berlins bedeutet.



Abbildung 2.4: Inselversorgung

Da die beiden Bereiche durch den Grüngürtel Tiergarten getrennt waren, wurden zwei Logistikbereiche eingeführt. Die Baulogistik stützte sich auf zwei Maßnahmen: zum Einen die Nutzung der Verkehrsträger Bahn und Schiff. Zum Anderen wurden die Verkehrsströme über Logistikzentren in der Nähe der Baustellen gebündelt. Für die beiden Verkehrsträger, über die ca. 90 % der Transporte abgewickelt wurden, sprach neben der Umweltfreundlichkeit und Straßenentlastung vor allem die Leistungsfähigkeit. Für den Logistikbereich Süd wurde 1993 die Baustellenlogistik Potsdamer Platz

GmbH (Balog) gegründet [Mai95]. Der Logistikbereich Süd mit der Balog stand seit dem immer mehr im Mittelpunkt des Interesses als der Bereich Nord, obwohl sich die Ver- und Entsorgungsmengen für beide Bereiche ungefähr die Waage halten. Für die Umsetzung des Logistikkonzeptes der Balog wurde eine Basisinfrastruktur erstellt. Eine vom öffentlichen Verkehr abgekoppelte interne Transportstraße war die einzige Verbindung zur Baustelle, so dass eine „Inselversorgung“ [Mai95] entstand.

Die Anforderungen des Logistikkonzeptes an die beteiligten Bauunternehmen waren hoch und wurde streng geregelt. Die Aufgabengebiete umfassten die Entsorgung der Baustellen von Erdaushub, die Herstellung und Liefe-

nung von Transportbeton, die Organisation und Zufuhr von Baustoffen und Hilfsmitteln, die Entsorgung der Bauabfälle, sowie das Grundwassermanagement [Huf97]. Die Baulog musste die Versorgungssicherheit aller Baustellen garantieren. Die Baulog bildete quasi ein Monopol, womit ein Stück Marktwirtschaft verloren ging [Die94]. Die Zufahrtsregelungen waren rigide: Jede Transportgenehmigung für LKW kostenpflichtig, wobei unangemeldete Transporte zurückgewiesen wurden [Dom97]. Man sprach in diesem Zusammenhang auch von Umerziehung der Firmen [Dom97]. Die Dispositionsspielräume der Unternehmen wurden eingeschränkt.

Beim Baulog-Leitstand, der die logistischen Maßnahmen steuerte, wurde ein Visualisierungsverfahren [Ste02] eingesetzt. Es visualisierte die eingesetzten logistischen Ressourcen wie Logistikplätze, Transportwege, Deponien usw., um diese entsprechend dynamisch planen, steuern und kontrollieren zu können. Andererseits diente es als DV-gestütztes Planungs- und Kontrollsystem der Umschlageneinrichtungen und der Transportwege, um deren Kapazitäten zeitnah als Information für die Beteiligten zur Verfügung zu stellen.

Im Logistikbereich Nord wurden Zeitfenster für die Anlieferung von Material eingeführt, was eine Entzerrung und eine bessere Ausnutzung der Baustraßen zu Folge hatte. Die Verweildauer der LKW auf dem Gelände wurde begrenzt und konnte mit einem Satellitenortungssystem kontrolliert werden.

Das Konzept Baulog war erfolgreich, der Verkehrsinfarkt wurde vermieden, die Verkehrsverlagerung erreicht und eine Bündelung der Verkehre hat stattgefunden [Bau97]. Die Bauzeiten wurden im Wesentlichen eingehalten, bzw. das Projekt war überhaupt durchführbar.

Die Frage, ob die ausführenden Unternehmen selbst davon profitiert haben, bleibt z. T. offen [Bau97]. Die Maßnahmen waren restriktiv und haben den freien Wettbewerb teilweise unterdrückt. Die Baulogistik hat zusätzlich ca. 130 Mio. DM gekostet, das sind 1,2 % der Bausumme im Logistikbereich Süd [Mai95]. Ob es durch die restriktiven Maßnahmen nicht auch zu Verzögerungen gekommen ist, ist ebenso offen wie die Auswirkungen der Marktbeschränkung. Dies ist systemimmanent, da ein Vergleich einfach nicht möglich ist.

Zusammenfassend sind die Einzelaspekte der Logistikkonzepte dieser Entwicklungsphase aus Theorie und Praxis dargestellt:

- Methodische Beschaffung für Auslandsbaustellen
- Einrichtung eines Logistikleitstandes
- Abkoppelung des Baugeländes vom öffentlichen Verkehrsraum (Insel-Fahren-Prinzip)

- Zugang nur über die Logistikbereiche
- Ausstellung von Transport- und Sondertransportgenehmigungen
- gestaffeltes Entgeldsystem für alle Zulieferer
- Vorgaben von Anlieferungszeitfenstern
- Kontrolle des LKW-Verkehrs auf dem Baustellengelände via Satellit
- Zeitliche Beschränkungen des LKW-Aufenthaltes auf dem Baustellengelände

Der Zielkonflikt zwischen Qualität, Zeit und Kosten wird immer der Hauptfokus der Unternehmen sein und muss daher auch immer der der Baulogistik sein. Mögliche Verkehrsverlagerungen oder Verkehrsvermeidung sind aus Unternehmenssicht nur Nebenprodukte aus dem Erreichen der Zielkonfliktkomponenten.

Die angewandten Konzepte sind jedoch wegen der Größenordnung und Aufgabenstellung nicht oder nur in Teilen auf andere Baustellen übertragbar. Wenn gleich es eine solch große Baustelle in einem innerstädtischen Ballungsraum die nächsten Jahre und Jahrzehnte höchst wahrscheinlich nicht mehr geben wird, hat diese doch einen wichtigen Impuls gegeben über die Logistik auf dem Bau nachzudenken.

2.2.2 Entwicklungsphase 2 'Koordinierung und horizontale Gliederung der Logistik'

Die zweite Phase beginnt Ende der 1990er Jahre und ist geprägt von tiefergreifenden Logistikkonzepten. Diese Phase ist vergleichsweise kurz, da recht schnell ein umfassenderer Logistikbegriff in der Entwicklungsphase 3 2.2.3 eingeführt wird. Mehrere Studien [Ber83] [Boe02a], [Sch02] belegen die mangelnde Produktivität auf der Baustelle.

Boenert stellt in [Boe02a] das Konzept eines Logistikkoordinators vor, der bei einem Bauvorhaben im Schlüsselfertigbau für die Logistik verantwortlich ist. Dies schließt wie im Baulog-Konzept eine Transportkoordinierung mit Anmeldung und Genehmigung ein (Beschaffung).

Dazu gehören auch das Flächenmanagement und die Klärung der Liefermengenbedarfe. Beim Flächenmanagement wird die Etagenlogistik vorgeschlagen, bei der die Gewerke in den Etagen temporär Zonen erhalten, wo das einzubauende Material in Nähe des Einbauortes lagert. Dazu ist neben den 'Verbauzeiten' eine genaue Kenntnis der Liefermengen notwendig, die nach dem Grundsatz „Verbrauchseinheit = Transporteinheit = Lagereinheit“ zusammengestellt werden sollten (Produktion) [Boe02a].

Im Bereich Abfallmanagement wird ebenfalls eine zentrale Logistik vorgeschlagen [Lip99], die erhebliche Kosteneinsparungen verspricht (Entsorgung). Baustofflieferanten ihrerseits haben ihr Logistikangebot verbessert und liefern nicht nur zur Baustelle, sondern direkt in die Etage oder liefern in der Nacht an. In diesem Zusammenhang wurde ein internetbasiertes Logistik-System für mittelständische Bauunternehmen entwickelt [Mar01]. Ziel war es, das E-Business in der mittelständischen Bauwirtschaft einzuführen und Angebots-, Bestell- und Lieferprozesse durch das Internet zu vereinfachen und zu beschleunigen. Ähnliche Untersuchungen wurden an der TU-Berlin [Ott01] gemacht.

Diese Phase ist geprägt durch die praktische Anwendung jenseits der Megaprojekte wie der Potsdamer Platz und stellt die Logistik als 'natürlichen' Teil der Bauausführung dar. Die Elemente dieser Phase sind zusammengefasst:

- Denken in logistischen Einheiten
- Einsatz eines Logistik-Koordinators
- Einführen von E-Business in der Bauwirtschaft
- Lieferkonzepte bis zum Einbauort
- Etagenlogistik
- zentrale Entsorgungslogistik

2.2.3 Entwicklungsphase 3 'Wertschöpfungsdenken, Logistikplanungsinstrumente'

Anfang der 2000er Jahre wurde der Begriff *Baulogistik* in der Forschung stärker gefüllt und es folgten einige Dissertationen zu dem Thema mit unterschiedlichen Schwerpunkten. Unternehmensübergreifende Kooperationen rückten in den Fokus und die Managementebene (vgl. Abb. 2.1) wurde stärker betont, wobei die Integration der Logistik in die Planung ein Schritt in diese Richtung ist.

Einen ganzheitlichen Ansatz beschreibt Grote [Gro02]. Für die Organisation und Steuerung einer Baumaßnahme schlägt er die Nutzung der Kybernetik vor („KOPF“). Die steigende Komplexität heutiger Bauvorhaben steht im Vordergrund der Betrachtungen. Weiterhin wird auf einen Mangel in den Leistungsbeschreibungen hingewiesen. Die Positionen sind nicht nach der Reihenfolge der Bearbeitung sortiert. Ebenso wird nicht nach dem Ort der Leistungserbringung unterschieden, d. h. es wird nicht unterschieden, ob eine Leistung im Keller oder im 10. Stock erbracht wird, sofern es sich um die gleiche Position im Leistungsverzeichnis handelt. Die Arbeitsstunden für

die einzelnen Positionen und damit ein Teil der Kosten wird damit pauschal ermittelt. Als neuer Ansatz wurden die Leistungspositionen nach Arbeitspaketen neu sortiert und zwar nach der Reihenfolge der Bearbeitung. Die Gesamtmaßnahme wurde in Arbeitsflächen von ca. 300 m² eingeteilt, so dass anteilig die Positionen diesen Arbeitsflächen zugeordnet werden konnten. Neben einer vereinfachten Abschlagsrechnungsstellung über die Arbeitspakete, sollte die Kontrolle der Produktivität und die Just-in-Time Lieferung der Baustoffe ermöglicht werden. Die Kontrolle der Produktivität erfolgt über den Soll-Ist-Vergleich der Arbeitsstunden für jedes Arbeitspaket. Die Just-in-Time Lieferung bezieht sich ebenfalls auf diese Arbeitspakete.

In [Lei03] weist Leinz auf die Vorteile einer strategischen Beschaffung in der Bauindustrie hin und stellt „Strategien hinsichtlich der Logistik“ vor (vgl. auch [Jac00]). In einem morphologischen Kasten (vgl. Abb. 2.5) sind die Strategiealternativen der Beschaffung zusammengestellt.

Merkmal	Ausprägung				
Umfang	Produkt	Sortiment	Gewerk	Baustelle	
Koordination	keine (Dezentral)	Zulieferer	Bauunternehmen	externe Stelle	
Bereitstellung	frei Haus		frei Zwischenlager	ab Werk	
Raumüberbrückung	Straße	Schiene	Schiff	Luft	Kombiniert
Zeitüberbrückung	Lieferantenlager	Pufferlager	Baustellenlager	Just-in-Time	
Steuerung	Push			Pull	
Kommunikation	Konventionell		EDI	Internet/Extranet	

Abbildung 2.5: Strategiealternativen hinsichtlich der Logistik nach [Lei03]

Kalkühler führt in seiner Arbeit [Kal03] eine ABC-Analyse über die Gewerke im schlüsselfertigen Hochbau durch, um die Kostentreiber einer Baumaßnahme zu ermitteln. Im Anschluss macht er, ähnlich wie Leinz, Vorschläge, welche Beschaffungsprozesse sich jeweils für die A-, B- und C-Kategorien eignen und wie hoch das Verbesserungspotenzial der einzelnen Prozess-Schritte ist. Im Weiteren weist er darauf hin, wie die Kosten für Nachträge gesenkt werden können.

Schmidt greift in seiner Arbeit [Sch03] den Supply Chain Management - Gedanken (=SCM) der stationären Industrie auf und entwirft ein dem Bauwesen angepasstes SCM System. Er entwickelt eine sogenannte „Projekt Supply Chain“, um dem Projektcharakter des Bauwesens abzubilden. Basis für Verbesserungen in dieser Projekt Supply Chain sieht Schmidt in der von Goldratt entwickelten Theorie der Engpässe. Schmidt fordert für folgende Elemente im Bauwesen den Aufbau von Supply Chains:

- Baukonstruktion,

- Baugeräte,
- Baustoffe,
- Bauausführung,
- Baustoffentsorgung.

Wie in Kapitel 2.1 erläutert stellt die unternehmensübergreifende Logistik wie der Supply Chain Management Ansatz die z. Z. höchste Form der Logistikentwicklung dar, bei der die Verringerung der Gesamtkosten im Mittelpunkt stehen sollte, nicht die Reduktion der Einzelkosten. Die sehr plakative Darstellung der Äußerungen von Praktikern in [Sch03] deutet an, dass es bis zur tatsächlichen Umsetzung solcher Ansätze noch weit hin ist.

Krauß entwickelt in ihrer Arbeit [Kra05] ein Modell zur systematischen Planung von Logistikprozessen auf Baustellen in der schlüsselfertigen Ausführung im Hochbau, da es an „Methoden und Instrumenten [fehlt], um die Baulogistik bereits in die Planung und Vorbereitung eines Bauprojekts zu integrieren[...]“ [Kra05]. Dies sei notwendige Voraussetzung für die Steuerung und Kontrolle der Prozesse in der Ausführungsphase. Krauß unterscheidet in ihrem Ansatz Fertigungs- und Logistikprozesse, deren Abhängigkeiten im „Verlauf der Bauzeit nur unzureichend“ berücksichtigt werden. Ihr Modell stellt die Fertigungs- und Logistikprozesse so in Beziehung, dass die Fertigungsprozesse von den Logistikprozessen unterstützt werden und die erforderlichen Ressourcen erhalten. Das Modell besitzt für folgende Punkte Eingabemasken:

- allgemeine Projektdaten,
- Flächenmodell,
- Materialflussmittel,
- Infrastrukturflächen,
- Fertigungsprozesse,
- Ver- und Gebrauchsressourcen,
- Versorgungsprofile,
- Ablaufpläne.

Das Modell berechnet auf Grund der Eingabedaten die Dauern und Anfangs- sowie Endzeitpunkte der Logistikprozesse, sowie die Kapazitätsauslastungen der Ressourcen, wobei Konflikte geprüft und durch den Anwender behoben werden können.

Die Entwicklung der I & K-Technologie ist für die Baulogistik ebenfalls von Bedeutung. In einer Reihe von Forschungsvorhaben (s. z. B. [Men03] oder [NNe05]) wurde untersucht, in wie weit mobile Kleincomputer Prozesse auf der Baustelle unterstützen können. Die Einsatzmöglichkeiten sind dabei vielfältig, angefangen von elektronischen Stundenzetteln über Abnahmeunterstützungen bis hin zum elektronischen Lieferschein. Aktuell wird der Einsatz von RFID-Technologie im Bau untersucht. Diese Informationen, die elektronisch verfügbar sind, könnten ebenfalls in einer Simulation genutzt werden.

Arbeiten, die keinen unmittelbaren logistischen Hintergrund haben, aber für diese Arbeit wichtig sind, werden im Folgenden erwähnt. Töpfer stellt in ihrer Arbeit [Töp01] Grundlagen für eine manuelle und rechnergestützte Baustelleneinrichtungsplanung vor, während Böttcher [Böt94] auf die rechnergestützte Arbeitsvorbereitung eingeht. Ebenfalls mit der Layoutplanung von Baustellen beschäftigt sich die Arbeit von Lennerts [Len96]. Die genannten Arbeiten befassen sich u. a. mit der Frage der optimalen Standorte der Krane auf Baustellen. Dieser Punkt wirkt sich auf die Produktivität bzw. die Kosten aus.

In der internationalen Forschung haben Untersuchungen im Bauwesen zu den Themen Supply Chain Management, Lean Production und damit implizit Logistik auf Baustellen bereits viel früher eingesetzt. Koskela beschreibt bereits 1992 in [Kos92] die Möglichkeiten einer Übertragung des Lean Production¹ Gedankens auf die Bauindustrie. Wenngleich die Logistik nicht explizit genannt ist, rücken dennoch die „non value-adding activities“ und die „flow processes“ in den Mittelpunkt der Betrachtungen. Es gibt noch eine Reihe weiterer Arbeiten aus den USA und den skandinavischen Ländern, die sich zunehmend mit Supply Chain Management in Construction (z. B. [OBr99]), oder Just-in-Time Strategien [Ber97] beschäftigen. Auch in diesen Arbeiten wird auf die Notwendigkeit der Reduzierung interner Materialbewegungen hingewiesen. Bei der Analyse der Supply Chain [Vri99] im Bauwesen wurde mangelnde Zusammenarbeit zwischen den Gewerken festgestellt. Zudem lag die Ursache für Verschwendungen und Problemen meist nicht in der Stufe, in der sie auftreten, sondern in einer ihr vorgelagerten und häufig auf einer höheren Organisationsebene. Die Ergebnisse machen deutlich, dass eine möglichst umfassende Betrachtung der Prozesse notwendig ist.

Die Diskussionen und Untersuchungen im Forschungsbereich bezüglich der Baulogistik finden zunehmend in den Hand- und Lehrbüchern für den Baubetrieb ihren Eingang ([Mey05], [Gir06], [Hof07]).

¹In anderen Arbeiten wird von „Lean Construction“ [How99], bzw. von „Construction Supply Chain“ [OBr99] gesprochen

2.3 Simulation von Prozessen auf Baustellen

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den Stand der Forschung bezüglich der Simulation von Bau- und Logistikprozessen auf Baustellen. Es erfolgt wobei zunächst eine Bestandsaufnahme der Forschung im englischsprachigen Ausland. Die im Anschluss aufgeführten späteren Arbeiten aus dem deutschsprachigen Raum unterstreichen die Anwendungsbreite von Simulation als Methode im Bauwesen.

Simulationen werden dann eingesetzt, wenn ein System zwar modelliert, aber die Fragestellung nicht analytisch gelöst werden kann. Die Einordnung und Abgrenzung zu anderen Verfahren geht aus Abbildung 2.6 hervor.

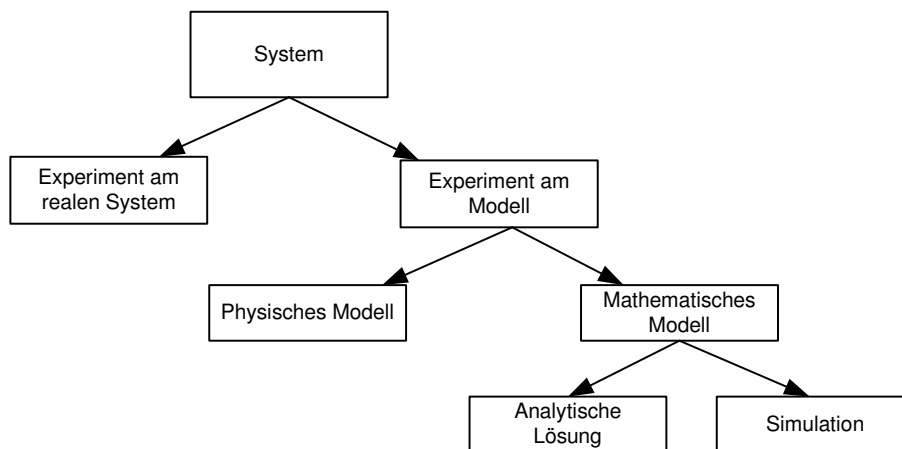


Abbildung 2.6: Einordnung der Simulation nach DIN 19226 Teil 1

Simulationen von Bauprozessen gehen nach [Hal99] auf die 1960er Jahre zurück. Das bekannteste Simulationswerkzeug im internationalen Raum für das Bauwesen ist CYCLONE, das bereits 1973 von Halpin entwickelt wurde [Hal92]. Dieses bildet die Grundlage für eine Reihe von Weiterentwicklungen in diesem Gebiet. CYCLONE zeichnete sich durch die grafische Unterstützung und die Einfachheit der Modellierung aus, die allerdings wiederum die Anwendung bei komplexen Prozessen einschränkte.

Es folgten Werkzeuge wie INSIDE, RESQUE, UMCYCLONE, CIPROS, STROBOSCOPE usw. (aufgeführt nach [Cha04]), die sich unter anderem dadurch hervortaten, dass der Funktionsumfang größer wurde und die Möglichkeiten der freien Programmierung implementiert wurden.

Diese Programme aber auch andere Programme wie ABC [Hon01] oder [Ram01] haben Erdbauprozesse, bzw. allgemeiner die Fertigungsprozesse im Fokus. Dies liegt an dem hohen Maß an Erfahrungswissen, das für die Entscheidungsfindung erforderlich ist [Cha04]. Erdbauprozesse sind sehr maschinell

inen- und damit kostenintensiv, was den Einsatz der Simulationstechnik rechtfertigt [Cha06].

Tawfik und Fernando beschreiben in [Taw01] das EU-Projekt DIVERCITY. Das Analyse-Tool als Simulation besteht aus drei Komponenten, einer Sicherheitskomponente, einer Flächenkomponente und einer Optimierungskomponente. Die Planung von Baustellen in Bezug auf Sicherheit und Fläche zu optimieren war Ziel der Arbeit. Auch hier wird darauf hingewiesen, dass die Planung im Allgemeinen auf Erfahrung und Intuition der Planer basiert. Der Schwerpunkt liegt auf der Organisation temporärer Ressourcen, wie Büro-Container, Lagerflächen usw. Die Minimierung der Wege zwischen den temporären Ressourcen unter Berücksichtigung von Gefahrenzonen erfolgt mittels Simulation auf Basis genetischer Algorithmen. Die Minimierung der Wege auf Baustellen reduziert die Handlingskosten und ist somit ein wichtiger Beitrag zur Logistik.

In [Abo99] wird darauf hingewiesen, dass das Hauptproblem der Simulation von Bauprozessen die Größe und die Komplexität sind, weshalb sie in der akademischen Welt (in den USA) wegen ihrer Vorteile zwar weite Verbreitung findet, aber in der Praxis noch wenig im Einsatz ist [Hal99]. Der Schwerpunkt der Entwicklungen sollte deshalb auf die einfache Handhabung des Simulationstools liegen. In der gleichen Arbeit liefert Halpin einige Beispiele umgesetzter Praxisbeispiele mit Hinweisen auf die Einsparungen an Kosten oder Zeit. Auch in [Hon01] stehen die Einfachheit und die Anschaulichkeit der Simulation im Mittelpunkt.

Schopach [Scho02] stellt im Rahmen seiner Dissertation einen Lösungsansatz mittels Petri-Netzen vor. Diese netzbasierte Simulation beschreibt den Transport und den Einbau von Betonfertigteilen. Ein allgemeines Modell zu entwickeln, dass mittels Parametrierung auf beliebige Fertigteilbaustellen anwendbar ist, ist die Grundidee bei diesem Verfahren. Die Simulation besteht aus den Elementen Kran, Transport-Lkw, Entladeplatz und Kolonnenanzahl. Zielgrößen sind die Krananzahl, die Kranstandorte, sowie die Kranwahl und die Anzahl der Lkw in Abhängigkeit zur Entfernung des Fertigteilwerkes.

Der Ansatz von Chahrour in [Cha06] basiert ebenfalls auf Petrinetzen, wobei diese allerdings mit CAD-Systemen kombiniert werden. Es entsteht ein Simulator, der über das CAD-Layout parametrisiert ein Baustellenmodell generiert. Das Petrinetz, das das stochastische und dynamische Verhalten des Systems abbildet, wird über eine Schnittstelle in AutoCAD integriert und wird dort initialisiert. Das Modell bietet sowohl die Prozess- als auch die Projektsimulation an, wobei auf Prozessebene realitätsnahe Einsätze von Baggern und Lkw abgebildet werden. Die Projektsicht bietet die Gegenüberstellung von Massenverteilungsvarianten auf Basis der abgebildeten Logistikprozesse an.

In der CAD wurde ein anderer Weg beschritten. Sogenannte 4D-Modelle verknüpfen 3D CAD-Daten mit der 'vierten' Komponente Zeit. Damit können Baufortschritte zu jedem beliebigen Zeitpunkt simuliert, oder besser visualisiert [Cla02] werden, da von einer Simulation gesprochen wird, wenn die Zeitkomponente nicht statisch ist, sondern z. B. aus Netzplantechniken generiert werden. Letzteres wird in einigen Arbeiten vorgestellt [Kan04]. Verbindungen zwischen den 3D Elementen und den Vorgängen aus Projektplanungsprogrammen lassen sich über eine Schnittstelle (vgl. Kap. 5) realisieren. Der große Vorteil der Methode ist die Anschaulichkeit durch Visualisierung, die z. B. in der Bauüberwachung zum Tragen kommt. Echtzeitbilder (von Web-cams) der Baustelle werden den 4D Bildern gegenübergestellt und verglichen, wodurch zeitliche Differenzen sehr leicht zu erkennen sind. Trotz der genannten Vorteile ziehen Kang, Lee und Kwak in [Kan04] ein kritisches Fazit bezüglich des Nutzens für das Baumanagement. Die Analyse-Funktionen seien noch nicht ausreichend. Daher benötige man ein „integriertes“ 4D System, was eine „direkte Verknüpfung“ von Netzplantechnik und 3D Informationen zulasse.

Kapitel 3

Systemanalyse Baustelle

Die *Systemanalyse Baustelle* arbeitet die Besonderheiten des Bauwesens gegenüber der stationären Industrie heraus und setzt diese in Beziehung. Davon ausgehend werden Logistikstrategien abgeleitet und ausgearbeitet. Ziel dieses Kapitels ist es, das Potenzial der prozessorientierten Betrachtungsweise unter Berücksichtigung der branchenspezifischen Eigenheiten für das Bauwesen aufzuzeigen.

3.1 System Baustelle

Die Baustelle als Produktionsort im Bauwesen und die damit verbundenen Randbedingungen lassen sich nach [Bau92] durch die folgenden Merkmale charakterisieren. Diese werden in den folgenden Kapiteln näher erläutert.

- Die Produktionsstätte ist temporär.
- Die zu errichtenden Bauobjekte sind standortgebunden.
- Sie weisen einen Unikatcharakter (Einzelfertigung) auf.
- Die Organisationsform ist projektartig.
- Es existieren vergleichsweise 'viele' Produktionsstätten.
- Eine Baumaßnahme wird in spezialisierte Gewerke gegliedert.
- Durch den Projektcharakter ist die Datenlage eingeschränkt.

3.2 Unterschiede zur stationären Industrie

Die Automobilindustrie, als innovative, stationäre Industrie, wird häufig als Vorbild für die Bauindustrie herangezogen [Bar03]. In den USA und in Deutschland gibt es Ansätze, den ‚Lean Production‘-Gedanken der japanischen Automobilindustrie auf den Bau zu übertragen [Bal00], [Oll03]. Das Konzept, Kosten zu reduzieren und gleichzeitig die Qualität zu erhöhen, ist ein für die deutsche Bauwirtschaft erforderlicher Ansatz [Mor06]. In Deutschland wird im europäischen Vergleich „zu teuer gebaut“, was Blecken u. a. auf die derzeitigen Wettbewerbsmodelle zurückführt[Ble01]. Er sieht in Partneringansätzen, wie sie in anderen Industrien erfolgreich eingesetzt werden, ein hohes Kostensenkungspotential. Im Folgenden werden Eigenheiten des Bauwesens erläutert, die beachtet werden müssen, wenn Konzepte aus anderen Branchen auf das Bauen übertragen werden sollen.

3.2.1 Temporärer Standort

Aufgrund des temporären Standorts muss sich der Baubetrieb stets auf neue, teils unbekannte Standortbedingungen einlassen, die zu Störfaktoren für die Produktion werden können:

- Baugrund und Witterungsverhältnisse,
- vorgegebene Platzverhältnisse für die Baustelleneinrichtung,
- vorhandene Infrastruktur im unmittelbarer Umgebung,
- evtl. öffentliches Interesse am Standort (Umweltbeeinträchtigung)
- öffentlich-rechtliche Rahmenbedingungen

Ein temporärer Standort führt außerdem zu einem ‚Wegeproblem‘. Wie aus Abbildung 3.1 ersichtlich ändern sich die Wege für die Zulieferer bei einer neuen Baustelle.

Teilweise werden Baustellen nur ein einziges Mal angefahren. Touren müssen neu disponiert werden, Fahrer sich auf neue Strecken einstellen.

3.2.2 Unikatcharakter und Größe der Objekte

Bauwerke werden individuell unter Berücksichtigung der Umgebung ein einziges Mal geplant und gebaut. Bei Erstellung mehrerer gleichartiger Gebäude (z. B. Reihenhäuser) werden die individuellen Wünsche der Bauherren berücksichtigt. Der Unikatcharakter lässt sich am ehesten mit dem Prototypenbau der stationären Industrie vergleichen, allerdings müssen bis zur Serienfertigung eine Reihe gleichartiger Prototypen gebaut werden, so dass

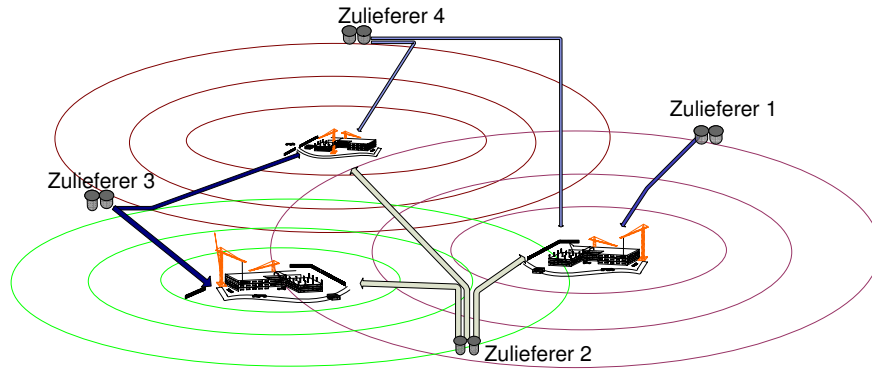


Abbildung 3.1: Wegeproblem

sich ein Wiederholungseffekt einstellt. Hinzu kommt, dass es sich um Projektarbeit [Hal92] handelt, bei dem häufig die Beteiligten für jedes Vorhaben neu zusammengestellt werden, so dass sich selten langfristige Kunden-Lieferantenbeziehungen (s. Kap. 3.2.3) bilden können. Der Unikatcharakter und die kurzfristigen Beziehungen führen neben den bereits erwähnten Standortbedingungen (s. Kap. 3.2.1) dazu, dass auf Baustellen häufig improvisiert [Kam94] wird.

Der Unikatcharakter bedeutet nicht, dass sich die Prozesse oder die Bauverfahren bei neuen Vorhaben grundlegend verändern [Ram01]. Im Gegenteil, viele Prozesse des Bauwesens sind in sich wiederkehrende Prozesse, die sich teilweise gut für die Simulation eignen [Hal99].

Die Größe des zu erstellenden Objekts ist ebenfalls von Bedeutung. Ein Bauwerk ist um ein vielfaches größer als typische Produkte¹ der stationären Industrie.

In der stationären Industrie fließen die Objekte durch die Produktion und werden an jeder Station verändert (*Serienfertigung*). Charakterisiert wird dies dort durch den Begriff *Durchlaufzeiten* der Objekte durch die Produktion. Die Serienfertigung wird vom Bauwesen nach [Bau92] durch die *Taktfertigung* 'imitiert'. Im Bauwesen spricht man von *Taktzeiten*, in denen beispielsweise bestimmte ähnliche Bauabschnitte gefertigt werden.

In Abbildung 3.2 sind die Arbeitsgruppen so getaktet, dass die Arbeitsleistung für jeden Abschnitt gleich ist. So kommt es nicht zu gegenseitigen Behinderungen.

Die zweite Arbeitsgruppe kann unmittelbar mit ihrer Arbeit im ersten räumlichen Abschnitt beginnen, sobald die erste Gruppe in den zweiten Abschnitt wechselt. Sind die Arbeitsleistungen unterschiedlich (unterschiedliche Stei-

¹Eine Ausnahme bilden sicherlich 'Produkte' wie Schiffe [Ste06] oder Flugzeuge, die ähnliche Größenordnungen aufweisen. Hier gibt es Anknüpfungspunkte zur Baulogistik.

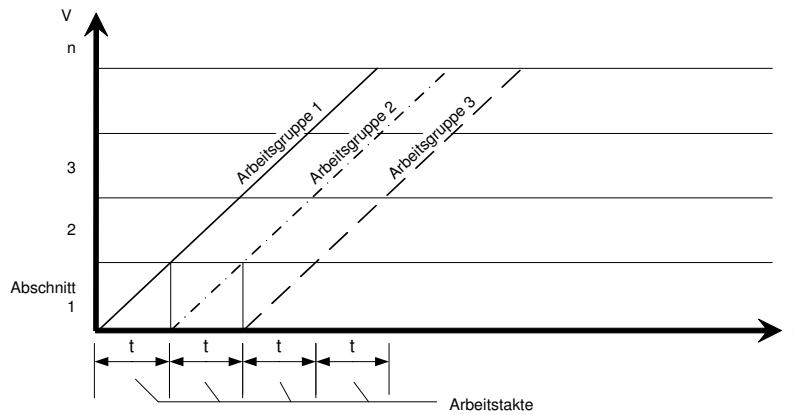


Abbildung 3.2: Taktfertigung

gungen) kommt es zu räumlichen Konflikten, oder zu nicht ausgelasteten Abschnitten (zeitliche Verschwendung).

Ein Gebäude 'wächst', womit sich Größe und Gestalt ändern. Funktionsflächen und Verkehrswege passen sich den Veränderungen an. Nicht das Produkt fließt an den Arbeitsstationen entlang, sondern die 'Arbeitsplätze' bewegen sich am entstehenden Objekt entlang [Bau92]. Der Materialfluss folgt den Arbeitsplätzen, der Ort der Senke ändert sich folglich mit der Bewegung der Arbeitsplätze.

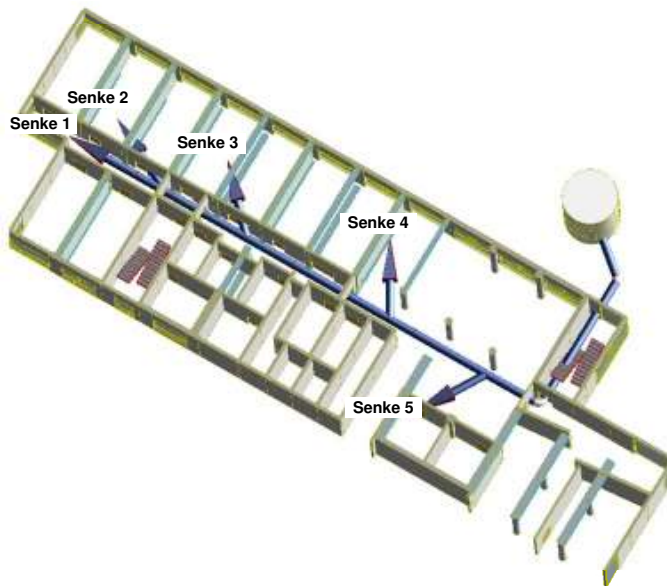


Abbildung 3.3: Materialfluss im Hochbau

Krauß schlägt hierzu in [Kra05] ein „Flächenmodell“ vor, um die Funktionsflächen räumlich zuzuordnen. Damit lassen sich nicht nur Flächen innerhalb von Gebäuden, ähnlich wie Mietflächen im Facility Management, verwalten, sondern auch Freiflächen der Baustelleneinrichtung.

Abbildung 3.3 veranschaulicht den Materialfluss innerhalb eines Gebäudes. Es wird deutlich, dass das Material im Gebäude verteilt wird und für eine Materialart die lokale Senke nur einmal vorhanden ist. Für die Berechnung der Materialflüsse muss man die Wege kennen, über die das Material transportiert wird, da der Zeitverbrauch und damit die Kosten pro Ressource abhängig von der zurückgelegten Strecke ist.

In Produktionsanlagen werden häufig Quelle-Senke Matrizen aufgestellt, in denen die jeweilige Entfernung zwischen einer Quelle und einer Senke eingetragen wird, sofern eine Transportbeziehung existiert. Multipliziert man die Entfernung mit dem Aufkommen eines Bezugszeitraums der Quelle-Senke Relation, erhält man die Transportleistung. Mit Hilfe von Sankey-Diagrammen werden Materialströme innerhalb einer Produktionsanlage visualisiert. Für das Bauwesen wäre ein solches Vorgehen selbst bei einer starken Vergrößerung immer noch zu aufwändig. Die Einmaligkeit des Bauwerks

[Anzahl Behälter/Schicht]	Senke																								
	Konsignationslager (1)	Spallanlage (2)	Collager (3)	Sperrlager (4)	Presse (5)	LKW-Entladung (6)	Werkzeuginlager (7)	Lager neu (8)	Leergutlager (außen) (9)	Magazin (10)	Schrottplatz (11)	Presswerk-Übergabepunkt (12)	Presswerk-Halle 1 (13)	Presswerk-Halle 2 (14)	Schweißerei allg. (15)	Schweißerei-Aufhängep. (16)	Schweißerei-Aufhängepunkt 2 (17)	TKM-Übergabepunkt (18)	TKM allg. (19)	i-Punkt 11 (20)	Lager allg. (21)	Lager-LKW-Be- und Entladung (22)	i-Punkt 12 (23)	JIT-Lager allg. (24)	JIT-Lager-LKW-Be- und Entladung (25)
Quelle																									
Konsignationslager (1)																									
Spallanlage (2)																									
Collager (3)																									
Sperrlager (4)																									
Presse (5)																									
LKW-Entladung (6)																									
Werkzeuginlager (7)																									
Lager neu (8)																									
Leergutlager (außen) (9)																									
Magazin (10)																									
Schrottplatz (11)																									
Presswerk-Übergabepunkt (12)																									
Presswerk-Halle 1 (13)																									
Presswerk-Halle 2 (14)																									
Schweißerei allg. (15)																									
Schweißerei-Aufhängep. (16)																									
Schweißerei-Aufhängepunkt 2 (17)																									
TKM-Übergabepunkt (18)																									
TKM allg. (19)																									
i-Punkt 11 (20)																									
Lager allg. (21)																									
Lager-LKW-Be- und Entladung (22)																									
i-Punkt 12 (23)																									
JIT-Lager allg. (24)																									
JIT-Lager-LKW-Be- und Entladung (25)																									
Summe																									

Abbildung 3.4: Beispiel für eine Quelle-Senke-Matrix

würde eine solche Maßnahme kaum rechtfertigen. Mit der Dynamik der Wege wird ein weiteres Kennzeichen des Bauwesens deutlich: Die Veränderungen des Bauwerks an sich führen zu Verlagerungen der Funktions- und der Verkehrsflächen, was zusätzlich zu Umstellungen der Materialflüsse führt.

Girmscheid nennt den Projektcharakter sowohl innovationshemmend als auch innovationsauslösend [Gir03], da prinzipiell jede Form der Projektarbeit einen hohen Grad an Kreativität zulässt. Allerdings werden die für ein Pro-

jekt entwickelten Innovationen nicht für weitere Projekte genutzt. Das sieht Girmscheid als einen der „Hauptgründe“ für die unterdurchschnittliche Innovationsrate in der Bauwirtschaft.

3.2.3 Kunden-Lieferanten Beziehungen

Während bei der Automobilindustrie 'viele' Zulieferer 'wenige' Hersteller² beliefern, stehen 'viele' Zulieferer 'vielen' Baustellen gegenüber. Ein Beispiel aus dem Wohnungsbau zeigt, dass allein die Anzahl der Baugenehmigungen für Wohnungen sich im Jahre 2005 auf über 240 000 ([NNa05]) belief. Selbst unter der Annahme, dass mehrere Wohnungen zu einem Bauvorhaben gehören, wird der Unterschied deutlich. Hierbei sind als Zulieferer nicht nur die Baustoffhändler, sondern auch die Subunternehmer gemeint, die bei den Großunternehmen bereits 46 % der Tätigkeiten [NNb05] auf der Baustelle übernehmen. Der Anteil an Nachunternehmerleistungen nimmt u. a. durch die Entwicklung des Schlüsselfertigbaus auch international zu (vgl. [Kra05], Abb. 3.5 und [Vri99]). Anfangen von Architektur- und Ingenieurleistun-

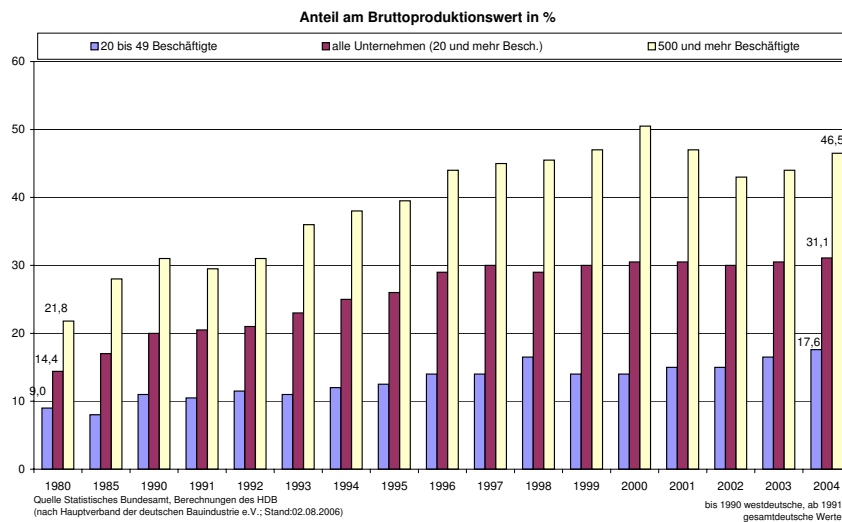


Abbildung 3.5: Kosten für Subunternehmertätigkeiten im Bauhauptgewerbe

gen bis hin zur Erbringung von Bauleistungen für einzelne Gewerke, die z. T. noch in mehrere Teilaufträge gesplittet sind, werden durch Subunternehmer durchgeführt. Die Vergabe erfolgt auch im Ausland [Vri99] meist an den günstigsten Anbieter [Kra05], teilweise ungeachtet dessen Qualifikation. In der Automobilindustrie wurde zwar auch Outsourcing betrieben, jedoch wurde einerseits die Anzahl der Zulieferer reduziert [Wom92], andererseits

²(5 OEM (Original Equipment Manufacturer) mit ca. 30 Standorten in Deutschland [NNe05])

sind die Zusammenarbeiten allein wegen der relativ hohen Investitionen auf Seiten der Zulieferer längerfristig. Zum Aufbau von Strukturen, die nicht nur Einzelergebnisse, sondern Gesamtergebnisse verbessern, sind aber längerfristige Zusammenarbeiten notwendig [Ble01]. Dafür ist ein Vertrauensaufbau notwendig, aber auch Investitionen, die auf diese Zusammenarbeit zugeschnitten sind. Dies und der schon erwähnte hohe Anteil an Kleinunternehmen im Baubereich führen dazu, dass sich nur schwer Standards aufstellen lassen. Für den Bereich des Informationsaustausches wären Standards aber dringend notwendig. Der Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien (I&K), angefangen von der vernetzten Planung über internetbasierte Projektsteuerung bis hin zur Sendungsverfolgung von Baumaterial auf der Baustelle, sind im Bauwesen noch stark unterentwickelt und müssen weiter ausgebaut werden.

3.2.4 Gewerkesystematik und Auftragsvergabe

Ein weiterer Unterschied zur stationären Industrie besteht darin, dass eine Baumassnahme traditionell in Gewerke gegliedert wird. Kostendruck und Materialentwicklungen haben zu einer immer stärker werdenden Spezialisierung und damit zu einer Vermehrung der Gewerke auf Baustellen geführt. Während es 1950 fünf Gewerke gab [Gro02], sind es heute schon über sechzehn. Zur einheitlichen und erschöpfenden Beschreibung von Bauleistungen für Ausschreibungen wurde 1965 vom Gemeinschaftsausschuss Elektronik im Bauwesen (GAEB) das Standard-Leistungsbuch (StLB) entwickelt. Ziel dabei war es, neben dem Finden einheitlicher Begriffsbestimmungen für Ausschreibung, Angebot und Abrechnung auch den Datenaustausch mit Hilfe der elektronischen Datenverarbeitung zu ermöglichen. Insbesondere bei Ausschreibungen gleichartiger Bauwerke wiederholt sich ein Großteil der Teilleistungen, allerdings teilweise in unterschiedlichen Kombinationen.

Das seit 1. Oktober 1996 von GAEB und DIN eingeführte StLB-Bau ist der offizielle Nachfolger des StLB. Das StLB-Bau arbeitet auf der Basis von Textteilen, die sich in einem Dialogsystem zu ganzen Ausschreibungstexten zusammensetzen lassen [Man04] und somit das Erstellen von individuellen und dynamischen Texten ermöglichen. Es ist in 75 Leistungsbereiche untergliedert, die relativ allgemein die enthaltenen Leistungen kategorisieren. Innerhalb der Bereiche werden die einzelnen Leistungen speziell beschrieben. Beispiele für die Bereiche sind:

- 000 Sicherheitseinrichtungen, Baustelleneinrichtungen,
- 001 Gerüstarbeiten,
- 002 Erdarbeiten,

- 003 Landschaftsbauarbeiten, usw.

Weiterhin werden die 75 Bereiche in 14 Leistungspakete nach übergeordneten Baukategorien zusammengefasst. In das Paket Rohbau werden beispielsweise alle diesen Bauabschnitt betreffenden Leistungsbereiche eingeordnet:

- 000 Sicherheitseinrichtungen, Baustelleneinrichtung,
- 001 Gerüstarbeiten,
- 002 Erdarbeiten,
- 012 Mauerarbeiten, usw.

Mehrfachzuordnungen sind durchaus möglich, da z. B. die Baustelleneinrichtung in jedem Bauabschnitt auszuführen ist. Die Art und Weise der Systematisierung zeigt, dass Bauprojekte insgesamt in viele kleine Teile aufgegliedert werden. Traditionell wurden diese einzelnen Gewerke durch mehrere Unternehmen ausgeführt. Derzeit geht der Trend zur Bauausführung durch Generalunternehmer (=GU), da die Bauherren dann nur einen Ansprechpartner haben [Scho00]. Vom Ursprung her ist der Generalunternehmer meist ein Bauunternehmen, das die Rohbauarbeiten selbst ausführt und im Ausbau auf Nachunternehmen zurückgreift. Allerdings führte die vorhandene Vergabepraxis dazu, auch die Rohbauleistungen Subunternehmen zu übertragen, so dass der Generalunternehmer in diesem Fall nur als „Organisator“ und „Koordinator“ agiert [Sch03]. Die Subunternehmen haben nach VOB/B u. a. das Recht, die Materialdisposition eigenständig durchzuführen, wodurch eine Vielzahl an einzelnen unkoordinierten Materialströmen entsteht.

Der Auftraggeber hat vor und während des Baus starken Einfluss auf Konstruktion, Baustoffe und Bauablauf. Die Praxis zeigt, dass häufig Änderungen während des Bauablaufs veranlasst werden, was nach VOB/B §1/3 auch das Recht des Auftraggebers ist (nach [Bau92]). Änderungen werden beispielsweise bei Ortbetonbauweisen bis zum Betonierzeitpunkt durchgeführt. Dabei geht man davon aus, dass dies keine Mehrkosten verursacht [Ols77]. Änderungen werden aber auch durch Prüfeningenieure veranlasst, die in Vertretung der Baubehörden die Sicherheit der Konstruktion prüfen. Hier soll nicht in Frage gestellt werden, ob diese Änderungen notwendig sind. Wichtig ist an dieser Stelle nur festzuhalten, dass die daraus entstehenden Kosten mit zunehmendem Projektfortschritt steigen [Lun84]. Der Kostendruck führt zudem zu einer erzwungenen Verkürzung des Planungszeitraums, was in der Regel zu einer späten bis hin zur baubegleitenden Ausführungsplanung führt.

Ein weiteres Problem besteht in der Auftragsvergabe. Die Gebäudeentwürfe sind zum großen Teil nicht fertigungsgerecht, weil zum Zeitpunkt des Entwurfs der ausführende Unternehmer noch nicht feststeht oder das zur Anwendung kommende Bauverfahren [Kra05]. In der Regel kommt das Bauverfahren zum Einsatz, welches dem Bauunternehmen zum Zeitpunkt der Arbeitsvorbereitung am günstigsten erscheint, wobei die Auslastung der eigenen Ressourcen berücksichtigt werden. Girmscheid spricht von „Synergiebarrieren“ [Gir03], die zwischen Entwurfs-, Ausführungsplanung, Ausführung und Nutzung bestehen. Gerade im Fertigteilbau sind Umplanungen schwierig zu managen, da der Vorteil der stationären Fertigung durch Nachbearbeitungen auf der Baustelle zunichte gemacht wird. Der Fertigteilbau versucht dem durch ein integratives und interaktives Planungskonzept zu begegnen [Nit02]. Das Denken in Prozessen und in großen Zusammenhängen wird im Bauwesen nach [Gir03] durch die traditionelle Projektabwicklungsformen behindert. Die temporär und zu unterschiedlichen Zeitpunkten in ein Bauprojekt eingebundenen Akteure orientieren sich eher an den eigenen Zielen als an den Gesamtzielen. Hier müssen neue Vertrags- und Zusammenarbeitsformen [Gir03], [Eic98] erarbeitet und in die Praxis umgesetzt werden.

3.2.5 Datenlage im Bauwesen

Die Datenlage im Bauwesen ist im Vergleich zu anderen Industrien stark eingeschränkt. Ein Hauptgrund ist die Einzelfertigung an temporären Standorten. Daten müssen für jedes Projekt neu aufgenommen werden und sind im Wesentlichen nur für dieses Projekt gültig. Erschwerend kommt, zumindest in Deutschland, eine baubegleitende Planung hinzu. Dabei werden Daten „zumeist mehrfach erhoben und abgebildet“ [Bre01], mit der Folge, dass es zu „Konsistenzproblemen“ kommt. Das Bauwesen hat sich im Großen und Ganzen damit abgefunden. In vielen Fällen wird der Mangel an Daten durch das Erfahrungswissen („Bauen ist Erfahrungswissenschaft“) der Bauleitung ausgeglichen. Problematisch wird es, wenn dieses „implizite“ Wissen [Wei06] mitgeteilt werden muss. Das ist der Fall, wenn Projekte so groß sind, dass eine einzelne Person nicht mehr alle Informationen 'verarbeiten' kann, weil es zu viele sind. Projektübergaben sind in dem Zusammenhang ebenfalls problematisch. Der Informationsfluss ist ein fundamentaler Bestandteil logistischer Systeme, der den Materialfluss steuert. Pfohl [Pfo03] nennt diese „vorauselender“, vom „begleitender“ und „nacheilender“ Informationsfluss. Ersterer kündigt den Güterfluss an und ermöglicht die Vorbereitung des Güterempfangs. Der zweite informiert über die gelieferten Güter, während der dritte den stattgefundenen Güterfluss meldet.

Die Zeichnung spielt im Bauwesen eine zentrale Rolle zur Übermittlung von Daten und Informationen. Dies gilt insbesondere für die Informationsübertragung an die Bauausführenden. Ebenso von Bedeutung sind z. B. Ausschrei-

bungstexte, aber die Zeichnung ist immer Grundlage (vom Entwurf bis zur Ausführungszeichnung) für alle weiteren 'Datengeneratoren'. Während anfangs nur Architektenpläne und Schalpläne in CAD gezeichnet wurden, hat die elektronische 'Zeichenhilfe' den gesamten Bereich der Zeichnungserstellung vom Entwurf über Bewehrungs- und Werkpläne bis zur Haustechnik durchdrungen. Das CAD hat eine Entwicklung von der elektronischen 2D-Zeichnung hin zum objektorientierten 3D-Modell vollzogen, was einen Paradigmenwechsel bedeutet.

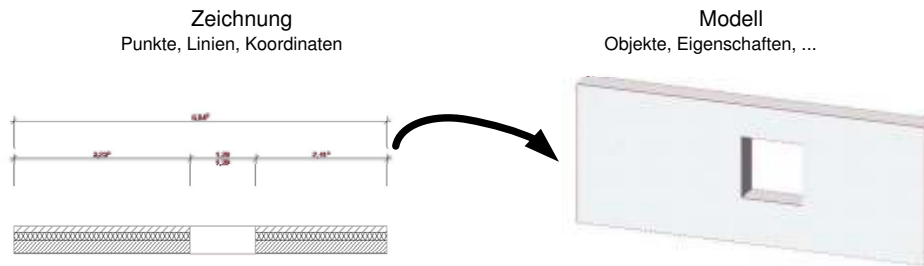


Abbildung 3.6: Der Paradigmenwechsel von der Zeichnung zum Modell

Es werden nicht mehr Linien, Straffuren, und Texte gezeichnet, sondern Objekte (vgl. Abb. 3.6). Dies können Bauteile wie Wände, Stützen oder Balken sein, oder auch Einrichtungsgegenstände wie Türen oder Stühle. Flächen oder Raumvolumina können ebenfalls als Objekte betrachtet und bearbeitet werden. Diese Objekte haben Eigenschaften wie Abmessungen, Materialien usw. – im Falle von Flächen sind es Informationen wie Mietzeiten und dergleichen – und sind in einer Datenbank hinterlegt (Gebäudedaten). So lassen sich die Eigenschaften der Objekte direkt verändern und weitere generieren. Es entsteht ein virtuelles Gebäudemodell, das Daten und Informationen aller Fachplaner beinhalten kann.

Um einen hochwertigen, plattformunabhängigen Datenaustausch zwischen CAD-Programmen zu gewährleisten, etablierte sich ein neuer Schnittstellenstandard, der sogenannte IFC (Industry Foundation Classes). An dem internationalen Standard haben sich mehrere namhafte CAD-Firmen beteiligt, die diese Schnittstelle in ihre Programme integriert haben. Entstanden ist die Schnittstelle bei der IAI (International Alliance for Interoperability) [IAI05], die 1995 in den USA gegründet wurde und der inzwischen Mitglieder aus über 20 Ländern angehören. Ziel der IAI ist es einen für das Bauwesen einheitlichen Datenaustausch zwischen allen Fachplanern über den gesamten Lebenszyklus hinweg zu schaffen.

Der IFC-Standard ermöglicht das virtuelle Gebäudemodell und damit semantische Informationen austauschen, d. h. es können deutlich mehr und höherwertige Daten ausgetauscht werden als beispielsweise mit dem *.dxf-Standard. Die Bauteile besitzen neben den grafischen Informationen (Punk-

te, Linien, Flächen) weitere Informationen, z. B. Material, Zeit, Kosten. Es ist ebenso möglich neue Objekte zu definieren und zwischen den Akteuren auszutauschen, wenn man es vereinbart hat. Damit können alle Fachplaner auf das gleiche Modell zugreifen und dabei ihre speziellen Applikationen verwenden. Die parallele Erfassung von Daten durch die Planer entfällt und Änderungen die mehrere oder alle betreffen, müssen nur einmal durchgeführt werden.

Das Gebäudemodell dient der Datenhaltung, angefangen von der Ausschreibung bis zum Betreiben des Gebäudes. *AVA-Programme* greifen für die Ausschreibung zur Mengenermittlung auf die Bauteildaten zu. Für den Bauantrag sind z. B. Flächen der einzelnen Nutzungsbereiche notwendig. Das Facility Management nutzt das Modell nach der Erstellung für die Berechnung von Miet- oder Reinigungsflächen oder zur Steuerung von Wartungsintervallen usw. Die Anwendungen in Tabelle 3.1 angegebenen Anwendungen sind nicht zwingend notwendig, liefern aber Daten die auch in der Simulation genutzt werden können.

Anwendung	Daten
CAD	- Bauteilabmessungen, - Bauteillage (x, y, z)
Facility Management	- Baustoffe, - Flächenmanagement
Terminplanung	- Einbauzeitpunkte, - Einbaureihenfolgen, - Ressourcenverwaltung

Tabelle 3.1: Daten anderer Anwendungen für die Simulation

Aus Sicht der Logistik liefert das 3D-Modell drei wesentliche Informationen: Material, Menge und Ort. In der Forschung (vgl. 2.3) werden z. Z. 4D (vgl. 2.3), bzw. 5D-Modelle diskutiert, d. h. zusätzlich die Zeit und die Kosten-Komponente. Die Verknüpfung des 3D-Modells mit dem Bauzeitenplan ist für die Logistiksteuerung erforderlich, denn erst mit der Komponente Zeit wird aus dem 'virtuellen' Gebäude ein 'Leistungs'-Plan. Die Leistungsbeschreibung im Bauwesen erfolgt in der Regel in Ausschreibungen über Standardleistungstexte, bei denen gewerkeweise Leistungen beschrieben und mit einer Zusammenfassung der Mengen, z. B. $20 m^2$ Kalksandsteinmauerwerk $d = 11,5 cm$, versehen werden. Grote weist in [Gro02] darauf hin, dass diese Aufschlüsselung kein Hinweis auf den Ort oder einen Bauabschnitt gibt, d. h. es wird nicht klar, ob es sich um eine einzige oder fünf Wände handelt, ob die Wand im Keller erstellt wird oder im 20. Stockwerk.

Der Komplexitätsgrad eines Bauvorhabens hängt u. a. von dessen Größe, der Neuheit des Bauverfahrens, der Kürze der Projektlaufzeit und den Platzverhältnissen ab. Die Frage, ab wann ein Bauvorhaben nur noch 'schwer'

gesteuert werden kann, ist nicht einfach zu beantworten. Eine insgesamt verbesserte Datenlage kann im Bauwesen auch bei niedrigem Komplexitätsgrad die Bauleitung vereinfachen. Natürlich ist der Aufwand der Datenerhebung hoch und mit Kosten verbunden. Wird die Datenerhebung jedoch ein integraler Bestandteil der Bauprozesse, unterstützt durch Anwendung moderner Informations- und Kommunikationssysteme, so ist zu erwarten, dass alle Akteure im Bauprozess mittelfristig davon profitieren. Folgende Unterscheidungen kann man im Bezug auf den Zustand von Daten treffen.

Merkmal	Erläuterung/Bemerkung
Daten liegen noch nicht vor	Zeitverzug zwischen Aufnahme und Bereitstellung oder Daten sind noch nicht erzeugt (baubegleitende Planung)
Daten sind/werden nicht aufgenommen	hoher Erfassungsaufwand
Daten sind nicht allen zugänglich	keine einheitlichen Schnittstellen, Mehrfachaufnahme erforderlich
Daten sind nicht austauschbar	Medienbrüche, papierbehaftet
Daten sind fehlerbehaftet	Übertragungsfehler, keine einheitlichen Standards
Daten sind nicht aggregierbar	Datenintegrität
Daten werden mehrfach aufgenommen (Redundanz)	Konsistenzprobleme bei Fachplanern

Tabelle 3.2: Zustand von Daten

An Bauprojekten sind viele Akteure beteiligt. Durch die wachsende Komplexität der Bauvorhaben in den letzten Jahren hat sich die Anzahl zwangsläufig noch vergrößert. Während der Bauphase ist der Datenaustausch zwischen den einzelnen Fachplanern aber ein unabdingbarer Bestandteil der Zusammenarbeit. Die zunehmende Arbeitsteiligkeit (vgl. 3.2.4) erhöht die Notwendigkeit „expliziten“ Wissens [Wei06]. Reibungsverluste zwischen aufeinander folgenden Gewerken können neben einer fachgerechten Ausführung derselben nur durch einen adäquaten Informationsfluss minimiert werden. Wie bereits ausgeführt sind die Subunternehmer meist handwerklich orientiert und kleinständisch und wollen oder können sich nicht an einem elektronischen Datenaustausch beteiligen. Dies belegt auch die eher „zögerliche Annahme“ eines internetbasierten Baustoffbestellsystems [Mar01].

Die Gebäudemolldaten sind für weitere Akteure, wie das Projektmanagement oder die Baulogistik interessant, da auf einer gemeinsamen aktuellen Datenbasis gearbeitet wird. Eine verbesserte Datenlage ist jedoch nicht nur für die eigentliche Bauphase sondern auch für die anschließende Betriebsphase (Facility Management) erforderlich. Die Baupraxis zeigt aber, dass Daten für das Facility Management nach Bauabschluss neu erhoben werden und

nicht auf den Planungsdaten des Architekten aufgebaut werden können. Die größten Kosten im Sinne der *Life Cycle Costs* für ein Bauwerk entstehen nicht während der Bauphase, sondern anschließenden Betriebsphase. Das Facility Management ist aus diesem Grunde entstanden. Kostensenkungen in der Betriebsphase sind durch effektive Steuerung möglich, wobei diese wiederum von der zur Verfügung stehenden Datenbasis abhängt.

Der Baustoffhandel als ein Akteur hat in einem Ausschuss eine standardisierte Baustoffdatenbank [NN01] entwickelt. Ziel war es eine einheitliche Datenbasis für den Baustoffhandel zu schaffen. Innerbetrieblich kann so eine strukturierte Preisliste erstellt werden. Überbetrieblich wurde der elektronische Datenaustausch verbessert. Auch sind so externe Betriebsvergleiche möglich.

Es wurde das gesamte für die Baubranche erforderliche Artikelsortiment erfasst und ein sogenannter Warengruppenschlüssel eingeführt. Das wurde notwendig um eine rationelle Verarbeitung von Daten in den jeweiligen Warenwirtschaftssystemen des Fachhandels zu gewährleisten. An der Standardisierung der Artikelstammdaten wurden folgende Akteure beteiligt: Hersteller, Fachhandel, Handelskooperationen und Softwarehersteller für Warenwirtschaftssysteme. Diese haben sich in einer Arbeitsgruppe verständigt Pflicht- und optionale Informationen (vgl. 3.3) im Artikelstamm aufzunehmen.

Pflicht-Informationen	optionale Informationen
Hersteller ILN	Herstellername
Hersteller-Kürzel	Maße/Gewichte (ohne Verpackung)
Erstellungsdatum	Menge pro Packung
Bewegungskennzeichen	Verpackungsmaße
Artikelnummer (EAN, IAN)	Verpackungsart
Artikelkurzbeschreibung	Handhabungsanweisungen
Bau-Warengruppenschlüssel	Palettenangaben
Gefahrstoff-Informationen	Ursprungs-/Herkunftsland
Entsorgung der Verpackung	Mediendaten

Tabelle 3.3: Informationen im Warengruppenschlüssel

Der Endkunde, das Bauunternehmen, ist an dem System nicht beteiligt. Die Nichtbeteiligung liegt offensichtlich daran, dass Bauunternehmen noch nicht die Notwendigkeit eines elektronischen Datenaustausches mit den Lieferanten sehen. Das wird durch eine Online-Umfrage [Web05] unter Bauunternehmen gestützt, bei der u. a. nach dem Einsatz von ERP-Software (=Enterprise Resource Planning) gefragt wurde. Spezielle Software wurde hauptsächlich von Großunternehmen eingesetzt, eine Schnittstelle zu einem System eines anderen Unternehmens hatte allerdings kein einziges Unternehmen.

3.3 Baustellenressourcen

In diesem Kapitel werden die für den Materialfluss relevanten Ressourcen einer Hochbau-Baustelle vorgestellt. Die Vorstellung beschränkt sich auf die für das Modell wichtigen Aspekte. Umfangreichere Beschreibungen sind der Literatur (z. B. [Bau92], [Len96] und [Töp01]) zu entnehmen.

3.3.1 Lkw für Ver- und Entsorgungstransporte

Der Lkw ist für den Baustellenverkehr das mit Abstand wichtigste Verkehrsmittel. Seine Vorteile liegen in seiner Flächenverkehrs- und seiner Geländetauglichkeit. Der Anteil am Modal Split für die Hauptgütergruppe „Steine und Erden“ liegt bei 94,7 % (1996) und damit weit über dem Gesamt-Modal Split von ca. 75 % [Flä99].

Die z. Z. nach StVZO zulässigen Abmessungen betragen 2,55 m in der Breite, 4,0 m in der Höhe und 12 m Länge für Solofahrzeuge, 16,75 m für Zugmaschinen mit Sattelaufleger sowie 18,75 m für Fahrzeuge mit Anhänger. Die ebenfalls nach StVZO zulässigen Gesamtgewichte richten sich nach der Achszahl und betragen 17,0 t für zweiachsige Fahrzeuge ohne Anhänger, 24 t für dreiachsige Fahrzeuge und 40,0 t für Fahrzeuge mit Anhänger bzw. Sattelaufleger (zitiert nach [Jün00]).



Abbildung 3.7: Spezialfahrzeug für Transportbeton

Baustellentransporte erfordern häufig Spezialaufbauten, die nicht mit Standardfahrzeuge durchgeführt werden können. u. a. benötigen folgende Mate-

rialgruppen im Hochbau Spezialfahrzeuge:

- Erdaushub,
- Kiese und Sande,
- Transportbeton,
- Fertigteile (teilweise),
- Siloputze,
- Sondereinbauteile.

Einige Lkw sind mit Bordkränen zur Selbstentladung ausgestattet, um vom Baustellenkran unabhängig zu sein. Insbesondere Entsorgungsfahrzeuge mit Entsorgungscontainern verfügen über eigene Ladeeinrichtungen, und sind somit kranunabhängig.

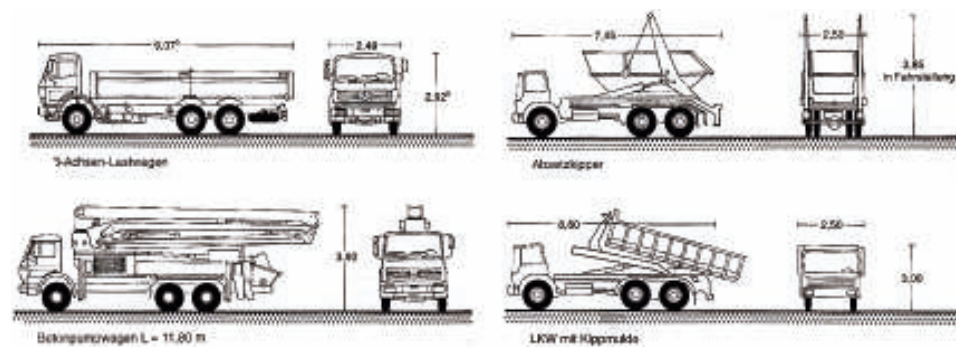


Abbildung 3.8: Exemplarisch ausgewählte Spezialfahrzeuge im Bauwesen nach [Neu00]

3.3.2 Baustellenkrane

Der Baustellenkran ist das wichtigste Umschlag- und Baustellentransportmittel im Hochbau [Len96] und ist ein diskontinuierliches Fördermittel [Jün00]. Man unterscheidet zwischen Fahrzeugkranen, Turmdrehkranen und Sonderkranen, von denen die Turmdrehkrane am häufigsten eingesetzt werden. Turmdrehkrane kann man nach ihrer Mobilität, ihrer Auslegerart oder ihrem Drehwerksystem kategorisieren. Mobile Baustellenkrane sind in der Regel schienengebunden und sind bis zu einer Höhe von ca. 50 m einsetzbar [Len96]. Darüber sind aus Standsicherheitsgründen ortsfeste Krane einzusetzen, die entweder mit Unterwagen, Fundamentkreuz oder durch Einspannung in eine Bodenplatte (oder eigenes Fundament) am Boden fixiert werden. Die Aufstellung kann dabei sowohl innerhalb als auch außerhalb des Gebäudes erfolgen [Töp01]. Neben der Bauhöhe bestimmt der Ausleger die Merkmale des Krans, da die maximale Ausladung, die Tragkraft und das Lastmoment, d. h. $\text{Ausladung} \cdot \text{Tragkraft}$, den Kran wesentlich beschreiben. Der Nadelausleger verändert zum Radialtransport die Auslegerneigung mit der Folge, dass sich gleichzeitig die Lasthöhe verändert. Der kurze Gegen- ausleger und die Variabilität in vertikaler Ebene bringt bei beengten Platzverhältnissen Vorteile [Töp01], für den Einbau von Fertigteilen ist allerdings eine exakte Positionierung der Last erforderlich, was durch die gekoppelte Veränderung von Höhe und Radialabstand nicht gegeben ist. Bei obendre-

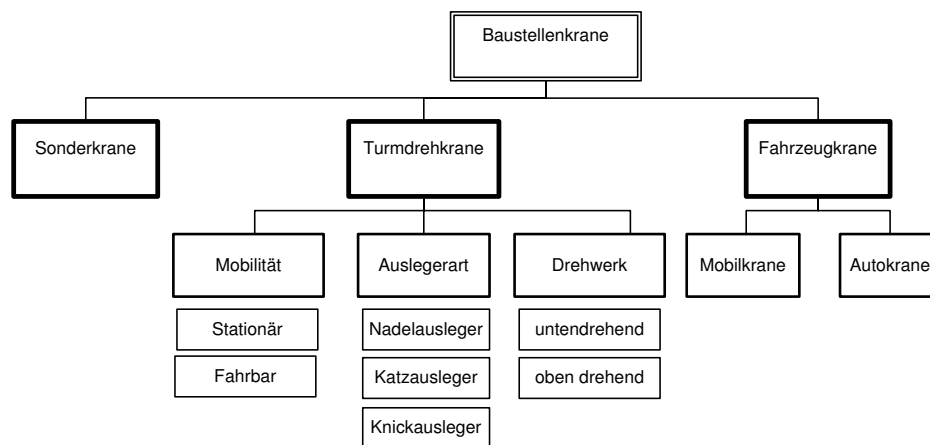


Abbildung 3.9: Baustellenkrane

henden Kranen, bei dem nur das auf dem Turm gelagerte Oberteil rotiert, ist der Montageaufwand wesentlich höher. Untendrehende Krane, bei denen sich der gesamte Turm dreht, erfordern deutlich mehr Platz im unteren Drehbereich [Len96].

Die Dimensionierung der Krane erfolgt neben den bereits genannten Merkmalen (Geometrie, Tragkraft) über die Anzahl der produktiven Arbeits-

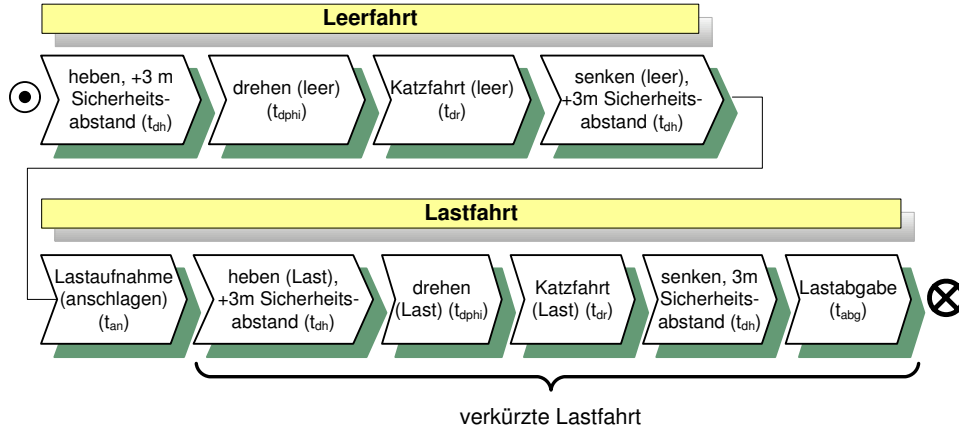


Abbildung 3.11: Prozesskette Kranspiel

- r = Katzfahrt
- phi = Drehen
- h = Heben bzw. Senken (für z-Richtung)
- d = Differenz zweier Werte
- an = Last anhängen
- abg = Last abgeben

Für die Leistungswerte maximale Dreh-, Hub-, und Katzfahrgeschwindigkeiten werden von den Kranherstellern Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der angehängten Last gemacht. Vereinfachend wird mit der Maximalgeschwindigkeit gerechnet, die dem Mittelwert der angehängten Lasten entspricht. Die Bandbreite der Geschwindigkeiten ist so schmal, dass die Bestimmung der maximal möglichen Geschwindigkeit in Abhängigkeit der angehängten Last den Mehraufwand nicht rechtfertigen würde. Das stimmt mit dem Vorgehen in [VDI 2195] überein, in der ebenfalls von durchschnittlichen Gewichten ausgegangen wird. Ob die Geschwindigkeiten erreicht werden, hängt zudem von der zurückzulegenden Strecke ab. Ist sie so kurz, dass die Maximalgeschwindigkeit nicht erreicht wird, weil vorher abgebremst werden muss, bildet sich das Geschwindigkeitsprofil I. Bei Geschwindigkeitsprofil II ist die Strecke so lang, dass bis zur Maximalgeschwindigkeit beschleunigt, eine Zeit gehalten, und dann auf Null abgebremst wird.

Dabei wird nach [VDI 2195], [VDI 3573] und [VDI 2397] von linearen Geschwindigkeitsprofilen ausgegangen und $a_{Beschl} = -a_{Bremms}$ gesetzt. Das führt zu folgender Berechnungsvorschrift (vgl. [Möl01]):

$$t_{Bew} = \begin{cases} 2 \cdot \sqrt{\frac{s}{a}} & \text{für } s < \frac{v^2}{a} \text{ Profil I} \\ \frac{s}{v} + \frac{v}{a} & \text{für } s \geq \frac{v^2}{a} \text{ Profil II} \end{cases} \quad (3.1)$$

Die Bewegungszeiten t_h , t_{phi} und t_r werden zunächst getrennt berechnet. Um

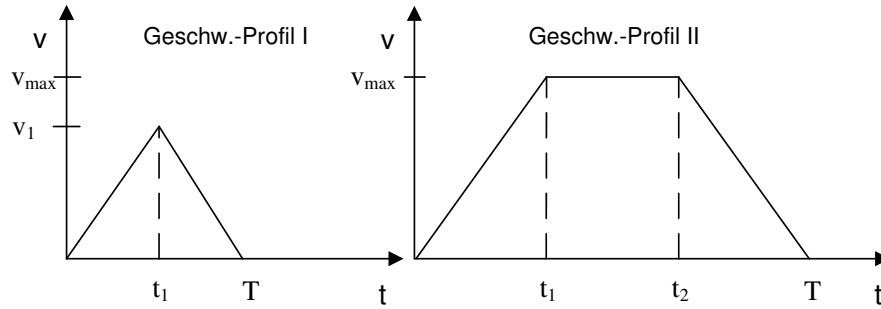


Abbildung 3.12: Geschwindigkeitsprofile I und II

Kollisionen mit dem entstehenden Bauwerk zu vermeiden, wird die Teilbewegung 'Heben' getrennt ausgeführt [Scho02]. Die Dreh- und die Katzbewegung wird nach folgender Vorschrift überlagert:

$$t_{Fahrt} = \text{Max} \begin{cases} t_{dphi} \text{ (Drehung)} \\ t_{dr} \text{ (Katzfahrt)} \end{cases} \quad (3.2)$$

3.3.3 Baustraßen und -wege

Die auf Baustellen angelegten Straßen und Wege dienen zur Ver- und Entsorgung der Baustelle, sowie dem innerbetrieblichen Personenverkehr. Die Transportfahrten der Arbeitsgeräte sind nicht selten Sondertransporte, die auf Grund der Abmessungen in besonderer Weise in der Planung berücksichtigt werden müssen. Ebenso sind die Wenderadien und die überstrichene Fläche der Lkw zu beachten. Die Wendemöglichkeiten können als Wendetrapez, Wendekreis oder als Wendehammer ausgebildet werden. Die zugehörigen Abmessungen sind der Abbildung 3.13 zu entnehmen. Als An-

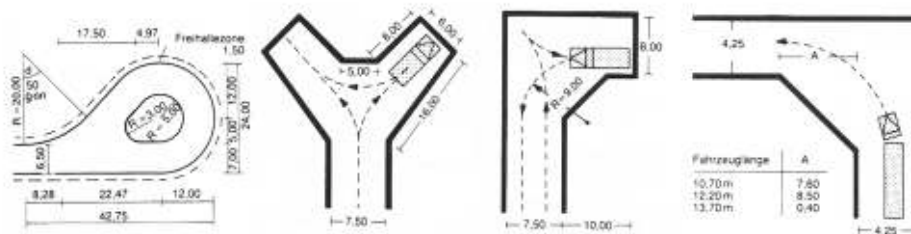


Abbildung 3.13: Platzbedarf beim Wenden und Abbiegen nach [Neu00]

haltspunkt für die Schleppkurve dient Abbildung 3.14. Die Breite einspuriger Baustraßen beträgt 3,5 m mindestens jedoch 3,0 m falls der angegebene Wert

nicht möglich ist. Für zweispurige Straßen sind jeweils 3 m hinzu zu addieren [Töp01].

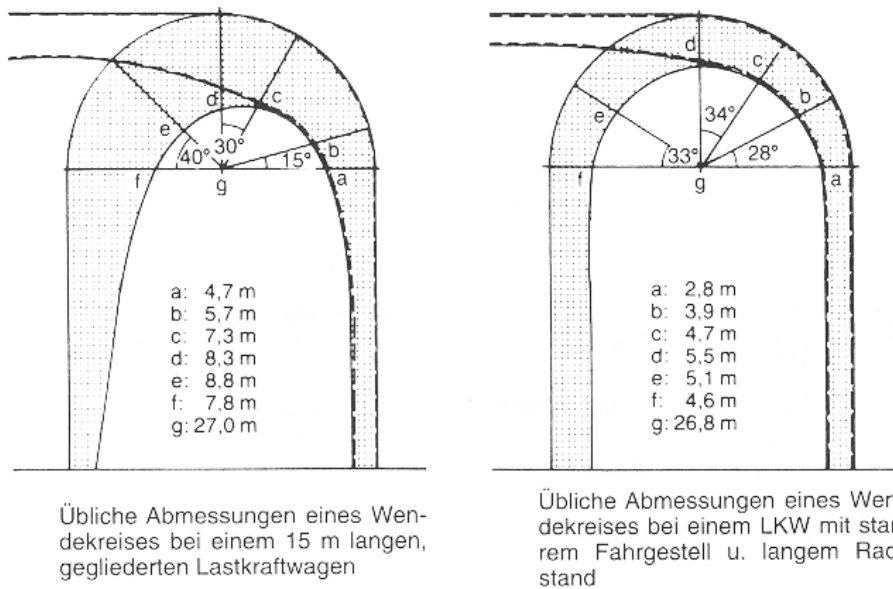


Abbildung 3.14: Schleppkurven nach [Neu00] in Abhängigkeit vom Fahrzeugtyp

3.3.4 Baustellenlager

Lagern ist nach VDI 2411 „jedes geplante Liegen des Arbeitsgegenstandes im Materialfluss“. Differenziert man nach *Puffern*, *Lagern*, *Speichern* (vgl. [Gud05]) so kommt im Baustellenlager nur das *Puffern* vor, also das kurzzeitige Liegen von geringen Arbeitsvorräten. Das *Lagern* und *Speichern* von Baustoffen und Material in größeren Mengen kommt lediglich im Baustoffhandel vor. Daher hat das Baustellenlager eine

- Bereitstellungsfunktion,
- Sicherheitsfunktion,
- Überbrückungsfunktion.

Steuerungsfunktionen oder *Spekulationsfunktionen*, wie sie in der stationären Industrie bekannt sind, gibt es für Baustellenlager nicht. Mit der *Bereitstellung* werden alle für die aktuell laufenden Prozesse erforderlichen Baustoffe zur Verfügung gestellt. Die *Sicherheitsfunktion* gewährleistet die Versorgung

der Prozesse bei **unbekannten und ungeplanten** (stochastischen) Asynchronitäten [Kra05]. Die *Überbrückungsfunktion* dagegen gewährleistet die Versorgung bei allen **bekannten und geplanten** Asynchronitäten.

Lagerplätze im Bauwesen sind außerhalb oder innerhalb des Bauwerks angeordnet. Die Läger außerhalb des Bauwerks sind Freiläger, bei denen es sich in der Regel um eine freie Fläche handelt. Wegen der meist sehr unebenen und unbefestigten Bodenverhältnisse im Außenbereich wird in der Praxis auf jegliche Lagertechnik verzichtet und eine einfache Bodenlagerung durchgeführt. Eine Sonderform der Außenläger bilden Magazincontainer für Kleinteile und Silo-, bzw. Tankläger.

Bei der (Puffer-) Lagerung innerhalb von Gebäuden spricht man von Etagenlagern, bei deren Einrichtung z. T. auf eine Zonung geachtet (vgl. Abb. 3.15) wird, d. h. den einzelnen Gewerken werden genaue Lagerflächen, die auf dem Boden markiert sind, zugeordnet. Dadurch wird einerseits ein 'Wildwuchs' an Einzellagern verhindert und gleichzeitig werden die Verkehrsflächen frei gehalten.

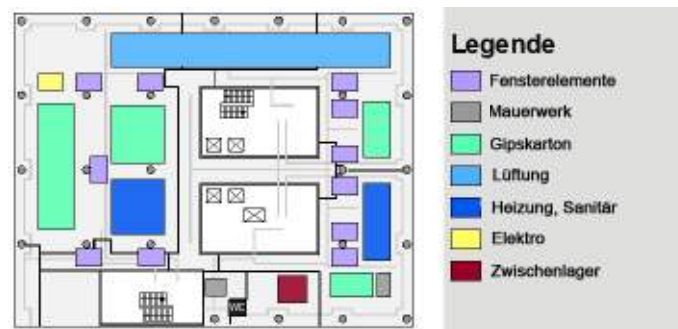


Abbildung 3.15: Etagenlager nach [Boe04]

Das Lagergut hat auf Grund seiner Eigenschaften und Merkmale Einfluss auf den Lagerungsprozess und die Lagerungsart. Im Freien gelagerte Güter müssen witterungsbeständig bzw. so verpackt sein. Die Stapelfähigkeit von Stückgütern hat Einfluss auf die erforderliche Lagerfläche, wobei die Unfallverhütungsvorschriften einzuhalten sind.

3.4 Logistikstrategien für Baustellen

Der in dieser Arbeit verwendete Begriff *Strategie* wird nach Klinger [Kli00] im weitergefassten entscheidungstheoretischen und spieltheoretischen Sinn, also ohne die Fristigkeit einer Entscheidung, gebraucht. Auf die unternehmenspolitischen Strategien im zeitlichen Kontext wird nicht eingegangen, da die Zielsetzung dieser Arbeit auf die Simulation baulogistischer Prozesse

ausgerichtet ist und nicht auf unternehmenspolitische Prozesse in Bauunternehmen.

Die hier vorgestellten Strategien beziehen sich auf Hochbau-Baustellen als einzelne Produktionsstandorte und Ort der Wertschöpfung von Bauunternehmen. Der Fokus liegt auf der Prozesssteuerungs- oder operativen Ebene, d. h. auf allen Entscheidungen, die den physischen Materialfluss betreffen. Strategien höherer Ebenen, wie z. B. zentrale Beschaffungskonzepte, sind nicht aufgeführt, weil sie für das in dieser Arbeit entwickelte Modell nicht von Bedeutung sind.

Die in Kapitel 3.2 beschriebenen Unterschiede des Bauwesens zur stationären Industrie machen es erforderlich, zwischen Standard-Strategien und individuellen Strategien zu unterscheiden. Standard-Strategien sind all jene, die unabhängig von einer konkreten Baustelle zu betrachten sind (z. B. [Jac98], [Kra05]), z. B. die Einrichtung einer Zugangsbeschränkung auf eine Baustelle. Standardstrategien sind auf Grund unternehmenspolitischer Entscheidungen auf Baustellen eines Unternehmens anzuwenden. Die Einrichtung einer Lieferavise für Lkw mit zugeordneten Zeitfenstern ist eine solche baustellenunabhängige Strategie, wenn man von der grundsätzlichen Entscheidung einer Einführung absieht.

Dem gegenüber stehen die individuellen Strategien, die die konkreten Randbedingungen einer Baustelle in einem Logistik-Konzept berücksichtigen ([Kra04], [Tam04], [Die94] usw). Die Konzepte schließen beispielsweise auch lokale Verkehrssituationen mit ein und sind für jedes Vorhaben neu zu erarbeiten.

Die Simulation von Materialflüssen auf Baustellen, wie sie in dieser Arbeit vorgestellt wird, ist eine Methode, Strategien für individuelle Projekte zu untersuchen, da die Systemlast unmittelbar aus den konkreten CAD-Daten des Bauobjekts generiert wird. Die Ableitung allgemeingültiger Strategien erfolgt dann durch Abstraktion der Ergebnisse. Zur Bildung von Standard-Strategien sind weitere Simulationen anderer Bauvorhaben erforderlich, um die Allgemeingültigkeit der abgeleiteten Strategien zu bestätigen. In den folgenden Unterkapiteln werden sowohl individuelle als auch Standard-Strategien vorgestellt, die am Anwendungsbeispiel (Kap. 6) getestet werden.

3.4.1 Lagerstrategien im Bauwesen

Auf Grund der in Kapitel 3.2 beschriebenen Situation des Bauwesens hängt die Größe eines Lagers von den örtlichen, individuellen Gegebenheiten ab. Eine unklare Kennzeichnung von Lagerfläche gegenüber anderen Funktionsflächen führt nicht selten dazu, dass letztere als Lagerflächen missbraucht werden und es so zu Störungen im Betriebsablauf kommt.

Sind aus Platzgründen die Lagerflächen beschränkt, was oftmals der Fall ist [Kam94], richten sich die Bevorratungsstrategien (vgl. Kap. 3.4.2) oder auch Bestellmengenstrategien [Kam94] nach dem Angebot der Lagerfläche, d. h. Zufluss, Lagerfläche und Abfluss durch Verarbeitung stehen in engem Zusammenhang. Die Größe der Lagerfläche als auch der Abfluss ist Schwankungen unterworfen (vgl. Kap. 3.2), was Planung und Steuerung erschwert.

3.4.2 Bevorratungsstrategien

Ein Bauwerk besteht im Sinne der Beschaffung aus den einzelnen Liefermengen aller Baustoffe und Bauteile und den zugehörigen Lieferzeitpunkten mit den Lieferintervallen. Aus Sicht der Baustelle (als Produktionsstätte) hängt die Entscheidung über die Bevorratungsstrategie von dem Lagerflächenangebot auf der Baustelle, den Kapitalbindungskosten durch Lagerung und der Anliefersituation ab. Für den Rohbau wird fast ausschließlich 'auf Abruf' angeliefert, weil der Kran auch als Einbaumittel genutzt wird und Baustoffe z. T. nicht lagerfähig sind (Ortbeton). Die Anliefersituation ist relevant, wenn eine Pufferung von anliefernden Lkw nicht möglich ist und deswegen bestimmte Transporte zu weniger hochbelasteten Zeiten durchgeführt werden.

Kamm stellt in [Kam94] mehrere „Modelle zur Bestimmung der optimalen Bestellmenge“ vor, wobei er die Lagerfläche als „in den meisten Fällen ausschlaggebende Einschränkung eines operativen Dispositionsspielraumes“ nennt. Da in der Praxis selten solche Verfahren eingesetzt werden [Cla07a],

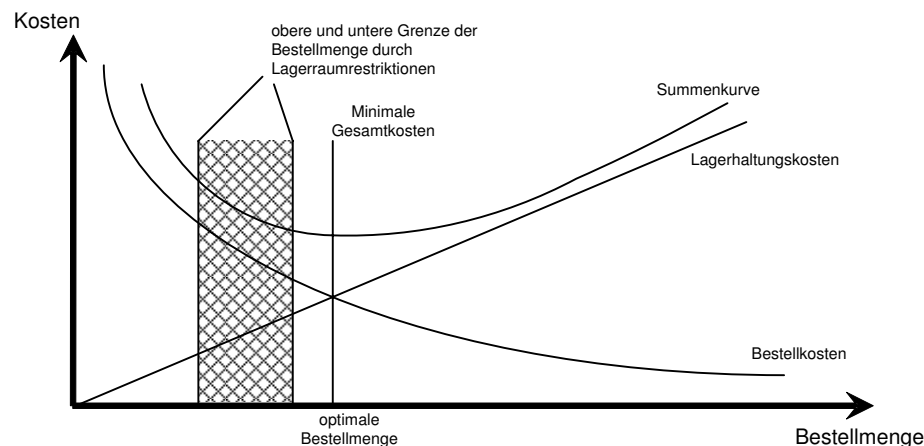


Abbildung 3.16: Optimale Bestellmenge unter Berücksichtigung der Lagergröße

sind in dieser Arbeit nur die Auswirkungen verschiedener Bestellmengen auf die Systemleistung untersucht worden. Es ist möglich, ein solches Verfahren

mit dem Modell zu testen, wobei es notwendig ist, das Verfahren auf alle (Lager-) Materialien anzuwenden und als Systemlast auf das System einwirken zu lassen. Damit kann überprüft werden, ob unter Berücksichtigung der Überlagerung der Einzelbestellungen und der stochastischen Einflüsse die Obergrenze des Lagers eingehalten wird oder nicht.

3.4.3 Lieferstrategien

Aus Sicht der Lieferanten ist eine hohe Auslastung der Transportkapazität von Bedeutung. Dies bezieht sich auf die Auslastung des einzelnen Transportmittels im Bezug auf das maximale Gewicht (Gewichtsproblem) oder das maximale Volumen (Volumenproblem). Beim Einsatz von Gebietsspediteuren, wie es in [Lei03] beschrieben ist, sind die Materialien interessant, die zusammen geladen werden können. Auf einer Sammeltour (vgl. Abb. 3.17) werden alle Baustoffe und Bauteile, die nicht ein spezielles Transportmittel benötigen, gesammelt und zur Baustelle gebracht.

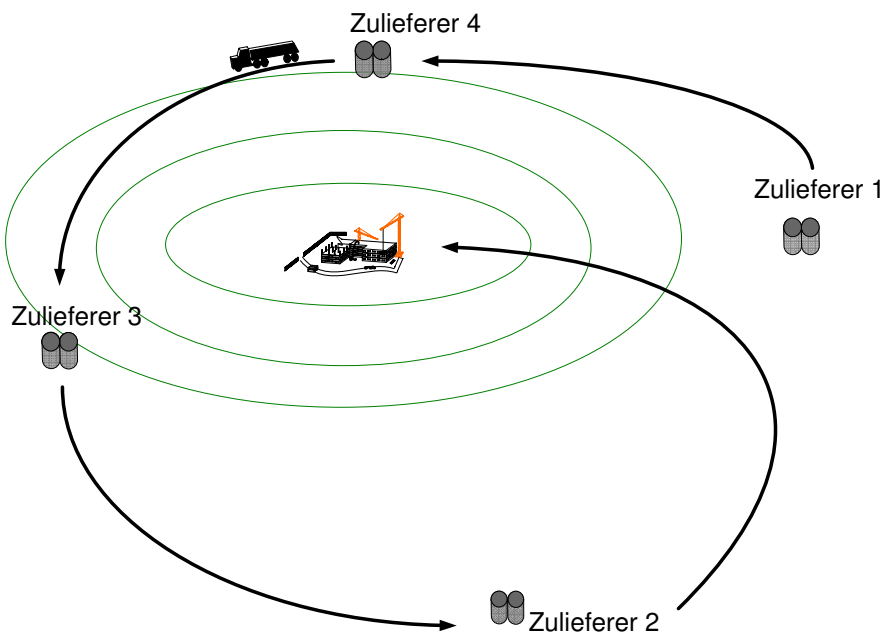


Abbildung 3.17: Einsatz eines Gebietsspediteurs

Ein weiterer Aspekt ist die Möglichkeit, einen Transport mit möglichst wenigen Transportmitteln durchzuführen, indem die Lieferintervalle so gestaltet sind, dass Shuttle-Verkehre (vgl. Abb. 3.18) möglich sind [Wil77]. Diese sind normalerweise unpaarig, da entweder große Mengen z. B. an Erdaushub von der Baustelle wegtransportiert, oder Baumaterial hintransportiert wird und

die Transportmittel nicht kompatibel sind. Damit wird eine gleichmäßige zeitliche Auslastung der Lkw über eine längere Periode erreicht.

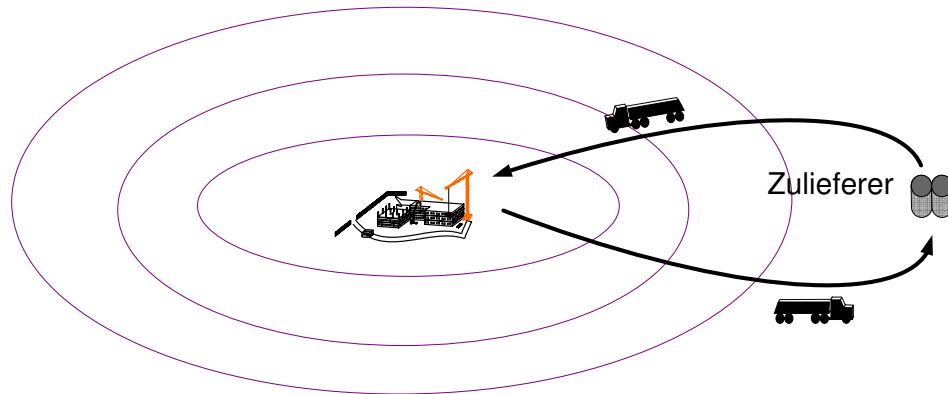


Abbildung 3.18: Shuttle-Verkehre

Voraussetzung ist eine ausreichende Vorlaufzeit und ausreichende Informationen, um solche Verkehre aus Lieferantensicht zu optimieren. In der Baupraxis wird das eher als nachrangig betrachtet und nur dann durchgeführt, wenn es nicht mit den Belangen der Baustelle kollidiert. Für einen Lieferanten ist neben den bereits erwähnten Punkten auch die Wartezeiten der Lkw vor Ort von Interesse.

Kapitel 4

Grundlagen der Simulationsmethode

Dieses Kapitel dient als Einführung in die Simulation und klärt Begriffe und allgemeine Vorgehensweisen. Die Darstellung beschränkt sich auf die notwendigen Aspekte des in Kapitel 5 entwickelten Simulations-Modells. Ausführlichere Darstellungen zum Thema sind der Literatur z. B. [Pag91], [Pid04], [Rob04] und [Law00] zu entnehmen. Des Weiteren wird die Simulationsumgebung für SIMUBAU vorgestellt. Die Simulationsumgebung bildet die Grundlage, auf der die Komponenten von SIMUBAU entwickelt wurden.

4.1 Begriffsbestimmungen

Simulation ist nach [VDI 3633-1] „die Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“. Dabei ist eine „hinreichend korrekte Abbildung“ [Pag91] des Originals erforderlich, um über die Ergebnisse auf die Wirklichkeit zurückschließen zu können. Der Abstraktionsgrad und die Idealisierung haben damit Einfluss auf die Qualität und die Quantität der verwertbaren Rückschlüsse auf das Realsystem.

Ein *System* ist dadurch charakterisiert, dass mehrere Komponenten miteinander in Beziehung stehen und zu einem gemeinsamen Zweck interagieren [Pag91].

Systeme heißen *zeitdiskret*, wenn die interagierenden Objekte des Systems selbst einzelteilig sind und zu bestimmten Zeitpunkten ihr Verhalten oder ihre Eigenschaften ändern. In logistischen Systemen sind die „in der Regel ganzzahlige[n] Werte“ [Sch97] dieser Verhaltens- oder Eigenschaftsänderungen von Bedeutung.

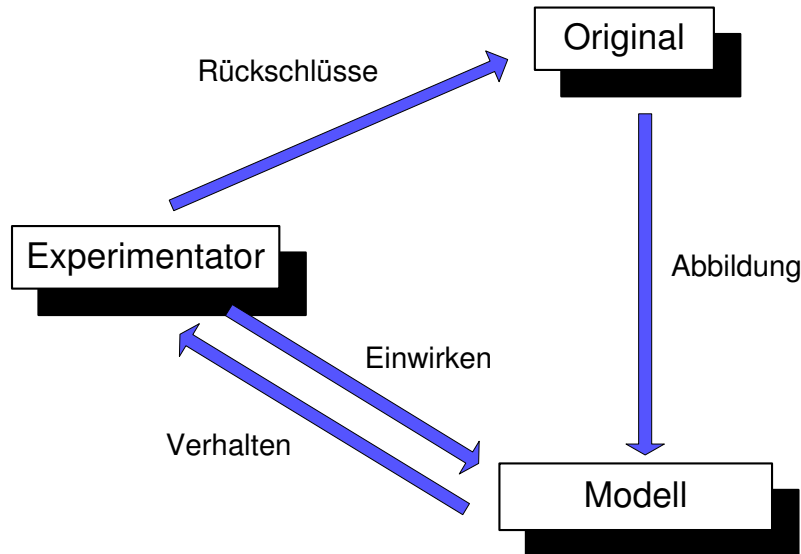


Abbildung 4.1: Beziehungen zwischen Original, Modell und Experimentator nach [Pag91]

Abbildung 4.1 zeigt die Beziehungen und Wechselwirkungen zwischen dem Original, dem Modell und dem Experimentator. Es wird deutlich, dass der Experimentator aufgrund der Einwirkungen, die er auf das Modell zulässt, ein Verhalten des Modells hervorruft. Mit der Analyse des Verhaltens kann er Rückschlüsse auf das Original ziehen.

Im Bauwesen gibt es neben Prozessen mit offensichtlich diskreten Objekten (Bauteile, Lkw, Personal usw.) auch kontinuierliche Prozesse, wie Betonförderung über Pumpen. Diese Prozesse lassen sich durch zeitdiskrete Prozesse approximieren, ohne das Ergebnis der logistischen Untersuchung zu beeinträchtigen.

Die Frage nach dem sinnvollen Einsatz für die (diskrete) Simulation wird nach [VDI 3633-1] durch den Begriff „simulationswürdig“ beschrieben. Dabei wird in der Literatur ([VDI 3633-1], [Pag91], [Pid04]) darauf hingewiesen, dass die Simulation ein aufwändiges Instrument ist und erst dann zum Einsatz kommen sollte, wenn andere Methoden versagen. Da im Bauwesen das Experimentieren am realen Objekt auf Grund des Unikatcharakters von vorne herein entfällt, bleiben unter den mathematischen Modellen¹ nur die Analytischen Methoden und die Simulation (vgl. Abb. 2.6 auf Seite 20).

Analytische Ansätze versagen oft bei dynamischen und kurzlebigen Prozessen [Pid04], da häufig mit Mittelwerten gearbeitet wird. Aussagen über Spitzenwerte werden nicht oder nur unvollständig getroffen [Rob04]. Dies kann aber zu Änderungen im Modellverhalten führen, wenn z. B. ein Lager

¹Ein physisches Modell ist ebenso nicht sinnvoll und wird nicht weiter betrachtet.

voll ist und in dem Moment nicht mehr eingelagert werden kann. Die Abbildung von Verteilungen (vgl. 4.2.1) für realitätsnahes Modellverhalten ist mit analytischen Methoden nur eingeschränkt möglich [Rob04].

Simulationen liefern eine „anschauliche Darstellung“ des Modellverhaltens über die Zeit ([Pag91]), was für die dynamischen Prozesse im Bauwesen und den ständigen Veränderungen der Baustelle entgegenkommt.

4.2 Modellierung

Die Modellierung in der Simulation ist ein iterativer Prozess, bei dem ein *konzeptionelles Modell*, ein *Computermode*ll, die *Experimentergebnisse* und das *Realsystem* (Baustelle) in Beziehung stehen. Als erstes wird das Realsystem als konzeptionelles Modell abgebildet, mit dem Ziel ein Modell zu erhalten, dass soweit vereinfacht und abstrahiert ist, dass nur die für die Simulationsziele relevanten Komponenten und Beziehungen existieren. Im Bauwesen existieren die Realmodelle noch nicht. Alle Informationen müssen aus den Planungen entnommen werden und durch Vergangenheitswerte ergänzt werden.

Eine weitere Abstrahierung erfolgt in der Umsetzung des konzeptionellen in ein Computermodell, indem die softwarespezifischen Modellierungselemente verwendet werden. Über die Auswertung der Simulationsergebnisse und dem Abgleich mit dem Realsystem wird die Richtigkeit der Modelle geprüft und angepasst. Damit beginnt der Kreislauf von neuem und wird abgebrochen, wenn die Simulationsergebnisse genügend genau mit dem Realsystem übereinstimmen.

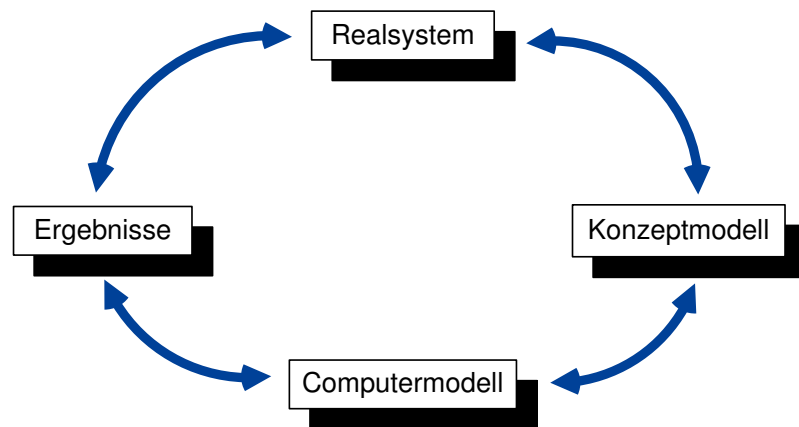


Abbildung 4.2: Modellierung nach [Rob04]

4.2.1 Konzeptmodell

Das konzeptionelle Modell beschreibt das Realsystem in einer computerunabhängigen Weise mit den bereits erwähnten Idealisierungen. Für die diskrete Simulation sind die Hauptobjekte und ihre Beziehung zueinander notwendig [Pid04]. In dieser Arbeit werden das Prozesskettenmodell nach Kuhn [Kuh95] und Flussdiagrammdarstellungen verwendet, um das Modell darzustellen. Zur Reduktion der Komplexität sind stochastische Modelle deterministischen Modellen vorzuziehen [Pag91]. Die stochastische Beschreibung der Vorgänge erfolgt über spezielle Verteilungen, die im Folgenden beschrieben sind.

Verteilungsfunktionen

Simulationsexperimente mit stochastischen Elementen sind Zufallsexperimente, da sich das Verhalten nicht genau vorhersagen lässt. Daher sind statistische Verfahren notwendig, um dieses Verhalten so zu beschreiben, dass sich Aussagen über das Gesamtsystem ableiten lassen. Mit Hilfe von Verteilungen wird ein Bereich angegeben, indem sich die Zufallsgröße befindet [Pag91]. Wiederholt sich ein Ereignis häufig genug nähert sich die Punktverteilung der Einzelereignisse der theoretischen kontinuierlichen Verteilung an. Die Bedeutung der Normalverteilung für die Simulation begründet sich

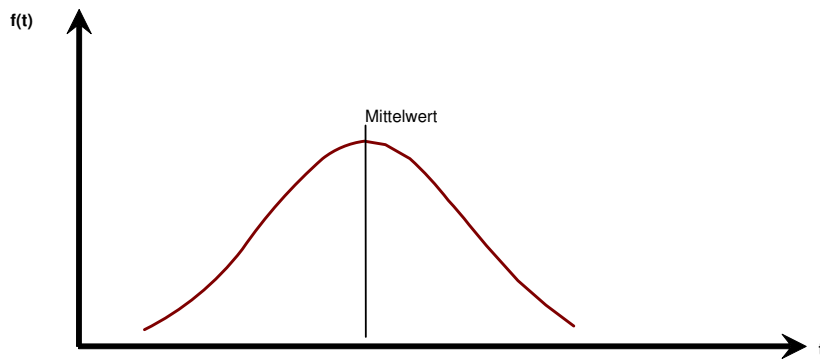
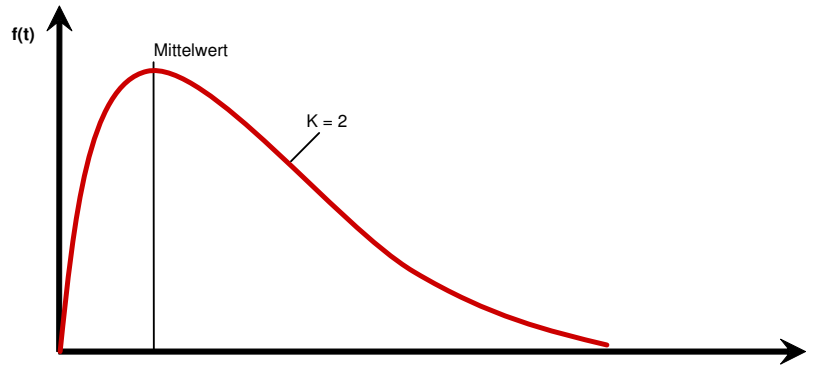


Abbildung 4.3: Normal-Verteilung

in der Tatsache, dass eine Zufallsvariable, die sich additiv aus unabhängigen Einzelwirkungen zusammensetzt, als annähernd normalverteilt angesehen werden kann [Har82]. Die Normalverteilung ist außerdem symmetrisch und kann durch Mittelwert und Standardabweichung beschrieben werden.

Die Erlang-Verteilung, die nach einem der Begründer der Warteschlangentheorie (dem Dänen A.K. Erlang) benannt ist, ist eine sehr variable Verteilungsform, die in der industriellen Praxis häufig eingesetzt wird [Hei69].

Abbildung 4.4: Erlang-Verteilung mit $k = 2$

Die Erlangverteilung kann durch Mittelwert und k -Faktor beschrieben werden. Abbildung 4.4 zeigt die Verteilung mit dem Faktor $k = 2$, die stark linksschief ist. Die Erlang-Verteilung geht von der Exponential-Verteilung für $k = 1$ in die Normalverteilung für $k \rightarrow \infty$ über.

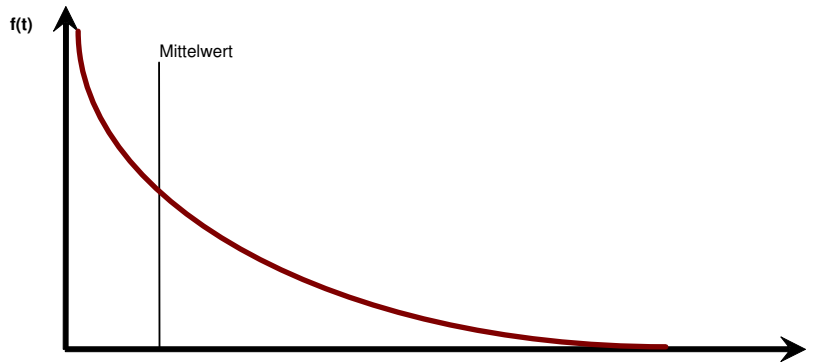


Abbildung 4.5: Negativexponential-Verteilung

Die Negativexponential-Verteilung eignet sich für alle voneinander unabhängigen Ereignisse. Sie wird nur durch den Mittelwert beschrieben. Man spricht auch von einer „gedächtnislosen Verteilung“ [Har82]. Zufällige Ankunftszeiten sind typischerweise negativ-exponentialverteilt.

Die Gleichverteilung ist die einfachste Verteilung überhaupt und ersetzt die Normalverteilung, wenn obere und untere Grenze gleich sind. Die Verteilung in Abbildung 4.7 ist im Gegensatz zu den vorhergehenden eine diskrete, d. h. es existieren keine Zwischenwerte. Die Summe aller diskreten Werte ergibt wie bei allen anderen Verteilungen den Wert 1 und wird häufig bei empirisch ermittelten Daten angewendet, wenn man das Verhalten eines Systems mit diesen Vergangenheitsdaten nachbilden will.

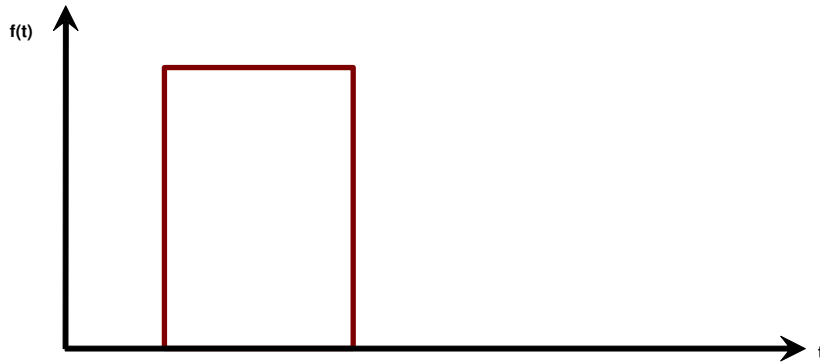


Abbildung 4.6: Gleichverteilung-Verteilung

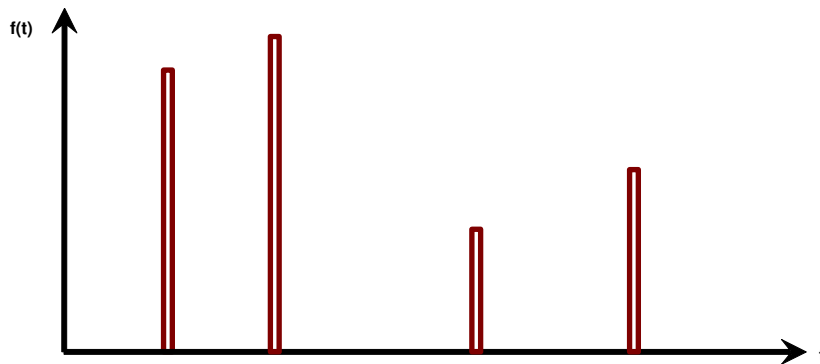


Abbildung 4.7: Diskrete-Verteilung

4.2.2 Beobachtungszeitraum

Der Zeitraum zwischen dem ersten und dem letzten Ereignis, das simuliert wird, ist der Beobachtungszeitraum des realen Systems. Der Bauzeitenplan legt fest, wann welches Gewerk beginnt (Ereignis) und wie lange es stattfindet (Aktivität). In der vorliegenden Arbeit wird dieser als „Simulationszeit-horizont“ bezeichnet, nicht der Simulationszeit, weil diese mit der Rechenzeit des Computers verwechselt werden könnte ([Sch97]).

Im Gegensatz zu den meisten Simulationsstudien handelt es sich um konkrete Datumswerte (z. B. 4.11.2005 9:00) an denen Gewerke beginnen oder enden (Ereignisse). Der Bauzeitenplan beginnt mit einem Initialereignis, bei dem die interne Simulationsuhr auf $t = 0$ gesetzt wird. Von diesem Punkt aus werden alle Zeitpunkte, an denen Ereignisse stattfinden, in Sekunden umgerechnet (z. B. $t = 1283247 \text{ s}$).

Der Beobachtungszeitraum enthält arbeitsfreie Zeiten (Nacht und Wochenende), die aus dem Simulationszeithorizont herausgelöst werden, damit die

- Simulationszeit nicht unnötig verlängert wird,

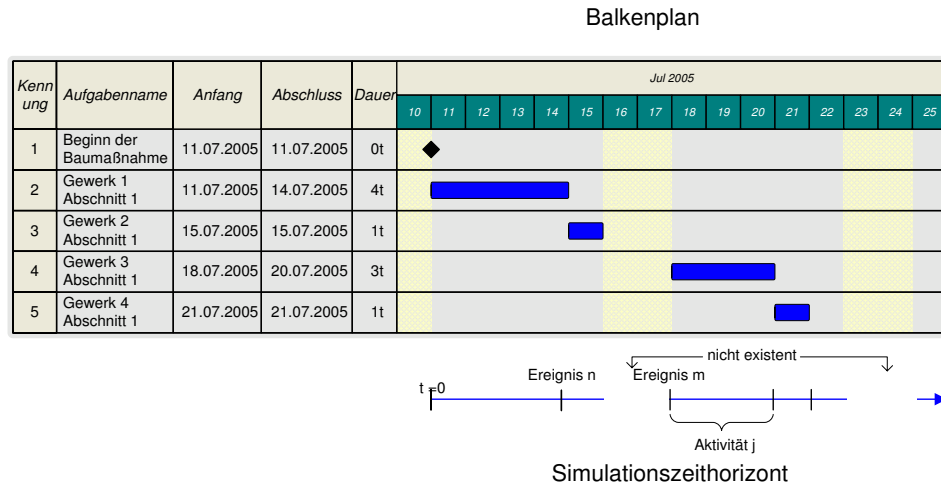


Abbildung 4.8: Bauzeitenplan und Simulationszeithorizont

- arbeitsfreie Zeit nicht die Ergebnisse (z.B. Kraneinsatzzeit) verfälscht.

Zur Vereinfachung werden eine feste tägliche Arbeitszeit und eine feste Wochenendzeit festgelegt. Feiertage und sonstige außergewöhnliche Freizeiten bleiben unberücksichtigt. Es ist sowohl die Umrechnung von der Realzeit (Beobachtungszeitraum) in die Simulationszeit notwendig, als auch die Umrechnung einer Simulationszeit in die Realzeit. Im ersten Fall sind es „exogene“ Ereignisse wie das Ankommen der Lkw, die in die Simulation integriert werden. Im zweiten Fall können die „endogenen“ Simulationsergebnisse (Einbauzeitpunkt Bauelement n) [Pag91] in Realzeit umgerechnet werden. Die dazu verwendeten Formeln sind dem Anhang A zusammengestellt.

Experimentplanung

Die Experimentplanung zielt darauf ab das 'Problem', das man mit Hilfe der Simulation lösen möchte, so zu formulieren, dass die Ergebnisse als Lösung brauchbar sind. In [VDI 3633-3] sind zur leichteren Problemdefinition Begriffe eingeführt worden, die im Folgenden erläutert werden. Zunächst muss eine „Zielgröße“ definiert werden, die Auskunft über die Antwort des Systems auf die Systemlast gibt. „Einflussgrößen“ sind all jene Größen, die durch ihre Veränderung eine signifikante Veränderung der Zielgröße bewirken. Sind die Veränderungen allerdings nicht kontrollierbar, nennt man sie *Störgröße*. Die kontrollierte Veränderung der Einflussgrößen erfolgt in Stufen.

Die [VDI 3633-3] weist fünf Verfahren zur Experimentdurchführung aus, wobei hier nur die *One-by-One-Factor-Methode* erwähnt wird, da nur sie in

dieser Arbeit zum Einsatz kommt. Bei dieser Methode wird pro Experiment jeweils nur eine Einflussgröße verändert, mit dem Ziel die Auswirkungen genau einer Größe bestimmen zu können. Die gegenseitige Beeinflussung der Einflussgrößen bleibt dabei unberücksichtigt und eignet sich daher nur für voneinander unabhängige Einflussgrößen.

4.2.3 Computermodell

Aus dem konzeptionellen Modell entsteht das Computermodell, wobei bei objektorientierten Simulations-Programmen die Computermodellierungen sehr nahe an die konzeptionellen Modelle heranreichen. Modellbausteine entsprechen den „Hauptobjekten“, die Beziehungen werden durch die Verknüpfungen der Modellbausteine realisiert. Zur Feinabstimmung ist (meist eine eigene) Programmiersprache erforderlich, mit der komplexere Strategien oder Verhaltensweisen der Hauptobjekte abgebildet werden können [Pid04].

Die Abbildung der Logistikprozesse über die gesamte Bauzeit ist systemimmanent eine „Simulation mit festem Ende“ [VDI 3633-1]. Daraus folgt, dass eine 'Einschwingzeit' entfällt und die Unabhängigkeit der Stichproben durch die Anzahl der Simulationsläufe gewährt werden muss. Innerhalb des Konfidenzintervalls, das mit zunehmendem Stichprobenumfang schmaler wird, liegt mit vorgegebener Wahrscheinlichkeit der 'tatsächliche' gesuchte Mittelwert der Zielgröße. Viele Simulationsprogramme bieten die Berechnung des Intervalls innerhalb der Experimentauswertungsroutinen an. Dabei muss

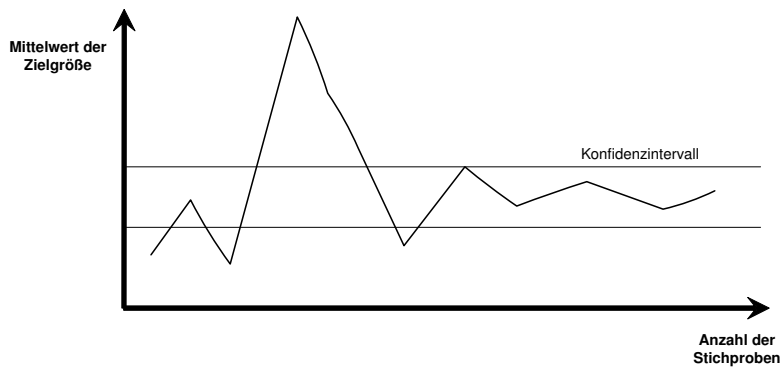


Abbildung 4.9: Zusammenhang zwischen Anzahl der Stichproben, dem berechneten Mittelwert der Zielgröße und dem Konfidenzintervall

gewährleistet sein, dass

- die Stichproben unabhängig sind,
- die Mittelwerte und Varianzen des Modells gleich sind, und
- sich eine Normalverteilung der Zielgröße einstellt.

4.3 Ergebnisse

Nach Durchführung der Experimente am ComputermodeLL lassen sich Rückschlüsse auf das Realsystem ziehen [Pag91]. Wie aus Abbildung 4.2 ersichtlich, ist die Modellierung und Auswertung einer Simulationsstudie kein linearer Prozess [Rob04]. Neben der Modellprüfung, die im folgenden Kapitel (Kap.4.4) behandelt wird, ist auch der Prozess selbst iterativ. Die Simulation erlaubt in gewissen Grenzen 'Was-wäre-wenn'-Szenarien, die bestimmte Vorhersagen über das Verhalten des Realsystems zulassen. Möglicherweise wird auch das Realsystem auf Grund der Ergebnisse angepasst, so dass eine Veränderung auch des Konzept- bzw. des ComputermodeLLs notwendig wird. Dies gilt nicht nur für Realsysteme, die noch in Planung sind, wie typischerweise im Bauwesen, sondern auch bei bestehenden Systemen, die umgenutzt werden.

Da, wie erwähnt, die Logistikprozesse über die Bauzeit simuliert werden, müssen die Ergebnisse entsprechend ebenfalls über die Zeit ($f(t)$) dargestellt werden. Dabei ist es z. T. erforderlich Daten auf 'passende' Zeitintervalle zu aggregieren. Im Bauwesen ist das in der Regel eine Kalenderwoche.

4.4 Modellprüfung

Wie die Modellbildung selbst ist die Modellprüfung ebenfalls ein iterativer Prozess. Wenngleich eine vollständige Modellvalidierung unmöglich ist [Pid04], ist eine größtmögliche Sorgfalt einerseits und eine entsprechend vorsichtige Auswertung der Ergebnisse andererseits notwendig. Hierzu gibt es, je nach Anwendungsfall, eine Reihe von Prüfverfahren. Im Folgenden werden die in dieser Arbeit verwendeten kurz vorgestellt, für weitere wird auf die Literatur verwiesen ([Law00] und [Pag91]).

Anhand der Beziehungen in Abbildung 4.2 lassen sich die einzelnen Schritte der Modellprüfung ableiten, da zu jeder Modellierungsbeziehung eine eigene Prüfung gehört.

Page weist auf das „Problem der uneinheitlichen Begriffsbildung“ bei der Modellvalidierung hin [Pag91], weswegen zunächst einige Begriffe erläutert werden.

4.4.1 Begriffsbestimmung

Validierung

Die *Validierung* ist nach Brockhaus [NNg05] die „Gültigkeitsprüfung im Softwareentwicklungsprozess, die eine Analyse hinsichtlich der Übereinstimmung von Zielstellung und Ergebnis vornimmt (z. B. mittels Testläufen).

Im Gegensatz zur Verifikation beweist eine derartige Analyse jedoch nicht die Korrektheit der getesteten Software.“ Es lässt sich durch folgende Frage ausdrücken:

„Ist es das richtige Modell?“

Verifizierung

Verifizieren bedeutet laut Duden [NNc03] „durch Überprüfen die Richtigkeit einer Sache bestätigen“. Oder wieder als Frage ausgedrückt:

„Ist das Modell richtig?“

Kalibrierung

Das *Kalibrieren* stellt den Bezug bekannter Werte einer Messgröße zu den ausgegebenen Werten einer Messeinrichtung her. Ist die Messgröße beispielsweise die Zeit, die der Transport eines Bauteils mit dem Kran über eine bestimmte Strecke dauert, so muss das richtig kalibrierte Simulationsmodell die gleiche Zeit² liefern wie die 'Wirklichkeit'.

Die Ermittlung der Messgrößen im Sinne der Genauigkeit stellt bei Simulationsmodellen nicht das eigentliche Problem dar, da es sich nicht um ein physikalisches Modell handelt. In [Sch97] werden folgende Punkte genannt, die die Ergebnisauswertung erschweren:

- In endlicher Zeit können nicht alle stochastischen Fälle berechnet werden;
- Die Ermittlung aller Eingangsparameter unterliegen einer begrenzten Genauigkeit;
- Die notwendigen Vereinfachungen und Abstraktionen führen zu Abweichungen vom realen System.

4.4.2 Prüfung des Konzeptmodells

Die Überführung des Realsystems in ein Konzeptmodell ist nicht nur in der Modellbildung am schwierigsten, sondern auch in der Validierung. Die Abstrahierung und die Vereinfachung der komplexen Sachverhalte erfordern entsprechende Aufmerksamkeit. Für das Konzeptmodell sind nach [Pag91] im Wesentlichen drei Prüfungen notwendig:

- Prüfung der Hypothesen und vereinfachende Annahmen;

²innerhalb von Toleranzgrenzen

- Prüfung der Daten;
- Prüfung der Struktur.

Als Prüfmethode kommt hauptsächlich die Expertenbefragung in Betracht, während für die Datenprüfung entsprechende Analysemethoden hinzukommen.

4.4.3 Prüfung des Computermodells

Die Verifizierung des Computermodells bezüglich der Umsetzung des Konzeptmodells erfordert ähnliche Testmethoden wie allgemeine Softwareentwicklung. Der modulare Aufbau heutiger Simulationsmodelle erleichtert die Erstellung und Verifizierung von Teilmodellen, die weit weniger komplex sind als die Gesamtmodelle. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass einmal verifizierte Teilmodelle wiederverwendet werden können. Mit Hilfe von Handrechnungen sind diese Teilmodelle verifizierbar.

Die Validierung des Computermodells bezüglich des Realsystems kann über drei Schritte erfolgen [Pag91]. Bei der *Plausibilitätsprüfung* wird das Verhalten des Systems mit dem Realsystem verglichen. Dies geschieht über Expertenbefragungen und analytische Vergleichsrechnungen.

Die *Sensitivitätsanalyse* zielt darauf ab, wie das Modell auf Veränderungen von Eingabe oder Struktur reagiert. Damit lassen sich eventuelle Strukturfehler aufdecken und zudem wesentliche von unwesentlichen Parametern unterscheiden.

Ein dritter Schritt ist der *Outputvergleich*. Hierbei werden historische Daten im Simulationsmodell eingespielt und die Outputdaten mit denen des Originalsystems verglichen. Das setzt aber ein vorhandenes Realsystem voraus. Die in dieser Arbeit aufgezeigte Problemstellung bezieht sich auf in Planung befindliche Realsysteme, deren a posteriori ermittelte Outputdaten nur noch Erkenntniswert für ein zukünftiges System hat, da mit Abschluss eines Bauvorhabens auch der Wert der Simulation beendet ist, wenn man von der Erfahrungsanreicherung absieht. Dennoch lässt sich über die genannten Methoden und Prüfungsschritte ein ausreichend genaues Modell erstellen.

4.5 Die Simulationsumgebung *Enterprise Dynamics*

In den vorangegangenen Kapiteln wurden der Einzelfertigungscharakter im Bauwesen (vgl. 3.2.2) und die Nutzung von 3D-CAD-Daten (vgl. 3.2.5) dargestellt. Der erste Aspekt erfordert es, mit möglichst geringem Aufwand

durch vorgefertigte Bausteine ein Computermodell zu erstellen. Die Verwertbarkeit eines Modells ist mit der Erstellung des Bauwerks beendet, so dass der Erstellungsaufwand möglichst gering gehalten werden muss.

Der zweite Aspekt setzt voraus, dass einerseits die Simulationsumgebung strukturorientiert ist, um die Materialflusswege richtig abbilden zu können, und andererseits eine externe Datenbank zum Datenaustausch verwendet werden kann.

Die oben genannten Gründe waren wesentlich für die Entscheidung SIMUBAU in der Simulationsumgebung *Enterprise Dynamics* (=ED) in der Version 7.0 des Unternehmens *Incontrol Enterprise Dynamics* zu entwickeln. Das Programm enthält bereits eine Logistik-Suite mit Grundmodulen zur Abbildung von Materialflüssen in der stationären Industrie (Bibliothek).

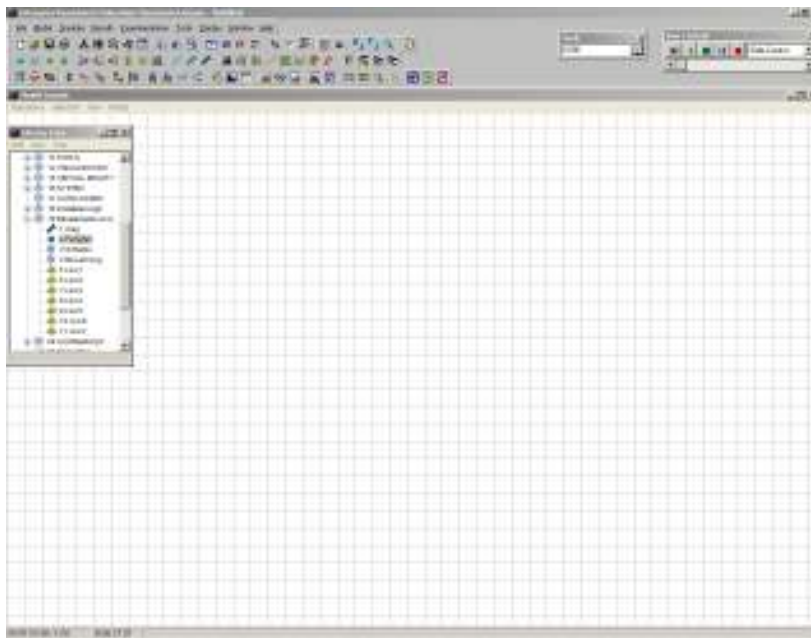


Abbildung 4.10: Simulationsumgebung von *Enterprise Dynamics*

ED ist ein strukturorientierter Materialfluss-Simulator zur Modellierung diskreter Prozesse und basiert auf einem sogenannten „Atomkonzept“. Atome sind Objekte, die gleich aufgebaut sind, Eigenschaften besitzen und auf Ereignisse reagieren können. Alle Elemente in *ED*, sowohl die BEO (= Bewegte Objekte) als auch die STATO (= Statische Objekte) (vgl. [Sch97]), sind Atome. Die BEO sind alle Objekte, die sich innerhalb einer Simulation 'bewegen' bzw. 'bewegt' werden, z. B. Produkte, Transportmittel usw. Demgegenüber stehen die STATO, die ortsgebunden im Layout angeordnet sind und 'Bearbeitungsaufgaben' haben, wie z. B. Warteschlangen, Verarbeitungsmaschinen usw.

Die Atome können in einem Modell-Layout über kartesische Koordinaten angeordnet und miteinander verbunden werden. Jedes Atom besitzt dazu in der Regel mindestens einen Eingangs- und einen Ausgangskanal. Je nach Funktion der Atome sind die Eigenschaften und Reaktionen auf Ereignisse unterschiedlich. Über eine eigene Skriptsprache können Atome verändert oder neue erzeugt werden. Neue Atome können der bereits vorhandenen Bibliothek hinzugefügt und beliebig verwendet werden.

Die Veränderung der Atome bezüglich der Lage im Raum, deren Anzahl oder Leistungsparameter ermöglicht es Varianten zu generieren, ohne die Systemlast zu verändern. Die folgenden Unterkapitel beschreiben die 'Standardatome' auf denen die Atome bzw. Atomgruppen von SIMBAU (Komponenten) aufbauen.

Standardatome der Logistik-Suite

Die folgenden Standardatome der Logistik-Suite sind die Basisatome auf der die für SIMUBAU erforderlichen Atome und Atomgruppen aufbauen. Sie werden bezüglich ihres grundlegenden Verhaltens beschrieben, wobei alle eine Reihe an Einstellmöglichkeiten und Parameter besitzen, auf die hier nicht eingegangen wird. Sie existieren in einer ähnlichen Form auch in anderen Materialfluss-Simulatoren.

arrival-list Die *arrival-list* ist eine Tabelle für BEO, die programmseitig auch als *product* bezeichnet werden, mit fest definierten Zeitpunkten der Erzeugung und dient als Quelle. Es können darüber hinaus weitere Eigenschaften definiert werden, die die BEO weiter beschreiben, wie z. B. Gewicht, Abmessungen oder erforderliches Transportmittel.

queue Das *queue*-Atom ist ein STATO und hat die Aufgabe ankommende BEO aufzunehmen und in einer vorgegebenen Reihenfolge weiterzugeben. Falls das nachfolgende STATO diese nicht aufnimmt verbleiben die BEO in der *queue*, so dass eine Warteschlange entsteht. Die *queue* nimmt solange BEO auf bis die Kapazitätsgrenze erreicht ist.

server Der *server*, bzw. in vereinfachter Form der *fast server*, hat die Aufgabe, ankommende BEO aufzunehmen und nach einer bestimmten Zeit ('CycleTime') weiter zu geben. Im Wesentlichen entsteht ein Zeitverbrauch, es können aber auch Veränderungen in der Eigenschaften der BEO vorgenommen werden wie in allen Atomen.

assembler und stacker Um BEO miteinander zu einer Einheit zu verbinden, z. B. mehrere Produkte auf eine Ladeeinheit, kann der *assembler* genutzt werden. Eine vorgegebene variable Anzahl an BEO wird einem *container* zugeordnet, der dann als eine eigenständige Einheit (BEO) im Simulator behandelt wird. Diese kann dann weiter verschachtelt werden.

Der *stacker* arbeitet in ähnlicher Form, nur das kein *container* extra erzeugt werden muss.

unpack Das *unpack*-Atom löst die im *assembler* oder *stacker* zusammengefassten Einheiten wieder auf.

Kapitel 5

Modellbeschreibung

Das Kapitel enthält die Herleitung eines konzeptionellen Modells, die Entwicklung einer Systemlast aus den Gebäudemolldaten und Beschreibungen der Datenhaltung. Zudem werden die entwickelten Module des Simulators vorgestellt und durchgeführte Modellprüfungen dargestellt. Anschließend wird auf die konkreten Strategien und Regeln eingegangen, die im Modell SIMUBAU verwendet werden.

5.1 Einleitung

Das Modell SIMUBAU beschreibt die klassischen logistischen Prozesse auf einer Baustelle.

Transport-Umschlag-Lagerung (TUL) sind, wie in den vorangegangenen Kapiteln dargelegt, die Basis-Prozesse der Logistik. Diese zunächst nicht-wertschöpfenden (vgl. Kap. 2.1) Prozesse werden bewusst aus dem baubetrieblichen Kontext herausgelöst und separat betrachtet und bewertet. Die Einführung des Prozessdenkens und die damit verbundene Trennung von wertschöpfenden und nicht-wertschöpfenden Prozessen entsprechen dem Vorgehen aus den Anfängen der Logistik in der stationären Industrie. Darauf dass auch diese indirekt wertschöpfend sein können, wurde in [Wir01] hingewiesen.

In Kap. 3.2.5 wurde die Notwendigkeit von Daten für eine effektive Logistik im Bauwesen dargelegt. Die Informationen Material, Menge, Ort und Zeit bilden die Basisgrößen und damit die Systemlast für die Simulation. Es handelt sich um eine individuelle Logistikuntersuchung. Man unterscheidet systemlastneutrale und systemlastverändernde Logistikkonzepte. Alle Variationen bezüglich des Layouts oder der Anzahl und Leistungsfähigkeit der Ressourcen sind systemlastneutral. Veränderungen in der Systemlast entstehen durch Modifikation der zeitlichen Komponente der Materialien.

systemlastneutral	systemlastverändernd
Änderungen des Layouts	Änderungen der Gesamtbauzeit
→ Wegeanordnung	viele Lieferungen mit geringen Mengen
→ Standorte der Ressourcen	wenige Lieferungen mit großen Mengen
Änderungen der Ressourcen	Vorgabe von Zeitfenstern
→ eingesetzte Anzahl	Bündelung von Verkehren
→ Kapazität und Leistungsfähigkeit	

Tabelle 5.1: Systemlastneutral versus systemlastverändernd

5.2 Systemlast

1. Definition

Nach Kuhn [Kuh95] „wird die Systemlast bestimmt durch die Gesamtheit des Quelle-Senke-Verhaltens eines logistischen Systems (Umwelt-, Kunden-, Lieferanteinflüsse)“. Zur Modellbildung werden aus der Gesamtheit nur die Einflüsse auf das System betrachtet, die notwendig sind, um die Ziele der Simulation zu erreichen.

2. Definition

Im Entwurf der VDI 3633 Teil 1 [VDI 3633-1] wird die Systemlast beschrieben als Gesamtheit aller

- Auftragsdaten (Produktions- und Transportaufträge, Mengen, Termine usw.)
- Produktdaten (Arbeitspläne und Stücklisten).

Während die erste Definition sehr allgemein gehalten ist, zielt die zweite stark auf die Situation der stationären Industrie mit einem Produktionsplanungs- und Steuerungssystem (*PPS-System*) ab. In jedem Fall handelt es sich um eine bestimmte (Leistungs-) Anforderung an das System pro Zeiteinheit. Die Systemlast wird über die Quellen in das System eingespeist und verarbeitet.

Makroskopisch betrachtet ist die Systemlast die Erstellung des Gebäudes in der geplanten Bauzeit. Um dieses Ziel zu erreichen, muss das Gebäude in kleinere Einheiten heruntergebrochen werden. Das geschieht auf unterschiedliche Weise. In Ausschreibungen wird das Bauwerk in die verschiedenen Gewerke zerlegt, denen Mengen und Materialien zugeordnet sind. Wie bereits in Kap 3.2.5 nachgewiesen, ist es nachteilig, dass der Ort an dem das

Material verarbeitet werden soll (Senke) in dieser Zerlegung nicht zugeordnet ist.

Eine andere Möglichkeit bietet die 3D-CAD Zeichnung (Kap. 3.2.5) zur Generierung der Systemlast. Ein Bauwerk besteht aus mehreren Bauteilen, die oft aus mehreren Baustoffen bestehen. Z. B. besteht eine Außenwand aus Filigranwand mit Ortbeton, Innenputz, Dämmung und Außenputz. Die Baustoffe/Bauteile haben unterschiedliche morphologische Eigenschaften und gehören zu unterschiedlichen Gewerken, womit sie zeitlich getrennt verarbeitet werden. Sofern diese zusammengesetzten Bauteile nicht bereits vorgefertigt an die Baustelle geliefert werden, müssen sie als eigenständige Komponenten, im Folgenden als *Bauelemente* bezeichnet, unabhängig betrachtet werden (vgl. Abb. 5.1).

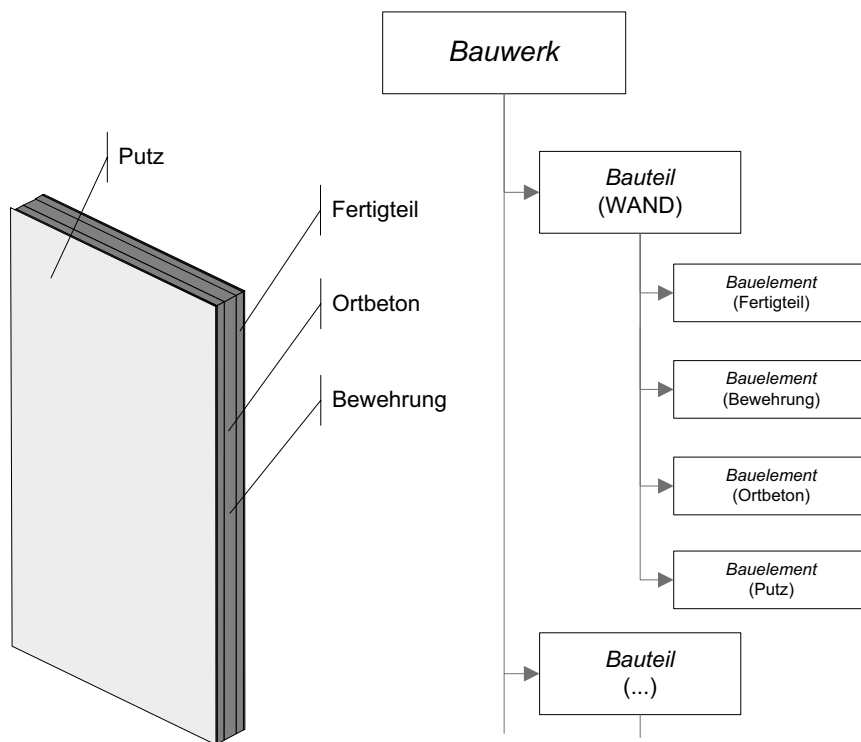


Abbildung 5.1: Bauteil–Bauelemente

Materialspezifische logistische Daten der Bauelemente, wie z. B. *Transporteinheiten* (Erläuterung s. Kap. 5.5.2), *Liefereinheiten* oder Lagereigenschaften, sind in der Datenbank (vgl. Kap. 5.3) hinterlegt. Aus den logistischen Daten lassen sich Informationen über Anzahl der Lkw und Anzahl der Ladungsträger für einen Lieferabruf ableiten. Der Gesamtauftrag 'Bauwerkserstellung in der Bauzeit' ist auf Einzelaufträge (Bauelemente) zu bestimmten

Zeitpunkten gegliedert.

Einige CAD-Programme bieten eine Schnittstelle (ODBC) an, durch die Bauteile ausgelesen und in eine bauteilorientierte Datenbank geschrieben werden können. Im konkreten Fall wurde das Programm *Archicad* (Version 9.0) genutzt. Die Bauteildaten müssen noch um deren Koordinaten ergänzt werden, da diese über die ODBC-Schnittstelle nicht ausgelesen werden können. Dies geschieht über die IFC-Schnittstelle.

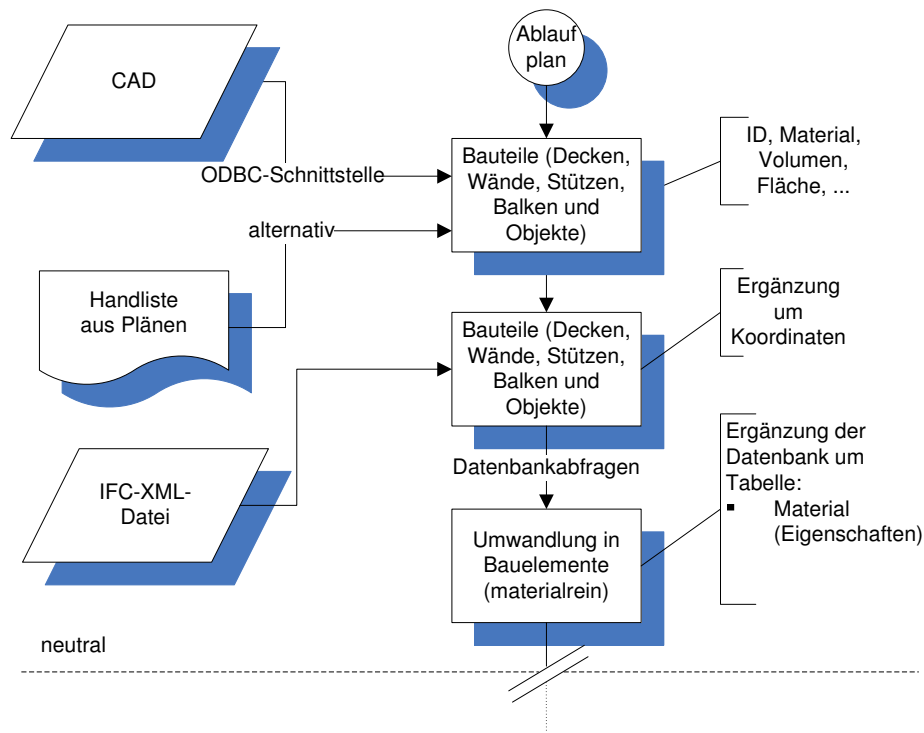


Abbildung 5.2: Vorgehensweise Teil 1

Die Koordinaten des CAD-Modells wurden auf das Koordinatensystem des Simulationsmodells transformiert. Das 3D-CAD-Modell liefert die Basisgrößen der Logistik, die „Aufträge“ nach [VDI 3633-1]: Material, Menge und Ort, allerdings ohne zeitliche Komponente. Die bisherige Vorgehensweise hat die Ausgangslage nicht verändert.

Um eine Systemlast zu erhalten, muss die zeitliche Komponente zugefügt werden. Das ist zunächst eine baubetriebliche Planungsleistung, die in der Regel in der Arbeitsvorbereitung durchgeführt wird. Es geschieht durch Festlegung von Arbeitsabschnitten und Terminen. Arbeitsabschnitte sind räumlich abgegrenzte Bereiche, in denen bestimmte Arbeiten zu einem bestimmten Zeitpunkt (Termin) durchgeführt werden. Die Ergänzung durch die Komponente Zeit ergibt eine Leistung (Arbeit/Zeit), d. h. die Verände-

rung der Zeit ist ein wesentliches Kriterium für die Veränderung der Systemlast, da man davon ausgehen kann, dass alle anderen Komponenten unverändert bleiben.

5.2.1 Nebenprozesse

Je nach Bauverfahren und Bauphase gibt es eine Reihe von Nebenprozessen, d. h. Prozesse, die nicht unmittelbar mit dem Materialfluss des Bauwerks zu tun haben. Schalung, Gerüste, Maschinen, Verbrauchsmaterial usw. müssen transportiert z. T. sogar mehrfach umgeschlagen und gelagert werden. Die Nebenprozesszeiten für den Kran werden von Experten zwischen 20 und 30 % der Gesamtzeit angegeben. Die Nebenprozesse werden von der Bauleitung möglichst in die auslastungsschwachen Zeiten gelegt. Ein Zeitpunkt, wann diese Prozesse stattfinden, ist schwer abzuschätzen. Bei der Auswertung der Ergebnisse müssen die Ressourcenverbräuche der Nebenprozesse entsprechend berücksichtigt werden.

5.3 Datenbank

5.3.1 Aufbau der Datenbank

Die aus dem CAD-Modell ausgelesenen Daten werden in der Datenbank in verschiedenen Tabellen, die im Folgenden beschrieben werden, gespeichert. Die Datenbank dient als Generator der zuvor beschriebenen Systemlast. Dazu sind weitere Tabellen erforderlich, die ebenfalls im Folgenden dargestellt werden. Bei Beibehaltung der Schnittstellendefinitionen, sind aus beliebigen Gebäudemodellen effizient Systemlasten generierbar.

Die weitere Vorgehensweise nach Datensammlung und -sortierung ist der folgenden Abbildung 5.3 zu entnehmen.

Die Datenbank, die als Grundlage für die Systemlast dient, besteht aus vier Tabellenarten:

- CAD-Tabellen
- Analysetabellen,
- Logistikdatentabellen,
- Planungstabellen.

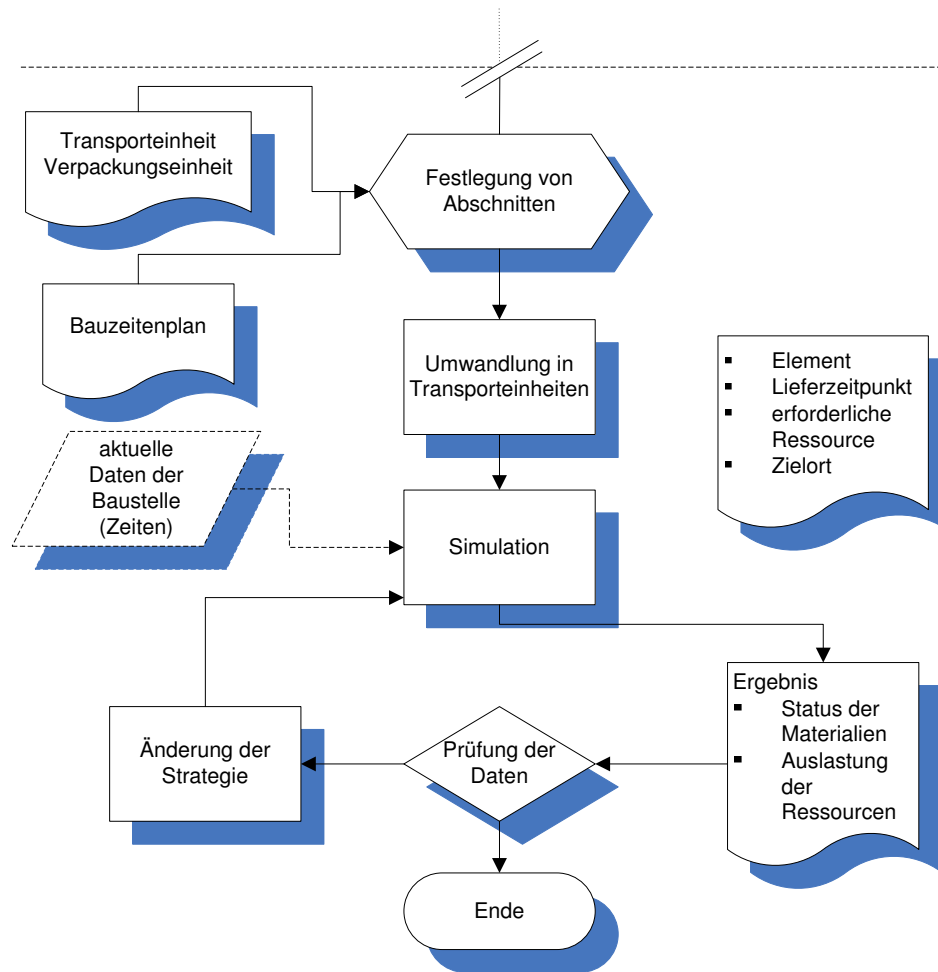


Abbildung 5.3: Vorgehensweise Teil 2

Die CAD-Tabellen wiederum bestehen aus Bauteiltabellen, wie

- Deckenelementen,
- Wandelementen,
- Stützen- und Balkenelementen,
- Tür- und Fensterelementen,
- sowie freien Objektelementen.

Der genaue Aufbau der Tabellen ist dem Anhang B zu entnehmen. Die *Bauteiltabellen* enthalten als geometrische Daten Abmessungen, Flächen und Volumina. Zusätzlich existieren, neben CAD spezifischen Angaben, Daten über Querschnitte, Materialien und Elementaufbauten.

Die *Analysetabellen* ermöglichen es, weitere Bauelemente zu generieren, die nicht explizit in der CAD gezeichnet wurden. Das sind im Wesentlichen Bewehrungen, die über die Bewehrungsgrade der Bauteilarten abgeleitet werden. Weitere Daten, wie erforderliches Schalmaterial, oder Gerüstmaterial, ließen sich ableiten, sind aber nicht Gegenstand der Untersuchung. Des Weiteren werden die Mengen der Bauelemente in die zur weiteren Verarbeitung übliche Einheit umgerechnet.

Die *Logistikdatentabellen* (vgl. B.1.1 und B.2) enthalten Angaben über logistische Materialeigenschaften. Das sind Handlingszeiten, Transport- und Umschlagmengen und lagertechnische Daten, wie Stapelbarkeit oder Lagerflächenbedarf. Diese Daten sind entweder nur bedingt von den tatsächlich eingesetzten Ressourcen oder vom Material selbst abhängig. Das bedeutet, dass die Logistikdatentabelle unabhängig vom Bauvorhaben ist und somit von Projekt zu Projekt weiter genutzt, ausgebaut und verfeinert werden kann.

In den *Planungsdatentabellen* werden dem Material, der Menge und dem Ort die Zeit zugeordnet. Diese baubetriebliche Planungsleistung wird im folgenden Kapitel beschrieben.

5.3.2 Baubetriebliche Aufbereitung der Daten

Das Bauwerk wird in räumliche Abschnitte gegliedert. Datenbankabfragen selektieren Bauelemente gleichen Materials und gleicher Abschnittszugehörigkeit. Durch die Koordinaten lassen sich Bauelemente innerhalb eines Abschnitts identifizieren (vgl. Abb. 5.4). Diesen Abschnitten, und damit den Bauelementen, ist eine Ankunftszeit zugeordnet.

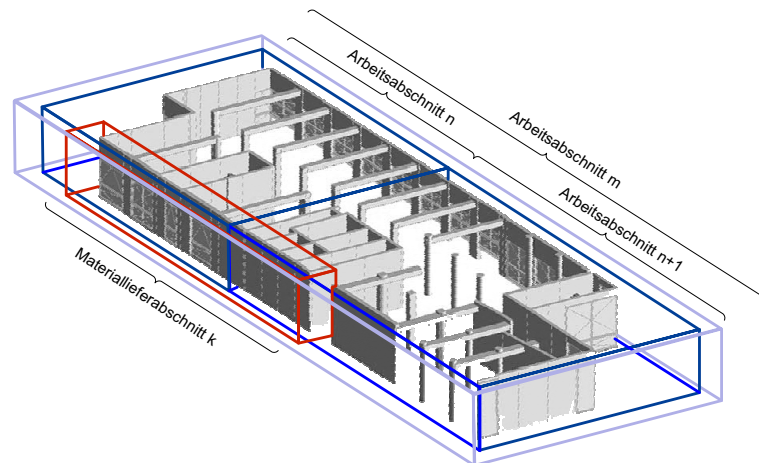


Abbildung 5.4: Arbeitsabschnitte-Materiallieferabschnitte

Zur Materialfluss-Steuerung werden Arbeitsabschnitte und Materiallieferabschnitte unterschieden. Die Arbeitsabschnitte dienen der Gliederung des Bauablaufs und korrespondieren mit dem Bauzeitenplan. Die Abbildung 5.5 zeigt einen screenshot einer Gantt-Darstellung der Arbeitsabschnitte. Dieses selbstentwickelte Programm dient der Visualisierung der Planungsdaten und deren Manipulation. Die Arbeitsabschnitte sind als Balken dargestellt, wobei die arbeitsfreien Zeiten berücksichtigt werden. Die Länge der Balken ergibt sich aus der durchschnittlichen Verarbeitungsdauer des Materials multipliziert mit der Materialmenge. Die zugehörigen Materiallieferabschnitte sind als Dreieck symbolisiert.

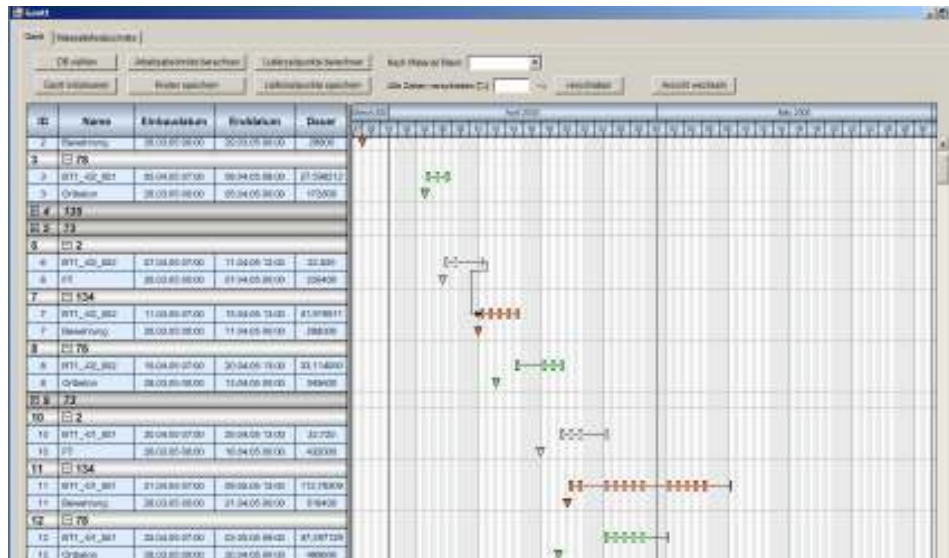


Abbildung 5.5: Darstellung der Arbeitsabschnitte und Materiallieferabschnitte in einem Gantt-Diagramm

Fertigungsprozesse auf Baustellen laufen abhängig von den Randbedingungen und baubetrieblichen Entscheidungen parallel oder seriell ab. Die Abbildung serieller und voneinander abhängiger Arbeitsabschnitte erfolgt durch die Koppelung von bis zu zwei Reihenfolgekriterien. Ein nachfolgender Abschnitt kann erst begonnen werden, wenn der vorhergehende abgeschlossen ist. In einer separaten Tabelle sind alle Arbeitsabschnitte in ihrer zeitlichen Reihenfolge abgelegt, wobei das *erste Reihenfolgekriterium* (vgl. Abb. 5.6) das der nacheinander einzubauenden Materialien ist. In der Tabelle werden die Anzahl der Bauelemente des Abschnitts (Soll-Werte) und die Ist-Werte (standardmäßig 0) gespeichert. In der Senke werden die Ist-Werte hochgezählt, sobald ein Bauelement eingebaut wird. Ein Arbeitsabschnitt ist abgeschlossen, sobald der Ist-Wert mit dem Soll-Wert übereinstimmt. Da aber zwangsläufig nicht alle Arbeitsabschnitte von einander abhängen, oder ein nachfolgender Arbeitsabschnitt nach einer teilweisen Fertigstellung

des vorangegangenen angefangen werden kann, können die Ist-Werte zur Entkopplung der Abschnitte auch vorbelegt werden. Wird der Ist-Wert mit $\alpha \cdot \text{Soll-Wert}$ vorbelegt, wobei $0 \leq \alpha \leq 1$ gilt, kann der nachfolgende Abschnitt bereits früher (für $\alpha > 0$) begonnen werden, bis hin zur vollständigen Entkopplung der Arbeitsabschnitte (für $\alpha = 1$).

Das *zweite Reihenfolgekriterium* (vgl. Abb. 5.6) ist ein fest vorgegebener beliebiger, Vorgängerabschnitt, der über seine ID eingegeben werden kann.

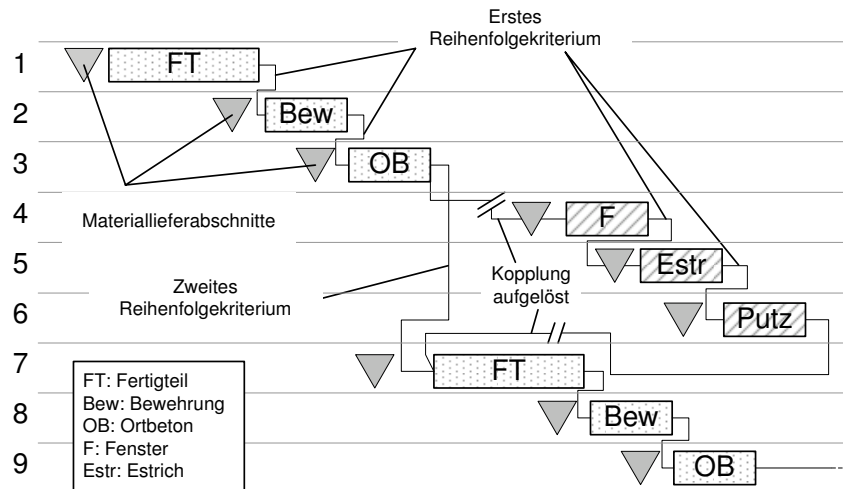


Abbildung 5.6: Kopplung der Arbeitsabschnitte

Die Reihenfolge kann frei geändert werden und auch die Größe der Arbeitsabschnitte ist unbeschränkt wählbar und je nach Material unterschiedlich. Die Materiallieferabschnitte sind genau wie Arbeitsabschnitte aufgebaut. Eine Trennung ist notwendig, um die Materiallieferungen von den Arbeitsabläufen zu entkoppeln. Beispielsweise können zu einem Arbeitsabschnitt mehrere Materiallieferabschnitte geplant werden, oder ein Materiallieferabschnitt wird zur Transportoptimierung um die Bauelemente des nächsten Arbeitsabschnitts erweitert. Der folgende screenshot (Abb. 5.7) zeigt die Maske in der die Manipulationen durchgeführt werden können. In der linken Spalte sind alle Materiallieferabschnitte aufgeführt, wobei diese nach einem Material gefiltert werden können. In der rechten Spalte stehen alle Bauelemente, die zu dem links ausgewählten Materiallieferabschnitt gehören. Die Bauelemente können einzeln oder als Gruppe ausgewählt und einem anderen Abschnitt zugeordnet werden. Ebenso ist es möglich einen weiteren neuen Materiallieferabschnitt zu erzeugen und die ausgewählten Elemente diesem zuzuordnen.

Die Bauelemente eines Arbeitsabschnitts sind nach einer der Koordinaten x oder y sortiert. So entsteht eine zeilenartige Einbaureihenfolge, die der Bau Praxis grundsätzlich entspricht. Bedeutung erhält die Reihenfolge bei der

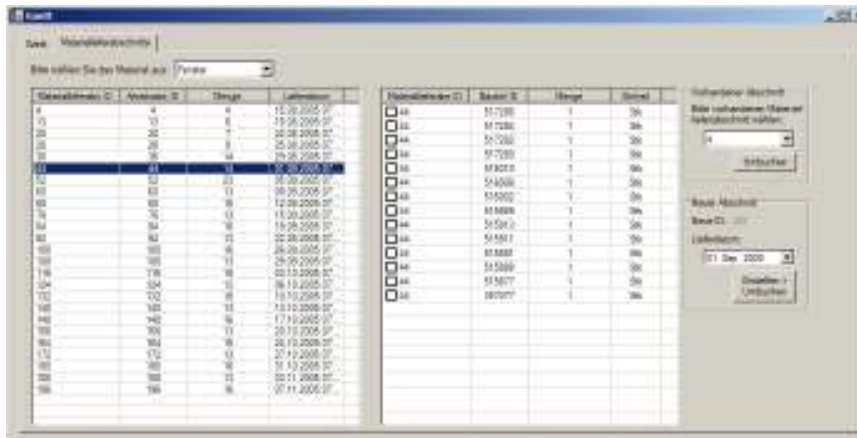


Abbildung 5.7: Manipulationsmöglichkeiten der Materiallieferabschnitte

verkürzten Lastfahrt in der *Kranspielzeitberechnung* für *Krane mit Katzausleger* (s. S. 39).

Zusammenfassend hat die Datenbank vier Aufgaben:

- Analyse der Mengen, Materialien und Orte;
- Verbindungsglied von Mengen/Material mit dem Bauzeitenplan;
- Verknüpfung von logistischen Eigenschaften mit dem Material;
- Steuerungsinstrument für die Simulation.

Die Datenbank bereitet die Daten so auf, dass sie direkt vom Simulator eingelesen und verarbeitet werden können. Über eine ODBC-Schnittstelle ist sie an den Simulator angeschlossen und kann über SQL-Befehle angesteuert werden. Aus Performance Gründen werden alle Daten bei der Initialisierung in internen Programmtabellen gespeichert. Eine nähere Erläuterung der Tabelleninhalte erfolgt in den entsprechenden Unterkapiteln. Die 'Aufträge' durchlaufen die in Kapitel 5.5 beschriebenen Atome.

5.4 Konzeptionelles Modell

5.4.1 Zielsetzung

Bei Logistikprozessen im Baubetrieb sind Simulationen hauptsächlich im strategischen Bereich, also vor einer Baumaßnahme, relevant. Die durch die Arbeitsvorbereitung oder einen Logistiker geplanten Strategien sind mit der Simulation prüfbar. Die folgenden Fragestellungen weisen auf die Zielgrößen der Simulation hin.

- Ist der Bauzeitenplan in sich stimmig?
- Sind die geplanten Ressourcen optimal genutzt?
- Kommt es an Knotenpunkten zu Wartezeiten?
- etc.

Die Fragestellungen und Zielgrößen müssen bereits im Aufbau des konzeptionellen Modells berücksichtigt werden, damit das Computermodell die erforderlichen Ergebnisse erzeugt.

5.4.2 Aufbau und Struktur

Als Systemgrenze (vgl. Abb. 5.8) wird die Baustelleneinfahrt gesetzt, da der Schwerpunkt die Produktionsstätte (Baustelle), der Ort der hauptsächlichen Wertschöpfung ist, und dort Produktivitätssteigerungen, oder -verluste die größten Auswirkungen darstellen. Die betrachtete Prozesskette endet mit

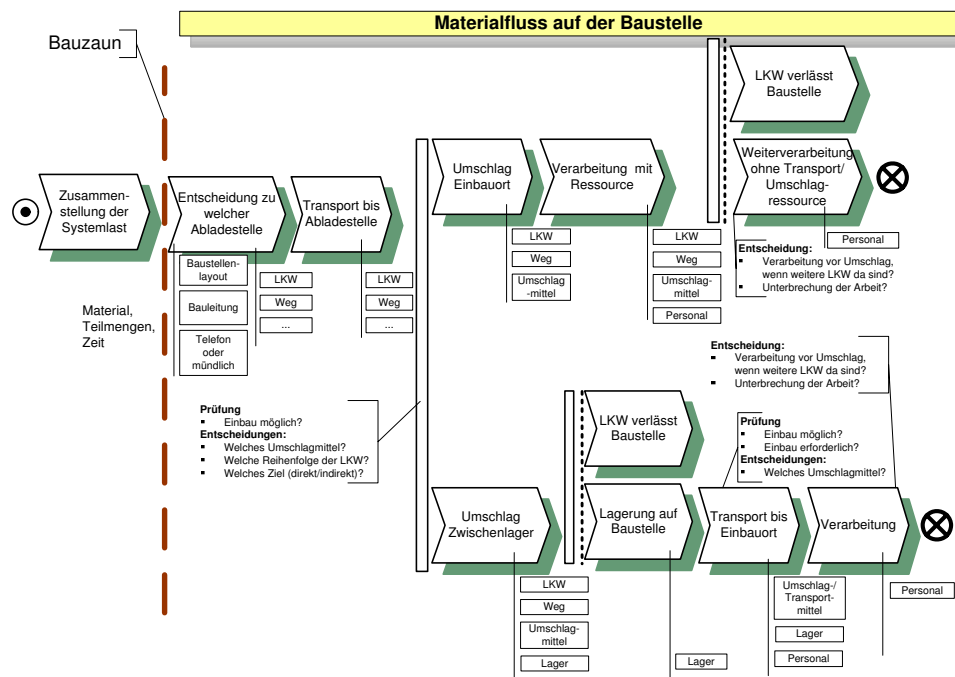


Abbildung 5.8: Allgemeine Prozesskette Baustelle

dem Erreichen des Materials am Einbauort. Im Modell werden die am Materialfluss beteiligten Ressourcen als Module, mit bestimmten Eigenschaften und Leistungen hinterlegt und so miteinander verknüpft, dass sie interagieren können. Diese Module sind allgemein gehalten, so dass sie für beliebige

Baustellen eingesetzt werden können. Das Modell ist strukturorientiert, d. h. die Lage der Module ist durch Koordinaten beschrieben, die auf die CAD-Daten des Gebäudemodells abgestimmt sind.

Die Systemlast erfasst diejenigen Materialmengen, die unmittelbar zum Produkt 'Bauwerk' gehören. Nicht von der Systemlast abgebildet werden:

- Transporte von Sekundär- und Terziärgüter, also Bauhilfsstoffe und Verbrauchsmaterial, sowie Schalungs- und Gerüstmaterial.
- Personenverkehre und -transporte.
- Entsorgungsverkehre und -transporte.

Diese Nebenprozesse sind nicht unmittelbar aus der Systemlast abzuleiten, verursachen aber ebenfalls Transport-, Umschlag- und Lagerprozesse. Bei der Interpretation der Ergebnisse sind die Nebenprozesse zu berücksichtigen, da diese z. T. ebenfalls Ressourcenkapazitäten beanspruchen.

Die Abbildung 5.9 zeigt den Ablauf der Simulation in Form eines vereinfachten Flussdiagramms. Die einzelnen Elemente korrespondieren mit sogenannten *Atomen*, die in dem folgenden Kapitel (5.5) näher beschrieben werden. In der Abbildung sind die Elemente durch einen stärkeren Rahmen¹ gekennzeichnet, bei denen ein Zeitverbrauch stattfindet. Die Pfeile, die nach oben zurückweisen, wurden nur exemplarisch eingezeichnet.

¹Aus optischen Gründen wurde dies nur bei einem Element jeder Art gemacht

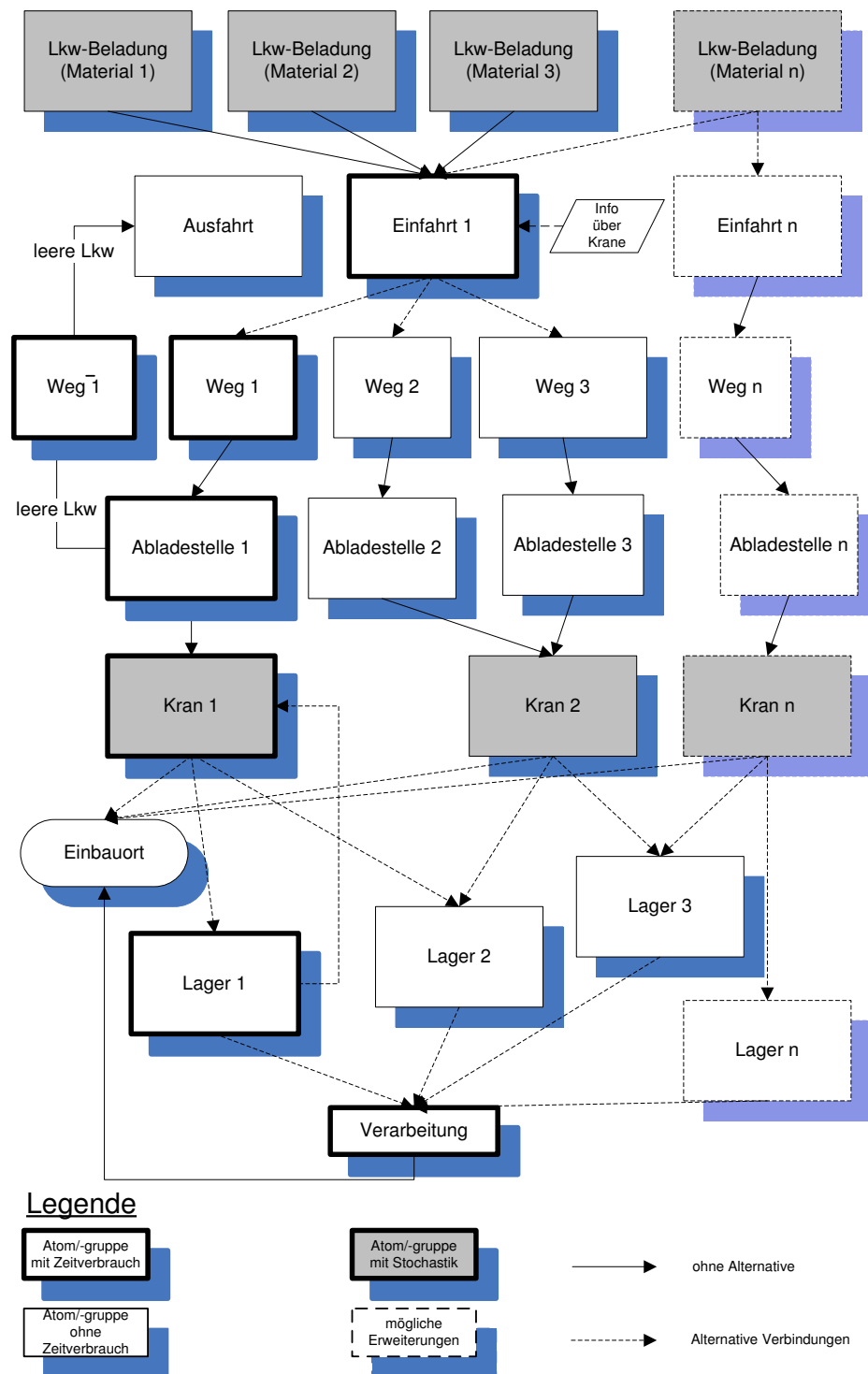


Abbildung 5.9: Ablauf der Simulation

5.5 Die Atom-Bibliothek von SIMUBAU

Das entwickelte konzeptionelles Modell für eine Hochbau-Baustelle ist 'allgemein' gültig. Für ein konkretes Simulations- bzw. ComputermodeLL müssen die Anzahl der Elemente, die Leistungsparameter und die Lage im Raum sowie die zu untersuchenden Strategien festgelegt werden.



Abbildung 5.10: Die Atom-bibliothek von SIMUBAU

Da SIMUBAU auf dem Atomkonzept der Simulationsumgebung aufbaut, kann ein ComputermodeLL eines konkreten Bauvorhabens relativ schnell und flexibel aufgebaut werden. Hierzu werden die Atome aus der Libery im Layout positioniert und die Leistungsparameter gesetzt. Des Weiteren müssen die Atome entsprechend ihrer Aufgabe verbunden werden.

Die Atome bzw. Atomgruppen (vgl. Abb. 5.10), die für SIMUBAU entwickelt wurden, werden im Folgenden vorgestellt. Soweit möglich erfolgt die Beschreibung in der Reihenfolge des konzeptionellen Modells. Die Atombeziehungen werden anhand von Ausschnittsvergrößerungen des Übersichtsbildes 5.9 und screenshots der Atome in der Simulationsumgebung erläutert.

5.5.1 Bauelemente

Die VDI 3633 ([VDI 3633-1]) bezeichnet die Systemlastdaten als Aufträge, die im Fall von SIMUBAU Bauelemente sind (vgl. Kap. 5.2). Die Bauelemente sind die BEO, auch *Produkte* genannt, des Modells. Die Menge des Baustoffs ist eine Eigenschaft des BEOs (vgl. 5.2) und je nach Material/Baustoff in $[m^3, t, \text{ oder } Stk.]$ angegeben, d. h. es werden alle üblichen Mengeneinheiten im Modell verarbeitet. Das hat den Vorteil, dass alle Bauelemente unmittelbar ihren Liefereinheiten zuzuordnen sind. Die Liefereinheiten

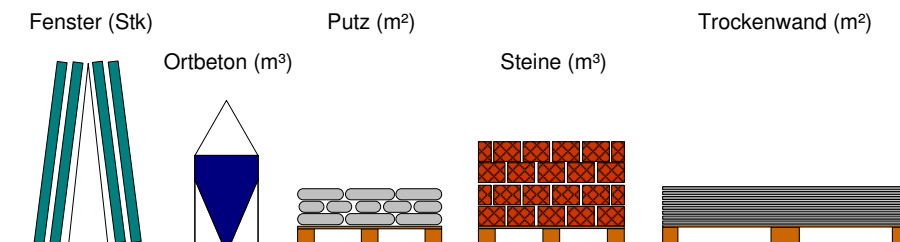


Abbildung 5.11: Verschiedene Liefereinheiten

gliedern die Bauelemente in Größen, in denen sie umgeschlagen werden. Die Menge gleichartiger Bauelemente kann stark variieren. Die Anzahl der BEO bestimmt nicht die Auslastung der Ressourcen, sondern die Summe der Materialmengen der BEO². Dieser Umstand ist bei der Bestimmung der Transport- und Liefereinheiten berücksichtigt. In der Auswertung ist nicht

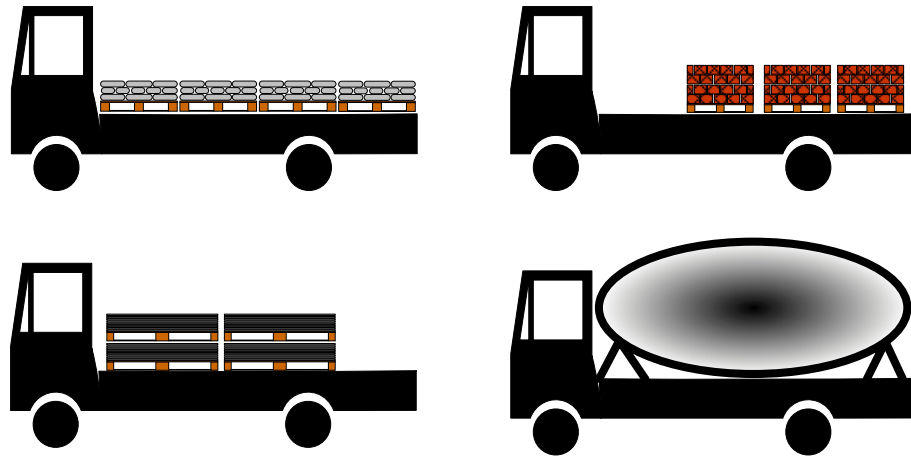


Abbildung 5.12: Transporteinheit

der Durchsatz (Anzahl pro Stunde) die entscheidende Kenngröße, sondern die Summe der BEO-Mengen pro Stunde. Die weiteren Eigenschaften der Bauelemente werden durch mehrere *Label* verwaltet. Label sind Variablen, die dem einzelnen Bauelement zugeordnet sind und an jeder Stelle im System ausgelesen oder verändert werden können. Die Label sind Tabelle 5.2 zu entnehmen.

label	Bedeutung
ziel_x	Zielkoordinate x
ziel_y	Zielkoordinate y
ziel_z	Zielkoordinate z
MatlieferID	Materiallieferabschnitt
Menge	Menge in $[m^3, t, \text{ oder } Stk.]$
Material	Material nach tbl_Material
Arbeitsabschnitt	Arbeitsabschnitts ID

Tabelle 5.2: Label der Bauelemente

Die Summe der Mengen aller Bauelemente entspricht der Gesamtmenge eines Baustoffs. Entsprechende Filterungen ermöglichen es, Teilmengen von

²Eine Ausnahme bildet natürlich die Mengeneinheit *Stk.*, da diese gleich der Anzahl der BEO ist.

bestimmten räumlichen Einheiten zu bilden (z. B.: erforderliche Ortbetonmenge im 3. OG).

5.5.2 Lkw-Beladung

Der erste Schritt in der Simulation besteht darin, die Bauelemente sortenrein einem Transportmittel zuzuordnen und sie mit diesem materiallieferabschnittsweise in das System einzuführen (vgl. Abb. 5.13 und Übersicht Abb. 5.9).

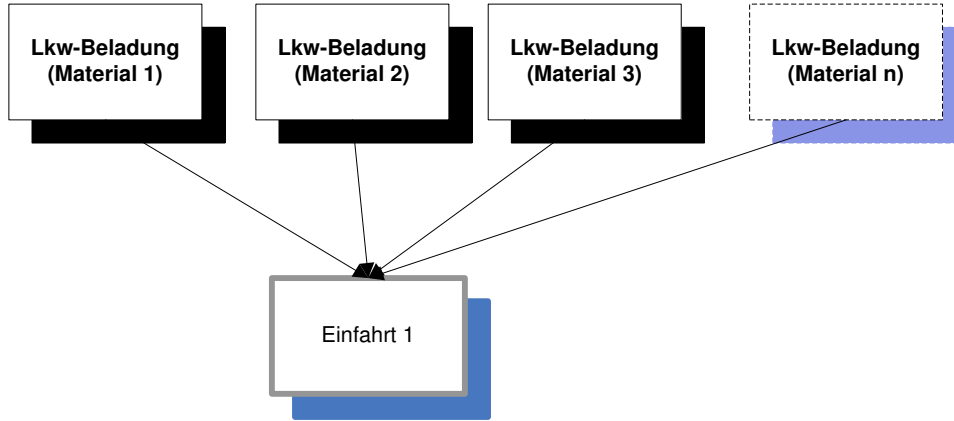


Abbildung 5.13: Lkw-Beladung

Die *Lkw-Beladung* besteht aus sechs Atomen der Logistik-Suite. Aus Abfragen auf die Datenbank ergeben sich alle sortenrein zusammengestellten Bauelemente, die mit einem Zeitstempel, dem Lieferzeitpunkt, versehen sind. Diese sind in der *arrival-list* gespeichert und werden gleichzeitig erzeugt, wenn sie zum selben Materiallieferabschnitt gehören. Abhängig von diesem werden sie in eine *queue* geleitet. Der *assembler* verknüpft die Bauelemente mit *containern* (Lkw). Die Zuordnung erfolgt mit Hilfe der MateriallieferID, über die die Anzahl pro Lkw gesteuert wird. In der Datenbank (vgl. Kap. 5.3) sind zu jedem Material Transporteinheiten (vgl. 5.12) gespeichert.

Eine Transporteinheit ist die Menge, die ein Lkw ($M_{Lkw,Mat}$) transportieren kann. Im Stückgutbereich ist die Menge in *Stk* gleich dem Bauelement. Hier wird vereinfachend eine Anzahl pro Lkw festgelegt. Da Bauelemente, die in m^3 , m^2 oder t angegeben sind, unterschiedliche Mengen beinhalten, wird die Anzahl der Lkw pro Materiallieferabschnitt über die Gesamtmenge M eines Materiallieferabschnitts j berechnet. Die Anzahl der Bauelemente pro Lkw ergibt sich aus der Gesamtzahl der Bauelemente n geteilt durch die Anzahl der Lkw.

$$M_{j,BE} = \sum_{i=1}^n m_{i,BE} \text{ in } [m^3, m^2, \text{ oder } t] \quad (5.1)$$

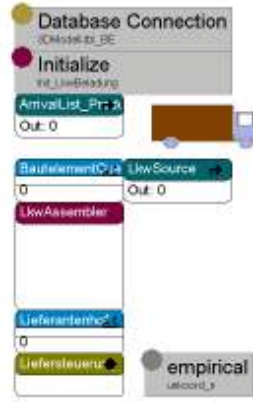


Abbildung 5.14: Lkw-Beladung-Atomgruppe

$$\#Lkw = \frac{M_{j, BE}}{M_{Lkw}} \quad (5.2)$$

$$\# BE / Lkw = \frac{n}{\#Lkw} \quad (5.3)$$

mit

- M = Gesamtmenge
- j = Index für Materiallieferabschnitt
- BE = Bauelement
- n = Anzahl Bauelemente pro Materiallieferabschnitt
- m = Einzelmeng eines Bauelementes
- i = Index für Bauelement
- M_{Lkw} = Menge pro Lkw

Im Durchschnitt wird damit die ladungsbegrenzende Menge pro Lkw eingehalten. Im Extremfall können einige Lkw überladen, bzw. nicht ausgelastet sein, wenn die Mengen pro Bauelement stark schwanken. Sinnvoll ist es daher, große Bauteile, wie Bodenplatten, in mehrere kleine Bauteile aufzuteilen, damit der Einzelfehler nicht zu groß wird. Dies ist bei der Auswertung der Standzeiten der Lkw zu berücksichtigen. Im Mittel sind die Kranzeiten pro Lkw, die Anzahl der Lkw und damit auch die mittleren Standzeiten korrekt. Die Lkw-Beladung erzeugt auch Teilladungen, sollte die Gesamtmenge geteilt durch Transporteinheit nicht ganzzahlig sein.

Die Lkw eines Lieferabschnitts unterliegen einer Anliefersteuerung. Sie werden zwar gleichzeitig erzeugt, aber in einer bestimmten zeitlichen Reihenfolge zur Baustelle geschickt. SIMUBAU unterscheidet zwei Anlieferkonzepte. Das erste betrifft im Wesentlichen den Rohbau, bei dem der Kran als Einbaumittel fungiert und stark in den Bauprozess eingebunden ist. Die Anlieferung muss deshalb mit dem Bauprozess korrelieren. Die Lieferzeitpunkte sind bis auf die Stunde genau festgelegt, um einen kontinuierlichen Bauprozess zu

gewährleisten. Die Steuerung erfolgt i. d. R. durch die Bauleitung. Daher kann man von einer getakteten Belieferung ausgehen. Der Einfluss von Staus und sonstigen Lieferverzögerungen wird stochastisch erfasst. Die Taktung (z. B. alle 30 min ein Lkw) ab dem zweiten Lkw besteht aus einem deterministischen und einen stochastischen Anteil. Den stochastischen Anteil bildet eine rechtsschiefe kontinuierliche Verteilung, da man davon ausgehen kann, dass unvorhergesehene verkehrliche Situationen eher zu Verspätungen führen, als zu vorzeitigem Ankommen [Wil77]. Hierfür wird eine *Erlang*-Verteilung mit dem Faktor $k=2$ gewählt. Der deterministische Anteil ergibt sich aus der erwarteten Ankunftszeit minus dem linksseitigen p-Quantil.

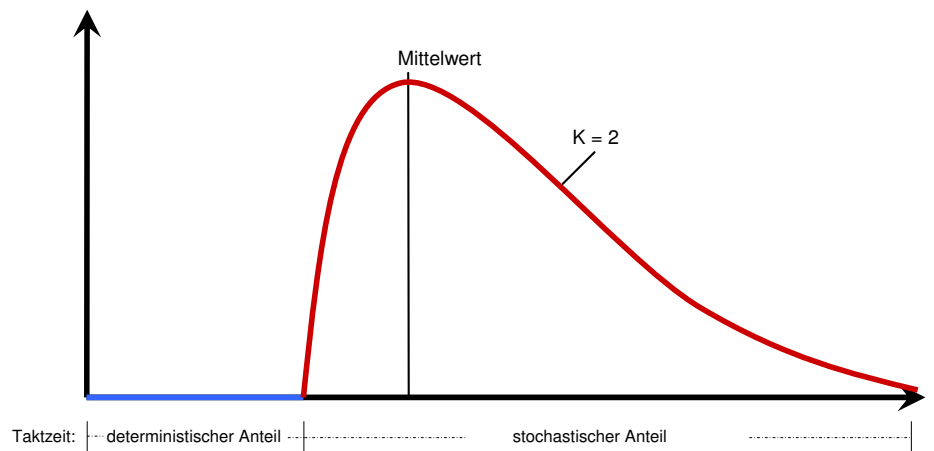


Abbildung 5.15: Deterministischer und stochastischer Anteil der Lkw-Taktung

Vereinfachend kommt der erste Lkw immer zu Arbeitsbeginn eines Tages (Planung). Ein zu frühes Ankommen ist auf Grund des zeitlichen Übergangs im Simulationszeithorizont nicht möglich (Ende Tag n = Anfang Tag $n+1$). Ein vorzeitiges Ankommen ist für die Fragestellungen der Simulation nicht relevant, da zu diesem Zeitpunkt noch nicht gearbeitet wird. Als stochastische Verteilung wird (ohne deterministischen Anteil) eine *Negativeponential*-Verteilung angesetzt.

Das zweite Anlieferkonzept nutzt den Kran als Umschlagmittel und wird nicht zentral gesteuert. Die Nachunternehmer (=NU) lassen unabhängig von einander (unkoordiniert) Material anliefern. Da alle Lkw-Beladungs-Module unabhängig von einander sind, können diese auch unabhängig von einander gesteuert werden, welches der eigenständigen Disponierung der beteiligten Akteure entspricht. Alle Lkw-Beladungs-Module sind mit dem Atom Einfahrt, Disposition verknüpft.

In SIMUBAU ist die Annahme hinterlegt, dass Material eines Materiallieferabschnitts innerhalb von zwei Tagen vor dem Beginn des zugehörigen

Arbeitsabschnitts geliefert wird. Dabei wird für den ersten Lkw von einer gewichteten Gleichverteilung (Abb. 5.16) ausgegangen³. Die Gewichtung kommt dadurch zustande, dass Speditionen bevorzugt in den Morgenstunden und kurz nach der Mittagszeit anliefern. Wegen der fehlenden Koordination ist diese Verteilung die Ausgangs- bzw. die Anfangssituation. Sollte mehr als ein Lkw für eine Materialliefereinheit erforderlich sein, folgen die weiteren Lkw in der gleichen zeitlichen Reihenfolge wie beim ersten Lieferkonzept. Die erwartete Ankunftszeit wird dem entsprechenden Material angepasst, da je nach Material unterschiedliche Abladezeiten zugrunde gelegt werden müssen, die mit den erwarteten Ankunftszeiten korrelieren.

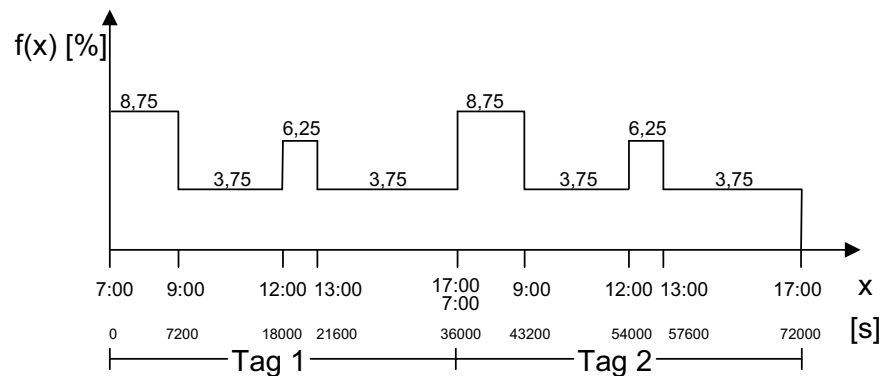


Abbildung 5.16: Gewichtete Gleichverteilung

5.5.3 Einfahrt

In der *Einfahrt* kommen die in der Lkw-Beladung erzeugten Lkw an und werden von dort den Abladestellen zugeordnet.

Das Atom ist von dem Standardatom *queue* abgeleitet. Die Verteilung der Lkw auf die Krane (Abladestellen) erfolgt nach zwei gestaffelten Kriterien. Zunächst wird geprüft, welche Krane die Zielorte der Bauelemente im Lkw erreichen können. Sollte kein Kran alle Bauelemente in seiner Reichweite haben, werden die Krane (mindestens ein Kran) ausgewählt, die die meisten Bauelemente verarbeiten können. Danach wird aus dieser Gruppe der nächste freie Kran angefahren. Sind mehrere Krane gleichzeitig frei wird der Kran mit der niedrigsten Ausgangskanalnummer angefahren, so dass die Verteilung hierarchisch ist. Diese Hierarchie bildet den in der Baupraxis häufig anzutreffenden Hauptkran ab. Welcher Kran für die Ladung eines Lkw optimal ist, beruht meist auf dem Erfahrungswissen der Bauleitung

³Expertengespräch mit Herrn Goetz, Geschäftsführer der Bauserve GmbH vom 15.03.2006

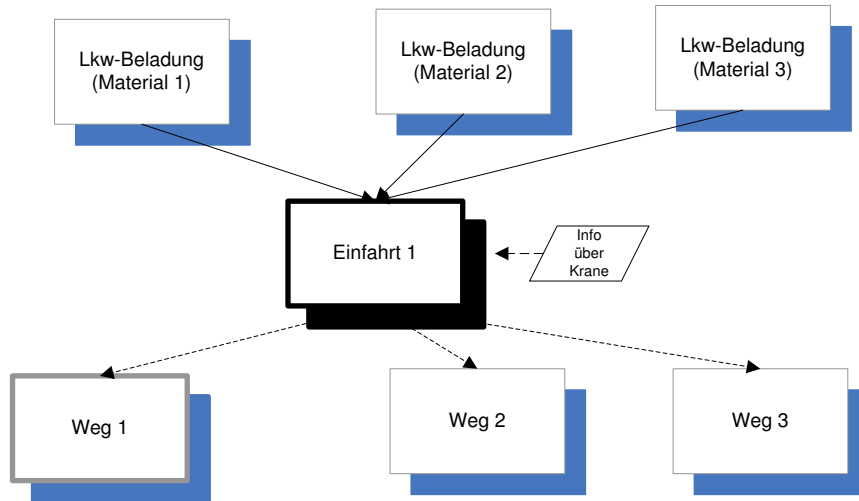


Abbildung 5.17: Einfahrt

und wird in der Regel mündlich oder fernmündlich an den Lieferanten weitergegeben. Den seltenen Fall, dass der falsche Kran angefahren wird und ein Umrangieren erfolgt, ist in SIMUBAU nicht berücksichtigt.

Ortbeton hat als 'verderbliche' Ware auf der Baustelle Vorrang. Ortbetonfahrzeuge werden anderen wartenden Fahrzeugen vorgezogen, eine bereits begonnene Entladung wird allerdings nicht unterbrochen, so dass es auch für Betonfahrzeuge zu Wartezeiten kommen kann. In dem Atom werden die Lkw entsprechend dieser Regel sortiert.

Pro Abladestelle ist nur ein Lkw zugelassen und sie ist erst wieder frei, wenn der Lkw die Baustelle wieder verlassen hat. Die Lkw (*container*-Atome) erhalten hier zwei Zeitstempel mit denen eine eventuelle Wartezeit am Eingang und die Durchlaufzeit erfasst wird.

5.5.4 Initialisierung

Die Atomgruppe *Initialisierung* dient der Erstellung und Vorbelegung interner Tabellen im Programm. Die Tabellen enthalten materialspezifische Eigenschaften, Informationen über den Baufortschritt und globale Lageeigenschaften und wurden in einer eigenen Atomgruppe angelegt, da von verschiedenen Atomen auf die Tabellen zugegriffen wird. Die ausführliche Beschreibung der Felder ist dem Anhang B zu entnehmen. Weitere Initialisierungen und Vorbelegungen von Werten erfolgt in den Atomgruppen, zu denen die Werte gehören. Die Atomgruppe verfügt weder über Eingangs- noch Ausgangskanäle.

5.5.5 Wege

Die Wege sind im Modell Verbindungen von der Einfahrt zu den Abladestellen und zurück, bei denen ein Zeitverbrauch stattfindet. Dieser ergibt sich aus der Entfernung und der pro Abschnitt angegebenen durchschnittlichen Geschwindigkeit. Abschnitte sind einzelne Kurven- oder Geradenelemente, die den Gesamtweg durch die Verknüpfung untereinander bilden.

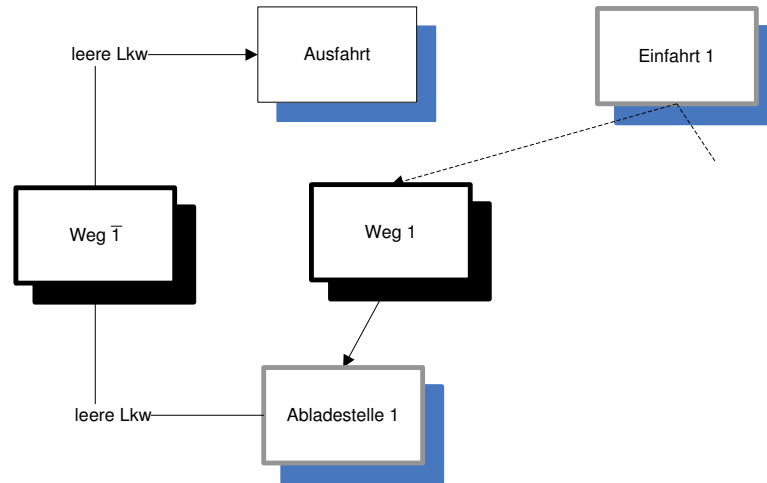


Abbildung 5.18: Wege

Es kommen die Originalatome, die *non accumulating conveyor* der Logistik-Suite, zum Einsatz. Die Lkw sind nicht 'selbstfahrend', sondern werden als *container* von den Wegen (*conveyor*) transportiert, was im Ergebnis keinen Unterschied macht.

Die Atome benötigen keine weiteren bauspezifischen Änderungen. Die Wege setzen sich aus den entsprechenden Teilstücken von Kurven und Geraden zusammen.

Folgende Festlegungen und Vereinfachungen wurden getroffen:

- Wenderadien sind mit 10 m nach [Sch01] angesetzt;
- konstante Geschwindigkeit pro Abschnitt;
- Approximation von Anfahr- oder Bremsbewegungen durch Verkleinerung der Abschnitte mit eigenen konstanten Geschwindigkeiten;
- kein stochastischer Einfluss abgebildet.

Die Vereinfachungen sind durch den geringen Einfluss der Wege zu rechtfertigen. Die Wege beeinflussen sich nicht gegenseitig (keine kreuzenden

Materialflüsse) und der Zeitverbrauchsanteil auf den Wegen ist gering. Die aus Überschlagsrechnungen gewonnenen Werte für Durchschnittsgeschwindigkeiten sind Tabelle 5.3 zu entnehmen.

Weg	Max. Geschw.	Max. Geschw.	einseitig	zweiseitig
[m]	[km/h]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
5	10	2,8	1,7	0,6
10	10	2,8	2,2	1,7
15	10	2,8	2,4	2,1
20	10	2,8	2,5	2,2
25	10	2,8	2,6	2,3
35	30	8,3	4,2	0,1
40	30	8,3	4,7	1,1
45	30	8,3	5,1	1,9
50	30	8,3	5,4	2,5
55	30	8,3	5,7	3,1
60	30	8,3	5,9	3,5
65	30	8,3	6,1	3,9
70	30	8,3	6,3	4,2
75	30	8,3	6,4	4,5
80	30	8,3	6,5	4,7

Tabelle 5.3: Durchschnittliche Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der Gesamtstrecke und der Maximalgeschwindigkeit

Die Werte gelten unter der Annahme, dass

- die Maximalgeschwindigkeit vorwärts 30 km/h und rückwärts 10 km/h beträgt;
- die Anfahr- und Bremsbeschleunigung 1 m/s^2 beträgt;
- der Lkw aus dem Stand linear bis zu der Maximalgeschwindigkeit beschleunigt und die Geschwindigkeit bis zum Ende der Strecke aufrecht erhält ('einseitig').

Wird nach Erreichen der Maximalgeschwindigkeit wieder auf Null abgebremst gelten die Werte der Spalte 'zweiseitig'. Erreicht der Lkw die Maximalgeschwindigkeit nicht (vgl. auch Abb. 3.12 von Unterabschnitt 5.5.7) oder sind die Wegeführungen komplexer, sind genauere Untersuchungen notwendig. Modellanpassungen sind einfach durchzuführen.

Nach der Entladung der Lkw (vgl. folgendes Kapitel) fahren sie wieder auf einem anderem Weg zur Einfahrt zurück (vgl. Abb. 5.18. Verlässt der Lkw das System, wird die aktuelle Simulationszeit und die Verweildauer ab dem

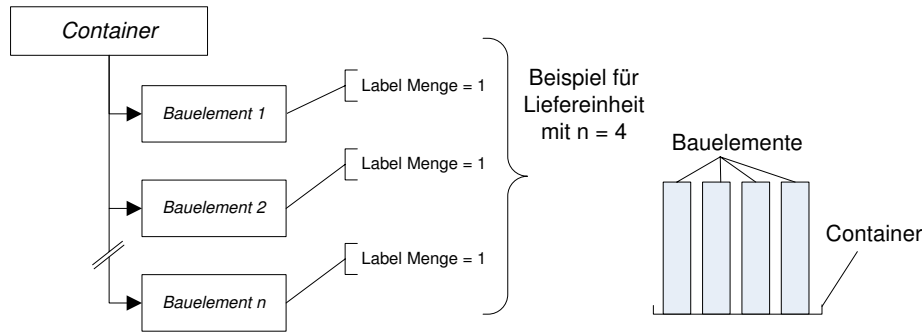


Abbildung 5.20: Stückgut-Liefereinheiten

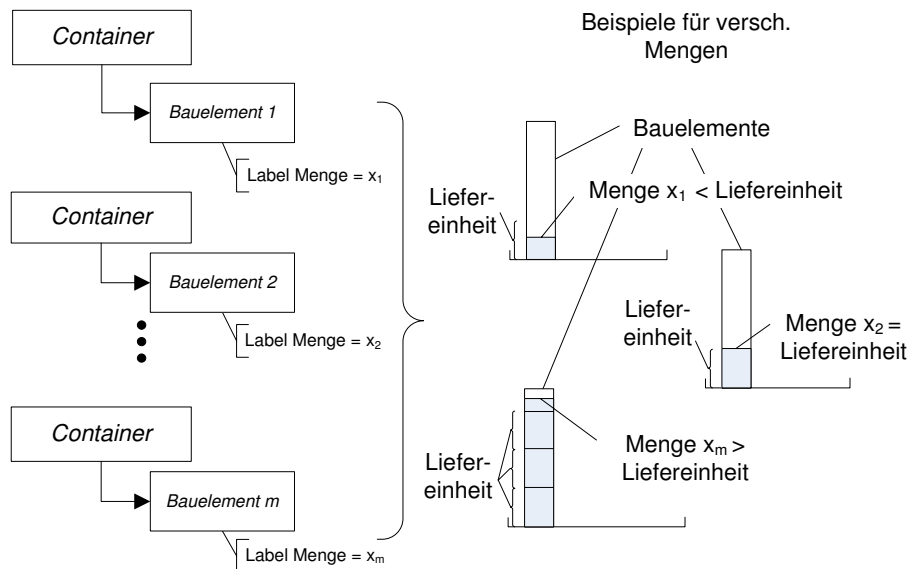


Abbildung 5.21: Nicht Stückgut-Liefereinheiten

Dadurch können alle Bauelemente auf die gleiche Weise verarbeitet werden, unabhängig von der Mengeneinheit.

Die Bauelemente, die zu einer Liefereinheit zusammengefasst sind, können nicht direkt zum Einbauort umgeschlagen werden, da unterschiedliche Zielkoordinaten vorhanden sind. Diese Bauelemente und Bauelemente eines Arbeitsabschnitts, dessen Vorgängerabschnitt noch nicht fertig gestellt ist, werden über das Kranmodul in ein Lageratom umgeschlagen. Ein Lageratom kann den Status vorhanden/nicht vorhanden und voll/nicht voll haben. Der erste Status wird für die Einrichtung von temporären Lägern genutzt, der zweite ergibt sich aus dem Platzbedarf der eingelagerten Bauelemente im Verhältnis zur vorhandenen Lagerfläche. Die Lagerdaten sind in der Tabelle `tbl_Lager` der Atomgruppe *Initialisierung* (vgl. 5.5.4) gespeichert.

Das Programm berechnet die Abstände (Luftlinie) aller Bauelemente zu allen vorhandenen und nicht vollen Lägern. Der Transport erfolgt in das Lager, welches am nächsten zu allen Einbauorten einer Liefereinheit liegt. Das Hauptlager hat immer den Status 'vorhanden' und 'nicht voll', um einen Deadlock zu verhindern. Der *container* erhält die Nummer des gewählten Lagers. Das Verfahren wird auch für die *container* angewendet, die nur ein Element enthalten, da das optimale Lager für den Fall bekannt sein muss, wenn der Vorgängerabschnitt nicht fertig sein sollte.

5.5.7 Kranmodul

Das Kranmodul simuliert einen ortsfesten Turmdrehkran, durch die Berechnung der Bewegung des Kranhakens unter Berücksichtigung des Bauteilkonzepts. Die Zahl der Kranspiele richten sich nach den Mengen $m_{i, BE}$ der Bauelemente nicht nach deren Anzahl.

Das Kranmodul basiert auf einem *server*-Atom der Logistik-Suite und ist mit der Lkw-Entladung über den Eingangskanal sowie mit dem Lager, bzw. dem Einbauort über Ausgangskanäle verbunden.

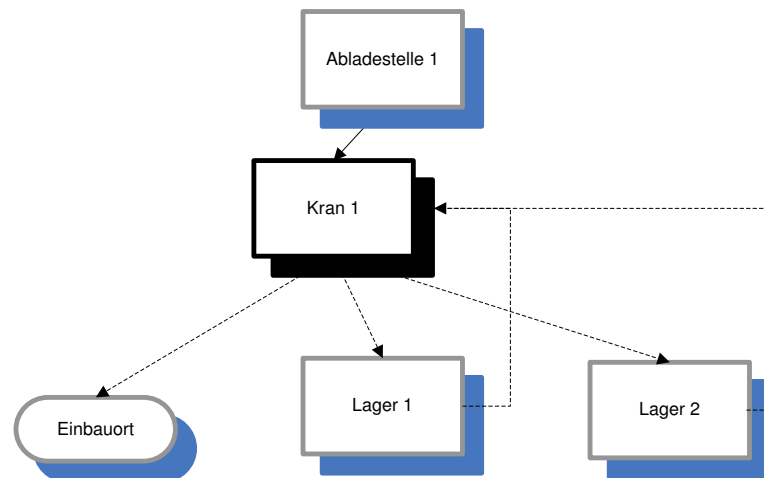


Abbildung 5.22: Kranmodul

Zur Aufzeichnung der Krandaten wird eine eigene Tabelle **Kranzeit_n**, mitgeführt, wobei das 'n' für die Zahl des Krans steht, für den Fall dass mehrere Krane im Einsatz sind. Neben dem Material wird die endgültige 'CycleTime', die aktuelle Simulationszeit und der Name des Bauelements gespeichert.

Der Zeitverbrauch ('CycleTime') ist die wesentliche Kenngröße dieser Resource, die sich auf *ein Bauelement* bezieht. Sie unterscheidet sich wie im Folgenden erläutert von der Kranspielzeit, die sich auf *einen Transportzyklus* bezieht. Die Bewegungen Heben/Senken, Katzfahrt und Drehen werden

einzelnen berechnet. Dazu ist eine Umrechnung der Kartesischen Koordinaten in Zylinderkoordinaten erforderlich. Der Kranmittelpunkt bildet dabei den Nullpunkt des Zylinderkoordinatensystems. Die Startkoordinaten ermitteln sich aus der Lage der Abladestelle. Die Zielkoordinaten sind bei dem Direktteinbau eines einzelnen Bauelementes die des Elementes selbst, oder bei dem Umschlag in ein Lager, die des angesteuerten Lagers.

Ob ein einzelnes Bauteil ins Lager umgeschlagen wird – mehrere werden immer in ein Lager umgeschlagen – wird im Kranmodul entschieden und hängt von dem vorausgehenden Arbeitsabschnitt ab. Ist dieser abgeschlossen, d. h. sind alle Bauelemente dieses Abschnitts eingebaut, kann das Bauelement direkt eingebaut werden. Das ist der Normal-/Idealfall im Rohbau (vgl. Anlieferkonzepte im Atom *Lkw-Beladung*). Durch eine Vorbelegung kann die Abhängigkeit ganz oder teilweise ausgeschaltet werden (vgl. Abb. 5.4), dann wird direkt eingebaut, wenn die Bedingung des abgeschlossenen Vorgängerabschnittes erfüllt ist. Ein weiteres Kriterium für den Umschlag ins Lager ist die Reichweite des Krans. Bei ihrer Überschreitung wird das Bauelement ins Lager umgeschlagen, welches allerdings auch zum Deadlock führt, da das Bauelement von dort nicht eingebaut werden kann und der Arbeitsabschnitt nicht abgeschlossen werden kann. Dieser gesteuerte Deadlock dient der Überprüfung der Kranreichweiten für alle Bauelemente von den jeweiligen Kranstandorten.

Alle Arten von Materialien werden mit dem Kran umgeschlagen. Aus der Tabelle `tab_Material` (vgl. B.1.1) werden materialspezifische Eigenschaften wie Anschlag- und Abgabezeiten und die maximal transportierbare Menge in der korrespondierenden Einheit abgefragt. Diese Daten werden bei der Berechnung der 'CycleTime' berücksichtigt. Die Basis der 'CycleTime'-Berechnung bildet die Kranspielzeit nach 3.3.2, wobei das Bauteilkonzept der Simulation berücksichtigt werden muss. Wie in *Bauelemente* beschrieben, ist die Baustoffmenge eines Bauelementes entweder kleiner, größer oder genau gleich der Menge, die der Kran auf einmal transportieren kann (Krankapazität). Je nach Mengeneinheit wird dieser Umstand unterschiedlich behandelt.

Ist die Anzahl der Bauelemente im *Stückgutbereich* (vgl. Kap. *Lkw-Entladung* S. 85) größer als die Krankapazität, werden so viele Bauelemente in einem *container* zu einer *Liefereinheit* zusammengefasst, wie die Krankapazität es ermöglicht (im Beispiel der Abb. 5.20 $n=4$). Für die entstandene Liefereinheit ergibt sich genau ein Kranspiel nach Abbildung 3.11. Ist die Anzahl gleich (Liefereinheit = 1 Stk), ergibt sich ebenfalls genau ein Kranspiel. Der Fall, dass die Menge kleiner ist als die Krankapazität (Liefereinheit < 1), ist nicht möglich und wird daher nicht betrachtet.

Im *Nicht-Stückgutbereich* (vgl. Abb. 5.21) mit den Mengeneinheiten (m^3 , m^2 oder t) muss mit gebrochenzahligen Mengen gerechnet werden. Es sind

die Fälle „kleiner, größer oder genau gleich“ zu unterscheiden. Es entstehen zwei Grundfälle, die der Abbildung 5.23 zu entnehmen sind. Fall 1 beschreibt den Normalfall eines Kranspiels nach Abb. 3.11, Fall 2 den Sonderfall einer verkürzten Lastfahrt. Der Sonderfall tritt dann auf, wenn der Quotient aus der Menge des i -ten Bauelements und der Krankapazität nicht ganzzahlig ist. Bei der Berechnung der 'CycleTime' für das Bauelement $i+1$ muss die vorhandene Restmenge (der Kran ist nicht leer) berücksichtigt werden, da der Kran immer die volle Kapazität ausnutzt. Es folgt eine verkürzte Lastfahrt zu Bauelement $i+1$.

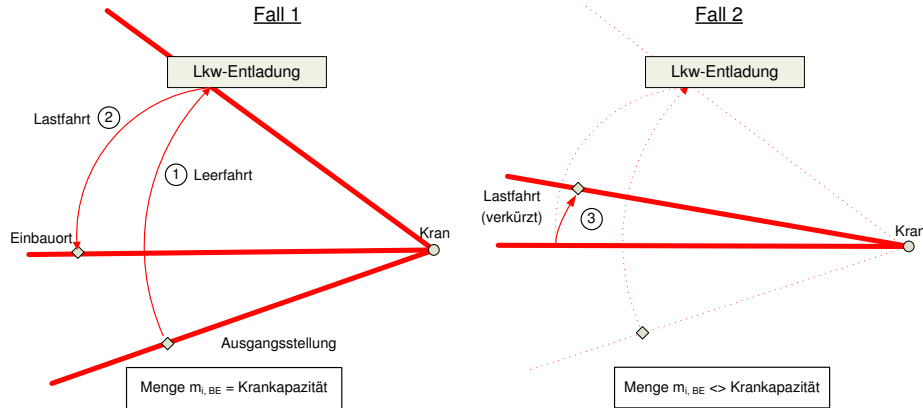


Abbildung 5.23: Fallunterscheidungen Normalfall – Sonderfall

- Menge $m_{i, BE} = \text{Krankapazität} \Rightarrow \text{Fall 1}$
- Menge $m_{i, BE} < \text{Krankapazität} \Rightarrow \text{Fall 2, wenn Kran nicht leer}$
Fall 1, wenn Kran leer
- Menge $m_{i, BE} > \text{Krankapazität} \Rightarrow \text{Fall 2} + n \cdot \text{Fall 1, wenn Kran nicht leer}$
 $n \cdot \text{Fall 1, wenn Kran leer}$

Beispiel: Bauteil Filigranwand mit Ortbetonkern Sind die Mengen der Bauelemente deutlich kleiner als die Krankapazität, ergibt sich ein Tourenproblem, da sich der Sonderfall 'verkürzte Lastfahrt' mehrfach aneinander reiht. Die Reihenfolge der Bauelemente innerhalb eines Materiallieferabschnitts wird daher so gewählt, dass die Abstände untereinander minimal sind.

Die Abgabezeiten t_{abg} beziehen sich auf die Abgabe der kompletten Umschlageinheit. Diese werden mit dem Faktor $\alpha = \text{Menge}/\text{Krankapazität}$ multipliziert, um zeitliche Auswirkungen von Mindermengen zu berücksichtigen.

Bauelement	Menge	Kran- kapazität	Kranspiele
Fertigteil	1 Stk	1 Stk	1 Kranspiel
Ortbeton	1,2 m ³	1,0 m ³	2 Kranspiele + Restmenge von 0,8 m ³ für Bauelement i+1
Bewehrung	0,048 t	5,0 t	verkürzte Lastfahrt von i nach j, wenn Restmenge bei i-1 vorhanden, sonst 1 Kranspiel + Restmenge von 4,952 t

Tabelle 5.4: Fallunterscheidungen am Beispiel

Daraus folgt für die Grundgleichung der 'CycleTime':

$$t_{ges} = \alpha \cdot t_{an} + t_h + \max(t_{dphi}, t_{dr}) + \alpha \cdot t_{abg} \quad (5.4)$$

mit den Indizes nach Kapitel 3.3.2. Je nach Fall (vgl. Abb. 3.11) muss diese Gleichung entsprechend abgewandelt werden.

Es gibt eine Reihe von externen Faktoren (Wetter, Sichtbedingungen, usw.), durch die die Arbeitsgeschwindigkeit beeinflusst wird und nicht direkt abgebildet werden können. Daher wird die endgültige Ergebnisgröße t_{ges} als Normalverteilung mit einer Standardabweichung von 10 % des Mittelwertes [Sch98] angegeben.

Der Lagertransport unterscheidet sich nicht von dem Transport zum Direkteinbau, da lediglich die Koordinaten des Lagers als Zielkoordinaten eingesetzt werden. Die Lagernummer wird im Atom *Lkw-Entladung* ermittelt.

Vom Lager aus werden die Bauelemente, die für den Direkteinbau geeignet sind, an den Kran 'zurückgegeben' sobald die Einbaukriterien erfüllt sind, die im *Einbauort* geprüft werden. Die Freigabe der Bauelemente für Einbau erfolgt im *Lager*.

In SIMUBAU werden zwei Varianten an Priorisierungen untersucht (vgl. Kap. 5.7). Zum Einen werden die Lkw bevorzugt abgefertigt, zum Anderen das *Lager* bevorzugt. Beanspruchen sowohl das Lager als auch ein ankommender Lkw den Kran, so wird nach ausgewählter Prioritätsregel die Reihenfolge festgelegt, wobei die Tätigkeit für eine Einheit nicht abge- oder unterbrochen wird. Der erste Fall minimiert die Lkw-Durchlaufzeit, der zweite die beanspruchte Lagerfläche.

5.5.8 Lager

Das *Lager* dient für die Bauelemente des Direkteinbaus und für die anderen Bauelemente als Puffer-Lager. Die folgende Abbildung zeigt zunächst die logische Einbindung in den Gesamtablauf.

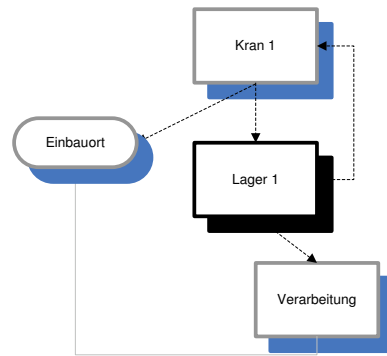


Abbildung 5.24: Lager

Das Kranmodul ist über ein *unpack*-Atom mit einem *queue*-Atom verbunden. Das *unpack*-Atom und ein daran angehängter *sink*-Atom dient dazu die Liefereinheiten wieder aufzulösen, damit die Bauelemente nicht in ihren Liefereinheiten gespeichert werden. Ein *Tabellen*-Atom protokolliert die Lagerzu- und -abgänge. Das *queue*-Atom bedient zwei Verarbeitungsmöglichkeiten. Die eine ist für Bauelemente des Direkteinbaus. Das *stacker*-Atom erzeugt hierbei den für das Kranmodul erforderlichen *container* (vgl. Abb. 5.25). Die zweite Möglichkeit ist die der Verarbeitung ohne Kran und ver-

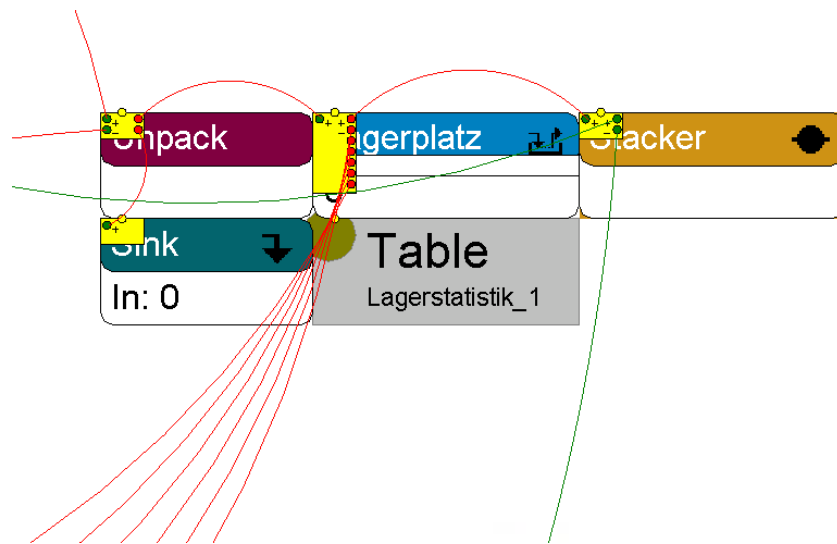


Abbildung 5.25: Lageratomgruppe

bindet das Lager mit der Atomgruppe *Verarbeitung* (vgl. Kap. 5.5.9). Dort werden alle Bauelemente 'weiterverarbeitet', die nicht mit dem Kran eingebaut werden, sondern 'von Hand' zum Einbauort gebracht und eingebaut werden.

Die Lagerauslastung und die Lagerdauer der Bauelemente sind die Ergebnisgrößen des Lagers. Zum Einen wird damit die Dimensionierung des Lagers geprüft, zum Andern ist eine kurze Lagerdauer bei gleichzeitiger hoher Funktionalität des Gesamtsystems auf Grund der ungünstigen Lagerbedingungen (höhere Diebstahlgefahr, höhere Beschädigungsgefahr [Kam94]) von Baustellenlagern, anzustreben. Aus Vereinfachungsgründen ist die Kapazität unscharf, d. h. die Summe aus aktueller Lagermenge und Menge des aktuell einzulagernden Bauelementes kann größer 100 % werden. Ein Element wird auch dann eingelagert, wenn die Menge $m_{i,BE}$ größer ist als die noch zur Verfügung stehende Lagerkapazität. Danach wird das Lager geschlossen und erst wieder eröffnet, wenn die Kapazität durch Auslagerung unter 100 % sinkt. Bei der Lagerflächendimensionierung muss mit relativ großen Sicherheiten gearbeitet werden, da der Platzbedarf der eingelagerten Materialien pauschal angenommen wird (vgl. Anhang B.1.1). In der Spalte Lagerflächenbedarf der Tabelle `tbl_material` ist ein Flächenverbrauch pro Mengeneinheit angegeben. Damit ergibt sich der Flächenverbrauch aus dem Produkt von Menge und Flächenbedarf. Zudem erfolgt die Berechnung der Kapazität lediglich über Addieren und Subtrahieren des Flächenbedarfs der Bauelemente. Eine genauere Betrachtung mit Berücksichtigung der Einzelabmessungen des Bauelementes sowie des genauen Lagerplatzes innerhalb des Lagers ist zwar denkbar, aber für die hier betrachteten Ziele nicht von Bedeutung. Wie bereits bei Atom *Lkw-Entladung* beschrieben, werden temporäre Lager und Dauerlager unterschieden. Damit können Lager abgebildet werden, die in einer bestimmten Bauphase vorhanden sind und dann wieder aufgelöst werden müssen.

Die Eröffnung/Schließung dieser Läger erfolgt über Arbeitsabschnitte. Ist ein bestimmter Arbeitsabschnitt abgeschlossen, so wird ein korrespondierendes Lager eröffnet. Die Vollendung eines weiteren, bestimmten Arbeitsabschnittes schließt das Lager wieder, d. h. das Lager ist für den Kran nicht mehr erreichbar.

Die Auslagerung erfolgt in der Reihenfolge der Arbeitsabschnitte mit der kleinsten Abschnittsnummer beginnend. Sobald ein Vorgängerabschnitt abgeschlossen ist, werden alle Bauelemente zum Abtransport bzw. Verarbeitung aus dem Lager freigeben. Da die einzelnen *fast-server* der Atomgruppe *Verarbeitung* (vgl. S. 93) nur eine begrenzte Kapazität haben, wird die Reihenfolge der freigegebenen Bauelemente zusätzlich nach den 'freien' Kapazitäten sortiert, auch wenn diese eine höhere Abschnittsnummer haben.

5.5.9 Verarbeitung

Die Atomgruppe *Verarbeitung* simuliert den Zeitverbrauch für Transport⁴ und Einbau der Materialien, die den Kran nicht als Einbaumittel verwenden, was hauptsächlich im Ausbau der Fall ist. Die Atomgruppe repräsentiert die Arbeit einzelner gewerkebezogener Kolonnen ohne Kran. Eine Kolonne verarbeitet seriell alle gewerkezugehörigen Bauelemente aller Läger.

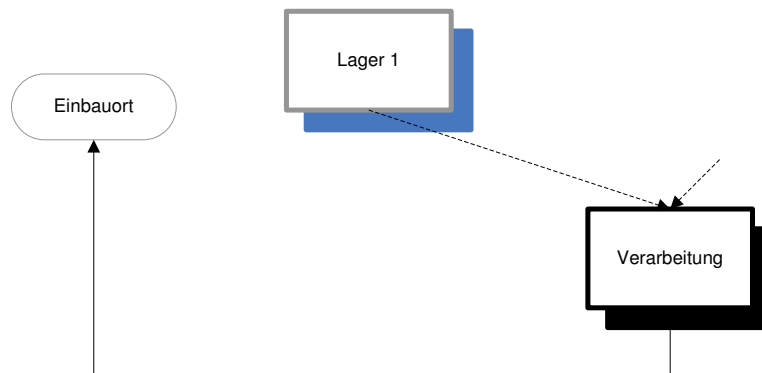


Abbildung 5.26: Verarbeitung

Die Atomgruppe besteht aus mehreren *fast server* Atomen der Logistik-Suite, die jeweils eine Kolonne repräsentieren. In jedem *fast server* wird genau ein Material verarbeitet. Alle Läger sind mit den *fast servern* über einzelne Kanäle verbunden. Die Läger verteilen die Materialien, die für die Verarbeitung bestimmt sind, sortenrein auf Einzelkanäle. Die *fast server* besitzen für jedes Lager einen Eingangskanal. Als optische Prüfhilfe wird je nach Material die Farbe des Atoms gewechselt. Wechseln die Farben bei einem Atom sind die Eingangskanäle falsch angeschlossen. Die Bauelemente werden nach einer 'CycleTime' (Verarbeitungszeit) an die Atomgruppe *Einbauort* geschickt (Ausgangskanal). Die wesentlichen Prozesse sind das Transportieren zur Einbaustelle und das Verarbeiten vor Ort. Da der Schwerpunkt der Simulation auf der Ressourcenauslastung liegt, wird auf eine genauere Betrachtung der einzelnen Prozesse verzichtet. Die 'CycleTime' berechnet sich aus dem Produkt der Materialmenge des Bauelements und einem materialspezifischen Aufwandswert. Die Aufwandswerte sind der Tabelle `tbl_material` (vgl. Anhang B.1.1) zu entnehmen. Die Atomgruppe ist in der Lage, mehrere BEO unterschiedlichen Materials gleichzeitig zu verarbeiten. Eine Aufstockung des Personals für ein Gewerk kann durch Änderung des Aufwandswerts angepasst werden. Sollten mehr Materialien dazukommen, kann die Atomgruppe durch einfaches Kopieren eines der *fast server* ergänzt werden.

⁴vom Lagerort auf der Baustelle zum Einbauort

Auf stochastische Einflüsse wird in diesem Atom verzichtet, da keine genauere Untersuchung der Prozesse erforderlich ist. Das hängt damit zusammen, dass Fertigungs- und Logistikprozesse im Aufwandswert zusammengefasst sind. Eine detailliertere Betrachtung ist nicht Gegenstand dieser Arbeit, da die Logistikprozesse im Vordergrund stehen.

5.5.10 Einbauort

Die Aufgabe der Atomgruppe *Einbauort* besteht in der Steuerung des Modells über die Fertigstellungsmeldungen einzelner Arbeitsabschnitte durch Ankommen der Bauelemente und der Visualisierung. Die Steuerung bezieht sich auf das Abrufen von Lkw und das Verwalten der Läger (öffnen, schließen usw.).

Die Atomgruppe besteht aus einem *unpack*- einem *queue*- und zwei *sink*-Atomen der Logistik-Suite.

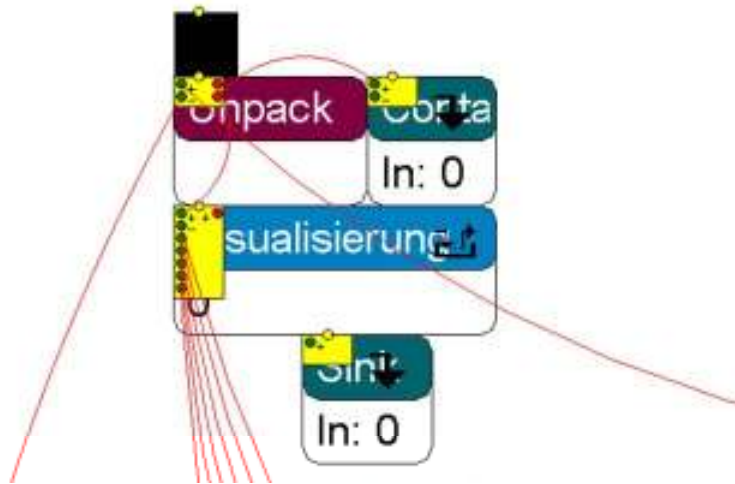


Abbildung 5.27: Einbauort-Atomgruppe

Die Eingangskanäle sind mit den Kranen (vgl. S. 87) und der Atomgruppe *Verarbeitung* (vgl. S. 93) verbunden. Der Einbauort ist das Ende der untersuchten Prozesskette und mit keinem anderen Atom über Ausgangskanäle verbunden.

Das *unpack*- und die beiden *sink*-Atome haben eine untergeordnete Bedeutung. Sie stellen der *queue* die erforderlichen Bauelemente zur Verfügung und nehmen die *container* bzw. die fertig gestellten Bauelemente auf. Die Aufnahme der Bauelemente ist lediglich dann erforderlich, wenn zur besseren

Übersichtlichkeit in der 2D-Ansicht Bauelemente 'gelöscht' werden sollen. Anderenfalls bleiben die Bauelemente zur Visualisierung in der *queue*, in der gezählt und der Einbaustatus festgehalten wird.

In der `tbl_Arbeitsabschn` (vgl. Anhang B.1.2) wird die Fertigstellung der Arbeitsabschnitte festgehalten. Durch die Abhängigkeiten zu den Vorgängerabschnitten wird SIMUBAU gesteuert. Die Freigabe für die Lkw in der Lkw-Beladung erfolgt erst, wenn der Vorgängerabschnitt abgeschlossen ist (Pull-Prinzip).

Des Weiteren werden in der *queue* die Läger verwaltet, sofern es sich um temporäre Läger handelt. Die Steuerung, d. h. die 'Öffnung' oder das 'Schließen' eines Lagers erfolgt ebenfalls über die Fertigstellung eines bestimmten Arbeitsabschnitts. Ein Etagenlager kann beispielsweise erst dann genutzt werden, wenn die zugehörige Rohdecke erstellt ist. Der korrespondierende Arbeitsabschnitt muss dazu abgeschlossen sein. Für das vorliegende Modell wird nur der Kran als Umschlagmittel genutzt. Ist die darüber liegende Decke des Etagenlagers eingebaut, ist das Lager für den Kran nicht mehr erreichbar. Der Status des Lagers wechselt zu 'nicht mehr bedienbar', d. h. es kann nur noch von Hand ausgelagert werden. Die Statusänderung erfolgt in der Tabelle `tbl_lager`, der Atomgruppe *Initialisierung* (vgl. S. 82).

5.6 Modellprüfung

Die *Validierung* eines Modells kann, wie in Kap. 4.4 erläutert, nur am Gesamtmodell vorgenommen werden, was in Kap. 6 geschieht. SIMUBAU besteht aus Bausteinen, die Eigenschaften und gewisse Interaktionsmuster besitzen. Diese werden im Folgenden untersucht und geprüft.

Die *Verifizierung* der Bausteine erfolgt mit Hilfe von Teilmodellen, deren Ergebnis mit einer Handrechnung verglichen werden. In Teilmodellen lassen sich bestimmte Ergebnisse besser isolieren als in komplexen Modellen. Zudem können 'allgemeine' Fälle definiert werden, so dass die Gemeingültigkeit eines Atoms gewährleistet werden kann. Eine Reihe an Tests wurden am Hauptmodell (vgl. Kap. 6) realisiert, da bestimmte Untersuchungen nur daran durchzuführen sind. Dies bezieht sich insbesondere auf bestimmte Regeln, die in den Atomen gespeichert sind und Entscheidungen nach sich ziehen. In der folgenden Aufzählung sind die Atome mit ihren in Kapitel 6 geprüften Regeln zusammengestellt.

- *Lkw-Beladung*
 - Anzahl der Lkw
 - Anzahl der Bauelemente pro Lkw
 - Freigabe der Lkw erst durch die Atomgruppe *Einbauort*

- Zeitintervalle der stochastischen Verteilung
- *Einfahrt*
 - Entscheidung für den Kran (frei, erforderliche Reichweite)
 - Korrektur der Reihenfolge (Ortbeton vorziehen)
- *Abladestelle*
 - Ermittlung des optimalen Lagers
 - Erzeugung der Liefereinheit
- *Lager*
 - Reihenfolgesortierung
 - Freigabe der Bauelemente durch *Einbauort*
- *Einbauort*
 - Aktualisierung der Arbeitsabschnittstabelle (Fertigstellung)
 - Erzeugung der Freigaben für *Lager* und *Lkw-Beladung*
 - Öffnen und Schließen von Lagern

5.6.1 Teilmodelle

Teilmodell Kran

Zur Verifizierung des Kranmoduls wurde ein Teilmodell erstellt, dass alle Funktionalitäten des Krans abbildet. Hierzu wurde im Modell ein zentrales Kranmodul aufgebaut und in alle Quadranten ein Lager, d. h. eine Abladestelle installiert (vgl. Abb. 5.28).

In diesem Teilmodell wurden alle Winkeleinstellungen inklusive der richtigen Drehrichtung positiv geprüft. Ebenso konnten die zugehörigen Zeiten mittels Handrechnung an Hand der Eingabe- und der Lagekoordinaten kontrolliert werden. Zudem konnte der Sonderfall der verkürzten Lastfahrt (vgl. Abb. 5.23) als richtig beurteilt werden.

Teilmodell Verarbeitung

Zum Testen der Atomgruppe *Verarbeitung* wurde ein Teilmodell erstellt, das aus der Atomgruppe *Verarbeitung*, den Tabellen der Atomgruppe *Initialisierung*, drei *arrival-lists* der Lkw-Beladung, drei *queues* und einer *sink* besteht.

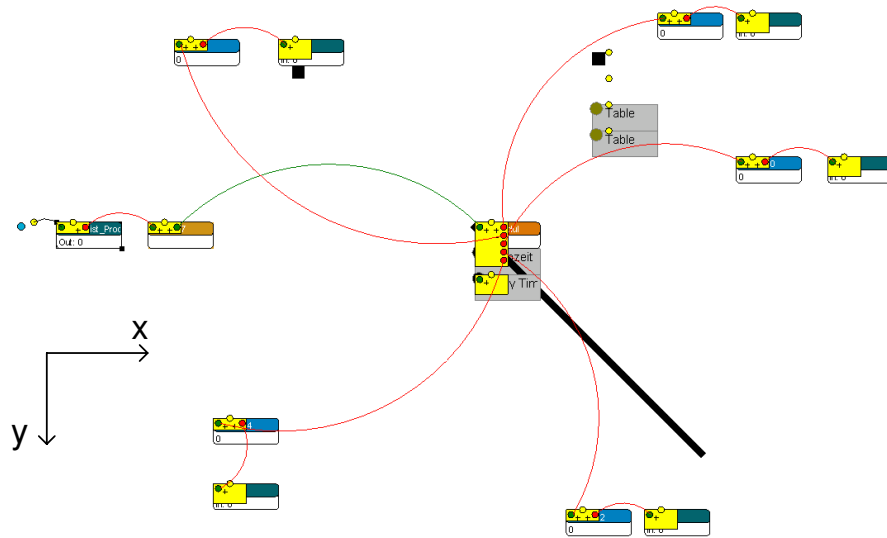


Abbildung 5.28: Teilmodell Kran

Abbildung 5.6.1 zeigt beispielhaft den Transport eines 'Produktes' von der Abladestelle in den vierten Quadranten. Über die Veränderung der Eingabedaten konnten die verschiedenen Szenarien abgebildet werden.

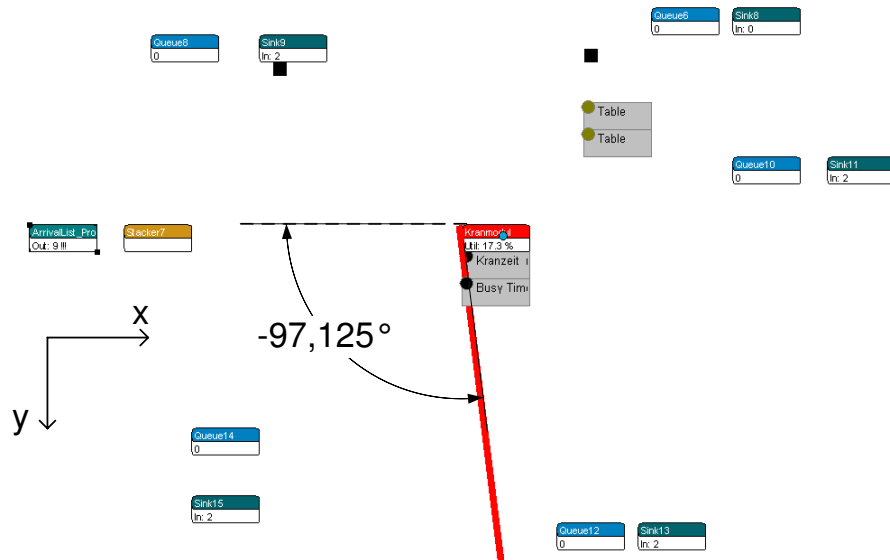


Abbildung 5.29: Transport in den 4. Quadranten im Teilmodell

Die *queues* repräsentieren drei Läger, die die Produkte gleichen Materials (Mat-ID) an die zugehörige Verarbeitungskolonne, den *fast server*, senden. Ziel ist es, zu prüfen, ob die Verarbeitungskolonne das richtige Material

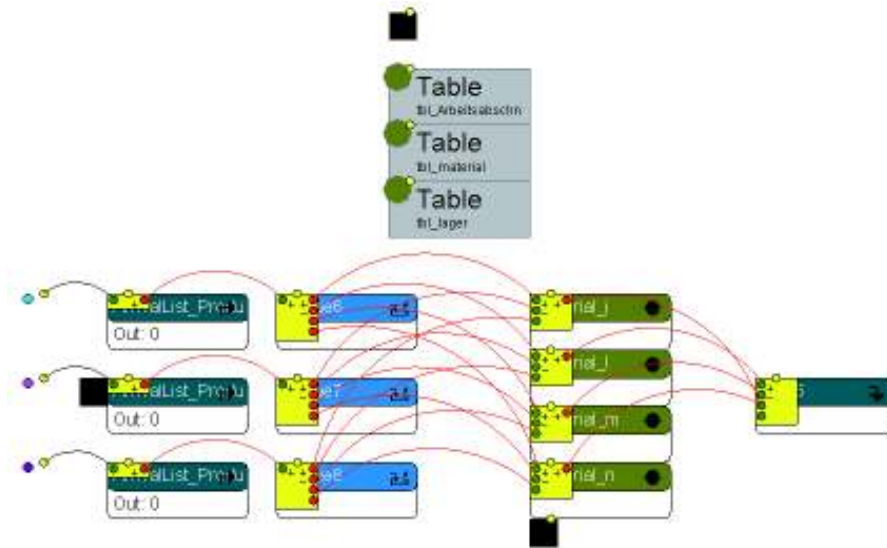


Abbildung 5.30: Teilmodell Verarbeitung

erhält und in der richtigen Zeit verarbeitet. In den *arrival-lists* sind jeweils vier verschiedene Produkte mit unterschiedlichen Verarbeitungszeiten gespeichert. Die Inputdaten und die Ergebnisse der 'Handrechnung' sind der folgenden Tabelle (vgl. Tab. 5.5) zu entnehmen.

Mat-ID	# Produkte	# Läger	Σ # Produkte	Aufwandswert [s/Stk]	Gesamtdauer [s]
2	10	3	30	10	300
78	8	3	24	20	480
34	6	3	18	30	540
135	2	3	6	40	240
Summe:	26			Max:	540

Tabelle 5.5: Inputdaten und 'Handrechnung' für Teilmodell Verarbeitung

Die Ankunftszeiten wurden willkürlich zwischen 0 und 99 s gewählt. Vereinfachend wurden verschiedene Verarbeitungszeiten (10 s, 20 s, 30 s, 40 s) gewählt. Nach einem Simulationszeithorizont (vgl. Kap. 4.2.2) von $t = 540$ s sind alle Produkte unmittelbar verarbeitet, was mit der Handrechnung übereinstimmt. Die Anzahl der Produkte auf jedem *fast server* wurde ebenfalls geprüft, um sicherzustellen, dass die Materialien an die zugehörigen *fast server* geschickt wurden.

5.7 Strategien und Regeln

Wie in Kapitel 3.4 erläutert, wird *Strategie* im spieltheoretischen Sinne verwendet. Für die Steuerung eines einzelnen STATOs wird der Begriff *Regel* benutzt, wie er ebenfalls in [Kli00], aber auch als Prioritäts-Regel in [Jeh99] verwendet wird. Eine Regel enthält eine Ausführungsanweisung, die an eine oder mehrere möglicherweise komplexe Bedingungen geknüpft ist, wie zum Beispiel die Reihenfolge, in der eine *queue* die enthaltenen BEO wieder freigibt. Eine Strategie setzt sich aus ein oder mehreren Regeln zusammen, die bei gleichbleibender Strategie durch den Entscheider geändert werden können [Kli00].

In der Simulation können Änderungen am System bei gleicher Systemlast und bei gleichem System Änderungen an der Systemlast untersucht werden. Änderungen am System beinhalten:

- die räumliche Anordnung der Ressourcen,
- die Anzahl der Ressourcen,
- Leistungskenngrößen der Ressourcen,
- Regeln, die in den Ressourcen hinterlegt sind.

Systemänderungen sind vergleichsweise einfach durchzuführen und entsprechen operativen Entscheidungen auf der Baustelle und der Baustelleneinrichtung in der Arbeitsvorbereitung. Sie gehen aber bezüglich der Arbeitsvorbereitung über eine reine Layoutplanung hinaus, da zusätzlich Entscheidungskriterien abzubilden sind, die teilweise ebenfalls erst auf der Baustelle von der Bauleitung getroffen werden. Durch eine Simulation werden die Bereiche Arbeitsvorbereitung und Ausführung jedoch näher zusammengeführt, da bestimmte Entscheidungen vorweggenommen werden.

Systemlaständerungen resultieren aus dem Wechsel der Bevorratungsstrategien. Die Größe der Lagerflächen sind ein limitierender Faktor, die dadurch die Bevorratungsstrategien und damit die Systemlast direkt beeinflussen.

Die Übersicht in Abbildung 5.31 verdeutlicht, dass verschiedene Instanzen für die Strategien verantwortlich sind und an unterschiedlichen Stellen im Gesamtsystem implementiert werden. Die Systemlaständerung erfordert den größten Aufwand, da es sich um eine Beeinflussung der Zulieferverkehre handelt. Systemänderungen auf Simulationsmodellebene bilden die Planungsentscheidungen der Arbeitsvorbereitung ab, während die Systemänderungen auf Bausteinebene in der Regel die Entscheidungen der Bauleitung vor Ort repräsentieren. Wie oben bereits erwähnt beeinflussen sich die einzelnen Instanzen gegenseitig, so dass die Gliederungsstruktur nicht ganz trennscharf

ist. Mit SIMUBAU lassen sich Strategien verschiedener Entscheidungsebenen und -reichweiten abbilden, was exemplarisch in Kapitel 6 durchgeführt wird.

Strategien und Regeln		
Instanz	Systemlaständerungen	Systemänderungen
Disposition	Datenbankebene	
Layoutplanung		Simulationsmodellebene
operative Lenkung		Bausteinebene

Abbildung 5.31: Übersicht Strategien und Regeln

5.7.1 Bevorratungs- und Lieferstrategien

Bevorratungs- und Lieferstrategien sind im Wesentlichen Dispositionsentscheidungen, die auf Datenbankebene abgebildet werden. Die Veränderung der Systemlast bei gleichbleibendem System bezieht sich im Wesentlichen auf die Zeitkomponente, da Material, Menge und Einbauort durch den Bauwerksentwurf (CAD-Modell) festgelegt sind. Sie werden als unveränderlich angenommen. Für den Vergleich zweier Entwürfe sind folglich zwei CAD-Modelle erforderlich. Da sich aber mit wesentlichen Veränderungen des Bauwerks auch die Baustelleneinrichtung und damit das System ändern würde, wäre ein Vergleich nur sehr grob zu führen, weil sich Systemlast und System gleichzeitig verändern. Durch den Aufbau in der Datenbank kann die Systemlast sehr flexibel variiert werden. Durch die Trennung von Arbeitsabschnitten und Materiallieferabschnitten können diese bis auf Bauteilebene verändert werden, d. h. Materiallieferabschnitte können teilweise oder ganz zusammengelegt oder auch in weitere Materiallieferabschnitte zerlegt werden. Die zugehörigen Lieferzeitpunkte sind ebenfalls variabel veränderbar. Damit lassen sich verschiedene Bevorratungsstrategien umsetzen, von wenigen großen Lieferungen bis hin zur zeitsynchronen Anlieferung. Die Auswirkungen im Hinblick auf den Lagerbedarf sind aus der Simulation zu entnehmen. Da das Lagerplatzangebot auf der Baustelle in der Regel begrenzt ist, erfolgt die Bestimmung einer geeigneten Bevorratungsstrategie iterativ.

Die Optimierung der Lkw-Auslastung erfolgt auf Datenbankbasis. Aus den Mengen der Materiallieferabschnitte lassen sich die Auslastungen der Lkw

bestimmen und durch Zuordnung einzelner Bauteile auf früherer terminierte Materiallieferabschnitte optimieren.

5.7.2 Lagerstrategien

Die Lagerstrategien sind Systemänderungen im Bereich der Layoutplanung. Das Modell SIMUBAU lässt eine beliebige Anzahl an Lägern zu, wobei zwischen einem Hauptlager und Neben-, oder Etagenlägern unterschieden wird.

Das Hauptlager hat eine unbegrenzte Kapazität, da die Prozesse eines vollen, bzw. überfüllten Lagers ('Abweisen' der Lkw) nicht abgebildet wurden. Über die relative Größe der Auslastung kann das Lager dimensioniert werden. Eingelagert werden alle Bauelemente, außer Ortbeton, sofern der Vorgängerabschnitt noch nicht fertig ist oder der Einbau nicht mit dem Kran erfolgt. Dies gilt im Wesentlichen für alle Ausbaumaterialien.

Die Etagenläger sind kapazitätsmäßig begrenzt und werden für die Einlagerung geschlossen, wenn sie voll sind. Bauelemente müssen bei vollem Etagenlager ins Hauptlager umgeschlagen werden. Über einen Parameter können die Neben- oder Etagenläger zu- oder abgeschaltet werden. Die Grundstrategie der Läger sieht vor, dass das Lager genutzt wird, welches zur Zeit der Anlieferung offen ist und dem Einbauort in Luftlinie am nächsten liegt. Das Einlagern mit dem Kran erfolgt nur im Zeitraum zwischen der Erstellung des Rohfußbodens und dem Beginn des Einbaus der Deckenfertigteile des jeweiligen Geschosses, da nach den Deckenfertigteilen das Etagenlager für den Kran nicht mehr erreichbar ist. Das Einlagern über Absetzen auf Hilfsgerüste oder mit Bauaufzügen ist hier nicht vorgesehen.

Als Zielgröße wird eine Entfernungskennzahl berechnet, die die Distanz zwischen Lager und Einbauort repräsentiert. Damit lässt sich ermitteln, welche Variante die kürzesten Baustellentransporte induziert. Über die Koordinaten des Einbauorts und des Lagers wird die Entfernung in Luftlinie bestimmt. In Verbindung mit der Mengeneinheit des Materials ergibt sich die Kennzahl, die die Transportleistung in *Mengeneinheit · m* auf der Baustelle ausdrückt. Belegt man diese Kennzahl mit Kosten für einen Handtransport auf der Baustelle, so kann man dies mit den erhöhten Kapitalbindungskosten und dem Risiko einer längeren Lagerung vergleichen, die entstehen, wenn Ausbaumaterial bereits in der Rohbauphase im Gebäude eingelagert wird.

5.7.3 Strategien der operativen Lenkung

Die folgenden Strategien sind solche, die auf Entscheidungen unmittelbar auf der Baustelle basieren und auf Bausteinebene eingestellt werden.

Der Kran bedient mehrere Quellen (Lkw und Lager), so dass die Priorisierung einer der Quellen eine untersuchbare Strategie bildet.

Der stundengenaue Zeitpunkt, wann Lkw auf die Baustelle kommen, liegt im Einflussbereich der Bauleitung. Wie in Kapitel *Lkw-Beladung* beschrieben, können Lieferzeitfenster mit SIMUBAU vereinfacht abgebildet werden. Über den Vergleich der Ergebnisse mit und ohne 'Lieferzeitfenster' ergeben sich die Auswirkungen auf die Anzahl wartender Lkw und die durchschnittliche Wartezeit.

Kapitel 6

Anwendungsbeispiel

In diesem Kapitel wird ein Hotelneubau in Gelsenkirchen, welches zwischen der KW 13 und der KW 52 des Jahres 2005 entstanden ist, als Praxisbeispiel vorgestellt. Neben der Beschreibung des Bauvorhabens und den Ressourcen mit ihren Kapazitäten stehen die konkret angewendeten Strategien und deren Auswertung im Mittelpunkt.

6.1 Beschreibung des Bauvorhabens

Das genannte Bauvorhaben dient als Anwendungsbeispiel für SIMUBAU.



Abbildung 6.1: Ansicht von Nord-Ost

Das Gebäude besteht aus drei Baukörpern: einer Tiefgarage, einem dreistöckigen halbrunden Anbau und einem zwölfstöckigen Riegelgebäude, dem Haupt-

bauwerk. Das Bauvorhaben entstand als Schlüsselfertigbau unter der Leitung des mittelständischen Unternehmens *Freundlieb GmbH & Co* mit Beteiligung weiterer Fachplaner und Nachunternehmer.

Abbildung 6.1 zeigt die Erstellung des 5. OGs im Rohbau. Der vordere Kran ist der Hauptkran der einen Lkw an Abladestelle 1 (vgl. Abb. 6.2) bedient. Im Vordergrund links sind die Fahrwege und die Lagerfläche zu erkennen. Die Tiefgarage ist bereits fertig, so dass deren Decke als Lager dient. Die Rohbaukonstruktion besteht aus Fertigteilen und Halbfertigteilen mit Ortbetongergänzung. Im Erdgeschoss bestehen einige Stützen aus Ortbeton. Die tragenden Wände sind zum Großteil Doppelfiligranwände, die Decken werden mit Filigran und Ortbeton ausgeführt. Die nichttragenden Wände wurden in Trockenbauweise erstellt. Alle Betonwände erhalten einen Putz, der Boden einen Estrichbelag.

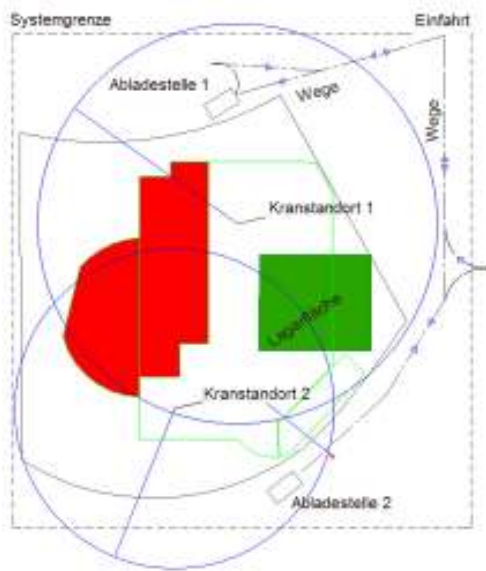


Abbildung 6.2: Grundriss Baustelleneinrichtung

Abbildung 6.2 zeigt die Baustelleneinrichtung mit den Standorten der zwei Krane inklusive ihrer Reichweiten, wobei der obere Kran der Hauptkran ist. Ebenso sind die Wege mit den Wendestellen für die Lkw verzeichnet und die Grundstücksgrenzen angegeben. Die rotunterlegte Fläche entspricht dem zwölfstöckigen Riegelgebäude und dem dreistöckigen runden Anbau. Die Lagerfläche (grün, unmaßstäblich) ist im Bereich der fertigen Tiefgarage eingezeichnet. Da die gesamte Planung in 2D ausgeführt wurde, erfolgte zunächst die Erstellung eines 3D-Modells vom Hauptgebäude (vgl. Abb. 6.3) ohne die Nebengebäude abzubilden.

den, da die kritische Situation für die logistischen Abläufe in der Übergangsphase der Rohbau- zur Ausbauphase im Hauptgebäude gesehen wurde. Durch die Übertragung in ein eigenes Modell konnten nicht alle Originalpläne übernommen werden. Über Vergleichs- und Überschlagsrechnungen wurden die Mengen des 3D-Modells geprüft. Die angenommenen Vereinfachungen haben für die logistischen Prozesse keinen Einfluss, da sie nur unwesentlich vom Original abweichen. Weiterhin wurden nicht alle Gewerke, sondern nur die logistisch relevanten abgebildet, d. h. nur die Hauptmaterialien wurden gezeichnet.

Die folgende Aufzählung enthält die betrachteten Gewerke:

- | | |
|--------------------|--------------|
| • Rohbau | • Ausbau |
| – Fertigteil (=FT) | – Fenster |
| – Bewehrung (=Bew) | – Putz |
| – Ortbeton (=OB) | – Estrich |
| | – Türen |
| | – Trockenbau |

Im Anschluss an die Erstellung des Modells wurden die Daten über die ODBC-Schnittstelle in eine Datenbank überführt und die Bauteile um die Koordinaten des IFC-Modells ergänzt (vgl. Kap. *Systemlast* auf Seite 64ff). Das erfolgte mit Hilfe einer eigenen JAVA-Applikation, die die Koordinaten der Bauteile über den Schlüssel ('Global-User-ID') aus der IFC-Datei auslas und mit dem Schlüssel der Bauteile in der Datenbank abglich. Die weitere Verarbeitung der Daten erfolgte wie in 5.3 beschrieben.



Abbildung 6.3: Ansicht des 3D-Modells

Aus den in Kap. 5.5 beschriebenen Atomen ist das in Abbildung 6.4 gezeigte Modell entstanden. Auf der rechten Seite, außerhalb der Systemgrenze, sind die acht Atomgruppen *Lkw-Beladung* zu erkennen. Vom Atom *Einfahrt* führen zwei Wege zu den zwei Abladestellen, die von jeweils einem *Kranmodul* bedient werden. Beide *Kranmodule* können die *Läger* erreichen. Innerhalb des geschlossenen Quadrates befindet sich das Hauptlager, die Etagenläger sowie das Atom *Einbauort* liegen in dem Bereich, wo das Hauptgebäude entsteht. Die Atomgruppe *Verarbeitung* ist zwischen den zwei *Kranmodulen* angeordnet, wobei deren geo-

metrische Lage für das Modell nicht relevant ist. Die verwendeten Atome sind nach den im Kapitel 6.2 beschriebenen Werten parametrisiert. Das Koordinatensystem und der Maßstab des Modells sind an die des 3D-Modells angepasst. Im ersten ('logistischen') Planungsschritt wurde das Gebäude quer geteilt, so dass pro Geschoss zwei etwa gleich große Abschnitte entstanden. Diese Grundabschnitte sind die Ausgangsbasis für die Materialliefer- und Arbeitsabschnitte aller Gewerke. Bei der Variantenbildung werden die Abschnitte, d. h. die räumliche Größe als auch die Anzahl der BEO pro

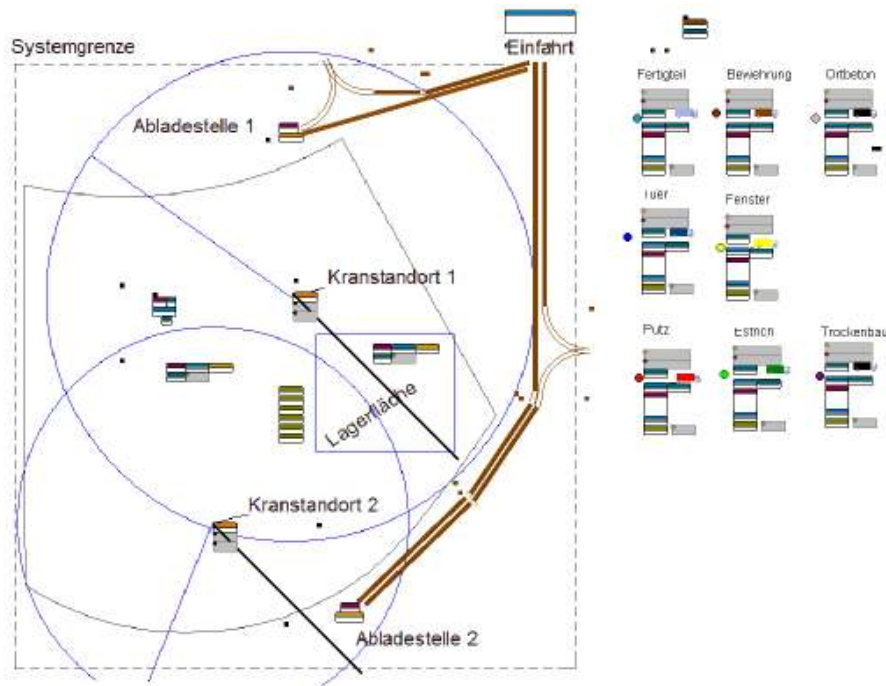


Abbildung 6.4: Simulationsmodell

Materialabschnitt, entsprechend den Anforderungen abgeändert.

6.2 Leistungswerte der Ressourcen

Wie im Kapitel *Modellbeschreibung* erläutert, sind alle Kenn- und Leistungswerte der Ressourcen über Parameter einstellbar. Nach Anordnung der Ressourcen und deren Verbindung untereinander über ein Wegenetz entsteht ein Logistiksystem mit einer charakteristischen Leistungsfähigkeit. Sie hängt demnach einerseits von den Maschinenleistungswerten und andererseits von der Anzahl, der geometrischen Anordnung und dem Zusammenspiel der Ressourcen ab.

In den folgenden Unterabschnitten werden die für das Anwendungsbeispiel verwendeten Werte aufgelistet und erläutert.

6.2.1 Lkw Leistungswerte

Die Leistungswerte der Lkw wurden vereinfachend für die einzelnen Materialien pauschalisiert. Es sind volle Lkw-Kapazitäten angesetzt, wobei bei den untersuchten Materialien in der Regel das Gewicht ausschlaggebend ist.

Eine Ausnahme bilden Türen und Fenster, bei denen das Volumen maßgebend ist. Alle Werte wurden bei Herstellern bzw. Lieferanten angefragt und gemittelt. Das System SIMUBAU kann auch Daten einer für eine höhere Genauigkeit verarbeiten, d. h. für alle definierten Materiallieferabschnitte könnte eine eigene Transporteinheit hinterlegt werden. Für eine Logistikplanung im Vorfeld eines Bauvorhabens ist eine solche Genauigkeit nicht nötig. Alle Transporteinheiten wurden in der für das Material üblichen Einheit abgelegt, um aus den über das Gebäudemodell ermittelten Mengen auf die Anzahl der Lkw schließen zu können. Damit erhält man die Mindestanzahl an Lkw (untere Schranke), da die Auslastung bei 100 % liegt.

Bauelement	Transporteinheit (Kapazität)	Einheit
Fertigteile	12	<i>Stk/Lkw</i>
Bewehrung	20	<i>t/Lkw</i>
Ortbeton	7	<i>m³/Lkw</i>
Fenster	50	<i>Stk/Lkw</i>
Estrich	195	<i>m³/Lkw</i>
Putz	1440	<i>m²/Lkw</i>
Trockenwände	1053	<i>m²/Lkw</i>
Türen	50	<i>Stk/Lkw</i>

Tabelle 6.1: Transporteinheiten der Bauelemente

Die Geschwindigkeiten der Lkw sind auf den Wegen (vgl. Kap. 5.5.5 *Wege*) implementiert und daher von den Lkw unabhängig. Die Abladezeiten sind in den Leistungswerten der Krane hinterlegt.

6.2.2 Kran Leistungswerte

Bei den Kranen handelt es sich um zwei feststehende obendrehende Turmdrehkrane, mit 60 m (Kran 1) und 50 m (Kran 2) Reichweite. Die Standorte wurden den Ausführungsplänen (vgl. auch Abb. 6.2) entnommen. Die Berechnung der 'CycleTime' erfolgt nach den Angaben in Kap. 5.5.7. Die Umschlagmenge je Einheit und die Krananschlag- und -abgabezeiten basieren auf eigenen Messungen, bzw. Angaben der Bauleitung und sind in Tabelle 6.2 zusammengestellt.

Die eingesetzten Leistungswerte für die Geschwindigkeit und die Beschleunigung für die Bewegungen Drehen, Katzfahrt und Heben können den folgenden drei Unterkapiteln entnommen werden. Diese sind parametrisiert und können verändert werden. Stochastische Einflüsse wurden pauschal durch eine Normalverteilung mit einer Standardabweichung von 10 % der 'CycleTime' abgedeckt und können abgeschaltet werden.

Material	Liefer- einheit	Einheit	Krananschlag [s]	Kranabgabe [s]
Fertigteile	1	<i>Stk/Umschl</i>	45	35
Bewehrung	2	<i>t/Umschl</i>	50	40
Ortbeton	1	<i>m³/Umschl</i>	310	70
Fenster	4	<i>Stk/Umschl</i>	50	40
Estrich	13	<i>m³/Umschl</i>	50	40
Putz	120	<i>m²/Umschl</i>	50	40
Trockenwände	78	<i>m²/Umschl</i>	50	40
Türen	4	<i>Stk/Umschl</i>	50	40

Tabelle 6.2: Kran Grundleistungswerte

Drehung

Nach Abbildung 6.5 beträgt die Drehgeschwindigkeit konstant $0,8 \frac{U}{min}$. Umgerechnet auf Grad und Sekunden ergibt sich $V = 4,8 \text{ }^\circ/s$. Beschleunigung und Bremsverzögerung sind ebenfalls als konstante Werte verarbeitet.

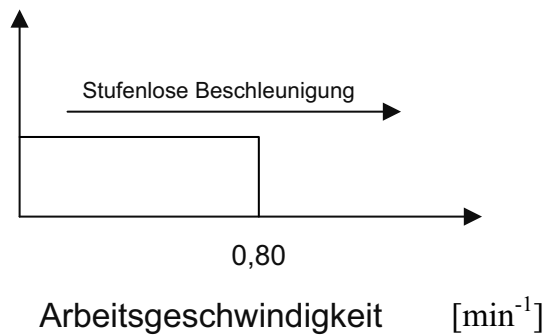


Abbildung 6.5: Arbeitsgeschwindigkeit Drehen nach Herstellerangaben

Die in der Simulation verwendeten Werte können Tabelle 6.3 entnommen werden.

Größe	Ausgangswert	Umrechnungs- wert	Bemerkung
Geschwindigkeit	$0,8 \text{ U/min}$	$V = 4,8 \text{ }^\circ/s$	Herstellerangaben
Beschleunigung/ Bremsen	$0,5 \text{ m/s}^2$ ¹	$a = 0,57 \text{ }^\circ/s^2$	nach [VDI 3573] Tabelle 1

Tabelle 6.3: Leistungswerte Kran 'Drehen'

¹Beschleunigung der Kranspitze bei 50 m Ausleger

Katzfahrt

Aus Abb. 6.6 wird deutlich, dass die Maximalgeschwindigkeit ab 3 t Last linear bis zur Höchstlast abnimmt. Vereinfachend wird eine konstante Maximalgeschwindigkeit von 100 m/min angesetzt, da der Großteil der angehängten Lasten nach Auswertung der Datenbank bis 3 t beträgt. Die Beschleunigungszeit wurde vom Hersteller mit ca. 4 s angegeben.

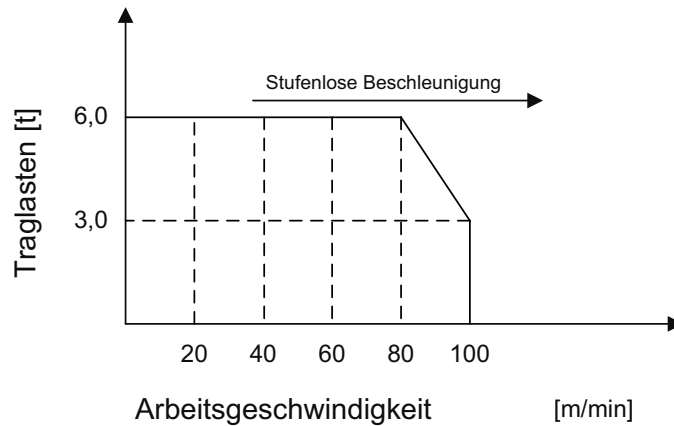


Abbildung 6.6: Arbeitsgeschwindigkeit Katzfahren nach Herstellerangaben

Die für die Simulation angenommenen Werte sind Tabelle 6.4 zu entnehmen.

Größe	Ausgangswert	Umrechnungswert	Bemerkung
Geschwindigkeit	100 m/min	$V = 1,66 m/s$	Herstellerangaben
Beschleunigung/ Bremsen	ca. 4 s	$a = 0,4 m/s^2$	Herstellerangaben

Tabelle 6.4: Leistungswerte Kran 'Katzfahrt'

Heben

Um den Rechenaufwand (vgl. Abb. 6.7) gering zu halten, wird mit einem konstanten Maximalwert von 60 m/min gerechnet, da das mittlere Gewicht der zu transportierenden Bauteile ca. 3 t beträgt. Die mittlere Beschleunigung beträgt nach Herstellerangaben ca. 0,25 m/s^2 .

Die genannten Werte sind für die Simulation umgerechnet worden und können Tabelle 6.5 entnommen werden.

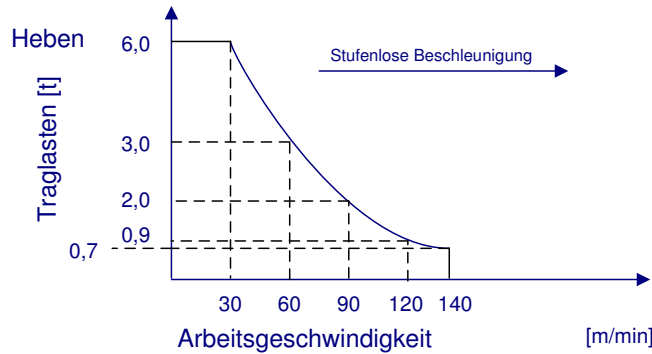


Abbildung 6.7: Arbeitsgeschwindigkeit Heben nach Herstellerangaben

Größe	Ausgangswert	Umrechnungswert	Bemerkung
Geschwindigkeit	60 m/min	$V = 1 \frac{m}{s}$	Herstellerangaben
Beschleunigung/ Bremsen		$a = 0,25 \frac{m}{s^2}$	Herstellerangaben

Tabelle 6.5: Leistungswerte Kran 'Heben'

6.2.3 Leistungswerte Lager und Verarbeitung

Neben den aufgeführten maschinenabhängigen Leistungswerten sind in Tabelle 6.6 weitere Prozesszeiten angegeben, die in der Simulation verwendet werden. Der Lagerflächenbedarf beschreibt die Fläche, die ein Baumaterial pro Einheit in einem Lager im Durchschnitt benötigt. Die erforderlichen Verkehrsflächen sind anteilig in die Werte aufgenommen worden (Bruttowerte). Die Verarbeitungsdauer ist der Mittelwert der Aufwandswerte für die einzelnen Gewerke, bezogen auf die Materialeinheiten (vgl. Tab. B.2 im Anhang).

6.3 Modellprüfung

Die Verifikation der Einzelbausteine erfolgte bereits in Kapitel 5.6, so dass im Folgenden nur noch auf Validierung des Gesamtsystems eingegangen wird. Wie in Kapitel 4.4.3 dargestellt, können drei Methoden zur Modellvalidierung herangezogen werden:

- die Plausibilitätsprüfung,
- die Sensitivitätsanalyse,
- der Outputvergleich.

Material	Lager- flächenbedarf	Einheit	Verarbeitungs- dauer	Einheit
Fertigteile	7,5	m^2/Stk	0,425	h/Stk
Bewehrung	2,08	m^2/t	19,5	h/t
Ortbeton	—	m^2/m^3	0,4	h/m^3
Fenster	0,13	m^2/Stk	1,15	h/Stk
Estrich	0,21	m^2/m^3	0,65	h/m^3
Putz	0,05	m^2/m^2	0,01	h/m^2
Trockenwände	0,09	m^2/m^2	0,14	h/m^2
Türen	0,26	m^2/Stk	1,15	h/Stk

Tabelle 6.6: Lager- und Verarbeitungswerte

Für die Plausibilitätsprüfung wurden die Ergebnisse der Bauleitung des Bauvorhabens vorgelegt, die den Verlauf der Aktivitätskurven sowie die angenommenen Grundwerte z. B. für die Kranspielzeitberechnungen bestätigte. Die in [Dre80] angegebenen Aktivzeiten zwischen 51 und 64 % für den Kran stimmen mit den im Modell ermittelten Werten (35-37 %) überein, wenn man zwischen 20 und 30 % für Nicht-Material-Transporte [Cla07a] ansetzt. Das Herstellungsverfahren mit Halbfertigteilen lässt wegen der nicht erforderlichen Schalung dabei eher auf den unteren Wert schließen.

Die Sensitivität des Gesamtmodells lässt sich an Hand der Ergebnisse der Untervarianten (vgl. Kap. 6.4.8) ablesen: Die stufenartige Veränderung der Parameter führt zu einer stetigen Veränderung der Zielgrößen. Daher lässt sich sagen, dass das Modell ausreichend robust ist.

Stichprobenartige Zeitaufnahmen der Kranspiele in der Bauphase wurden durchgeführt. Ein Vergleich mit den Modellergebnissen bestätigte die Richtigkeit der im Modell berechneten Kranspiele.

An Hand dieser Ergebnisse ist das Modell unter den gegebenen Randbedingungen des Bauwesens ausreichend valide.

6.4 Auswertungen und Strategien

Das Modell liefert über die ('virtuelle') Bauzeit eine Reihe an Daten über die Auslastung der eingesetzten Ressourcen. Da sich Systemlast und Modell über die Zeit ändern, ist es notwendig den zeitlichen Verlauf dieser Daten zu berücksichtigen. Dies ist anders als bei stationären Systemen, die nach einer Einschwingphase einen stationären Zustand einnehmen, der eine gewisse Bandbreite besitzt. Somit sind Durchschnittswerte über die gesamte Bauzeit nur bedingt für eine Auswertung geeignet.

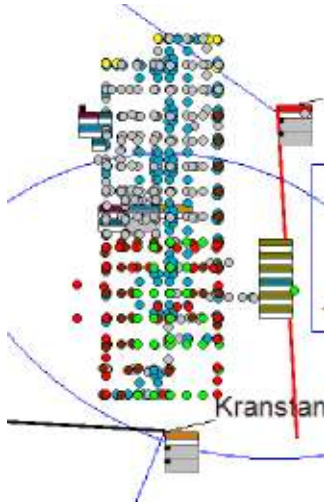


Abbildung 6.8: Modell während der Simulation

Abbildung 6.8 zeigt einen Screenshot des Modells mit bereits eingebauten Materialien. Die Form des Gebäudes im Grundriss ist sichtbar. Die verschiedenen Farben repräsentieren die verschiedenen Materialien. Die Visualisierung dient hauptsächlich der Überprüfung der Lage des Gebäudes im Bezug auf die Kranstandorte und die Lagerflächen.

Es werden die Komponenten Lkw (Durchlaufzeit), Kran (Auslastung) und Lager (Kapazität, Lagerdauer usw.) auf ihre Leistungsfähigkeit hin untersucht. Es wird auf Funktion und Schwachstellen geprüft. Dies bildet die Ausgangslage für weitere Untersuchungen. Bei gleichbleibender Systemlast werden Varianten im Layout geprüft. Im einfachsten Fall werden die Standorte der einzelnen Module

wie z. B. der Kranstandort verändert. Eine zahlenmäßige Veränderung der Komponenten verlangt etwas höheren Modellierungsaufwand.

Hier lauten die Fragestellungen:

- Wie ändert sich die Auslastung bei einem zusätzlichen Kran, bzw.
- Sind mehrere kleinere Läger sinnvoller als ein großes?

Da es sich bei der Simulation nicht um ein Optimierungsverfahren handelt, wird nicht nach dem absoluten Optimum gesucht. Vielmehr lassen sich verschiedene Layouts oder Systemlasten miteinander vergleichen und auswerten. Die Umsetzung eines theoretischen Optimums ist auf Grund vieler praktischer Randbedingungen häufig nicht möglich.

In Kapitel 5.7 wurden Strategien verschiedener Instanzen vorgestellt, die in diesem Kapitel exemplarisch getestet werden. Die Strategien werden durch die verschiedenen Ausprägungen der Merkmale repräsentiert, die in Tabelle 6.7 zusammengefasst sind.

Die Ausprägungen der Merkmale B und C beziehen sich auf die operative Lenkung, des Merkmals D auf die Layoutplanung und der Merkmale E und F auf die Disposition (vgl. Abb. 5.31).

6.4.1 Übersicht über die untersuchten Varianten

In den folgenden Kapiteln sind die einzelnen Varianten mit den Untervarianten beschrieben, die mit SIMUBAU berechnet wurden. Die Varianten

	Merkmal	Ausprägung	
		1	2
A	Stochastik	nein	ja
B	Material-anlieferung	Abruf + ohne Zeitfenster	Abruf + Zeitfenster
C	Kranbewegung	Lkw – Ziel bevorzugen	Lager – Ziel bevorzugen
D	Lagernutzung	ein Lager	Lager + Etagenlager
E	Liefersteuerung	viele kleine Materiallieferungen	wenige große Materiallieferungen
F	Bauzeitverkürzung	um 10 %	15 %

Tabelle 6.7: Ausprägungsmöglichkeiten verschiedener Merkmale

orientieren sich an den Zielgrößen, die durch die Strategien beeinflusst werden. Vier Varianten wurden betrachtet und nach ihrer Zielgröße benannt. Die Ausprägungen der verschiedenen Merkmale nach Tabelle 6.7 und die verschiedenen Systemlasten (A, B, C, usw.) ergeben durch Kombination die in Tabelle 6.8 aufgeführten Varianten mit Untervarianten. Die Sondervarianten behandeln Einzelaspekte, die in den entsprechenden Kapiteln näher erläutert werden. Sie basieren z. T. auf den anderen Varianten.

- Variante 1 *Wegeminimierung*
- Variante 2 *Minimierung der Lkw-Durchlaufzeit*
- Variante 3 *Verkürzung der Bauzeit um 10 %*
- Variante 4 *Verkürzung der Bauzeit um 15 %*
- Sondervarianten
 - *Begrenzung der Kranreichweite*
 - *Optimierung der Systemlast*
 - *Zusammenladungsmöglichkeiten*

Für alle durchgeführten Varianten und Sondervarianten wurden 60 Simulationsläufe durchgeführt, was sich als ausreichend genau für die Zielgrößen herausgestellt hat. Für die Erstellung der Grafiken wurden Einzelergebnisse (in Tabellenform) der Simulationsläufe überlagert und aufbereitet.

6.4.2 Variante 1 *Wegeminimierung*

In der Variante 1 *Wegeminimierung* wird die Nutzung eines Hauptlagers mit der Nutzung von zusätzlichen Etagenlagern verglichen.

Nr		Stochastik		Material-anlieferung		Kranbe-wegung		Lager		Systemlast							
		A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2			F1		F2			
										E1	E2			E1	E2	E1	E2
										A	B	C	D	DB	E	EB	
1	1	x			x	x		x		x							
	2		x		x	x		x		x							
	3		x		x	x			x			x					
2	1		x		x	x		x		x							
	2		x	x		x		x		x							
	3		x		x		x	x		x							
	4		x	x			x	x		x							
	5		x		x	x		x			x						
	6		x	x		x		x			x						
	7		x		x		x	x			x						
	8		x	x			x	x			x						
3	1		x		x	x		x					x				
	2		x	x		x		x					x				
	3		x		x		x	x					x				
	4		x	x			x	x					x				
	5		x		x	x		x						x			
	6		x	x		x		x						x			
	7		x		x		x	x						x			
	8		x	x			x	x						x			
4	1		x		x	x		x							x		
	2		x	x		x		x							x		
	3		x		x		x	x							x		
	4		x	x			x	x							x		
	5		x		x	x		x								x	
	6		x	x		x		x								x	
	7		x		x		x	x								x	
	8		x	x			x	x								x	

Tabelle 6.8: Varianten mit ihren Ausprägungen

- Die Untervariante '1.1' dient als deterministische Referenz (Systemlast A).
- Die Untervariante '1.2' *Hauptlager* ist mit einem Hauptlager ausgestattet (Systemlast A).
- Die Untervariante '1.3' *Hauptlager und Etagenlager* besitzt ein Hauptlager und drei Etagenläger (Systemlast C).

Als Zielgröße wird die Wegeminimierung definiert, d. h. das Material soll so nah wie möglich am Einbauort gelagert werden, um den baustellenseitigen Transportweg zu minimieren. Damit sind für Variante 1 zwei Systemlasten erforderlich, die Systemlast A als Referenzsystemlast und die Systemlast C mit vorzeitiger Lieferung bestimmter Materialien. Einflussgröße ist die Lagerdauer, da das Ausbaumaterial bereits früher geliefert werden muss, um mit dem Kran auf die Etage gebracht zu werden. In der Baupraxis existieren noch andere Möglichkeiten Material in Etagen einzulagern, die hier aber nicht betrachtet werden. Im Simulator wird das dem Einbauort nächstliegende Lager angesteuert, sofern es für den Kran zugänglich und nicht voll ist. Sonst wird das Material im Hauptlager gelagert.

Beschreibung der Untervariante '1.2' Hauptlager

In Referenzsystemlast A erfolgen die Lieferungen zeitsynchron zum Einbau, d. h. zu jedem Arbeitsabschnitt korrespondiert ein Materiallieferabschnitt, der das zugehörige Material im koordinierten Fall (Lieferabruf) stunden- genau, bzw. im unkoordinierten Fall ein bis zwei Tage vorher liefert. Aus der folgenden Grafik ist die kumulierte Menge, nach Material gegliedert, abzulesen.

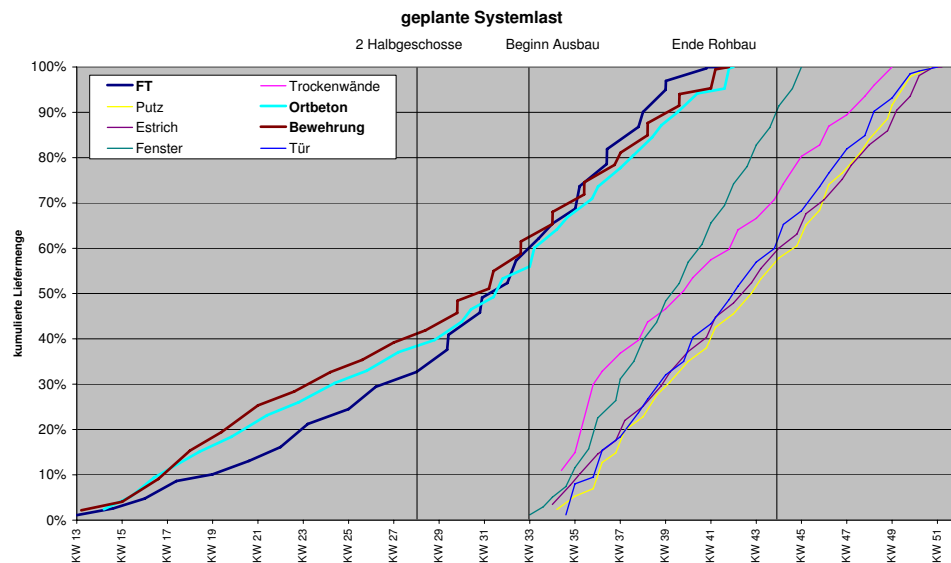


Abbildung 6.9: Kumulierte Liefermenge Systemlast A über die Bauzeit

Im Referenzsystem wird des Weiteren die vereinfachte Zeitfenstervergabe 'eingeschaltet' und der Parameter 'Lkw bevorzugen' gesetzt.

Die folgende Grafik (Abb. 6.10 zeigt den Verlauf der Kranauslastung in % (linke Ordinate) für Kran 1 und Kran 2 sowie die Anzahl der Lkw (rechte Ordinate) pro Kalenderwoche. Dabei werden die wartenden Lkw extra ausgewiesen. Die Grafik 6.11 weist den Verlauf der Lagerbestandskurve in % aus, bei der eine vorhandene Lagerfläche von 500 m^2 angesetzt sind. Für die Grafiken wurde 'stellvertretend' ein Simulationslauf gewählt, der bezüglich der Anzahl wartender Lkw dem Mittelwert entspricht.

Man erkennt deutlich, dass der zweite Kran erst ab ca. der 28. bis zur 44. KW benötigt wird und es in dieser Zeit zu wartenden Lkw kommt.

Das Lager wird mit erst dem Beginn des Ausbaus aufgebaut, da alle Rohbaumaterialien in dieser Variante zeitsynchron angeliefert werden und somit nicht zwischengelagert werden.

Alle Varianten wurden mit dem gleichen Simulationszeithorizont (vgl. 4.2.2)

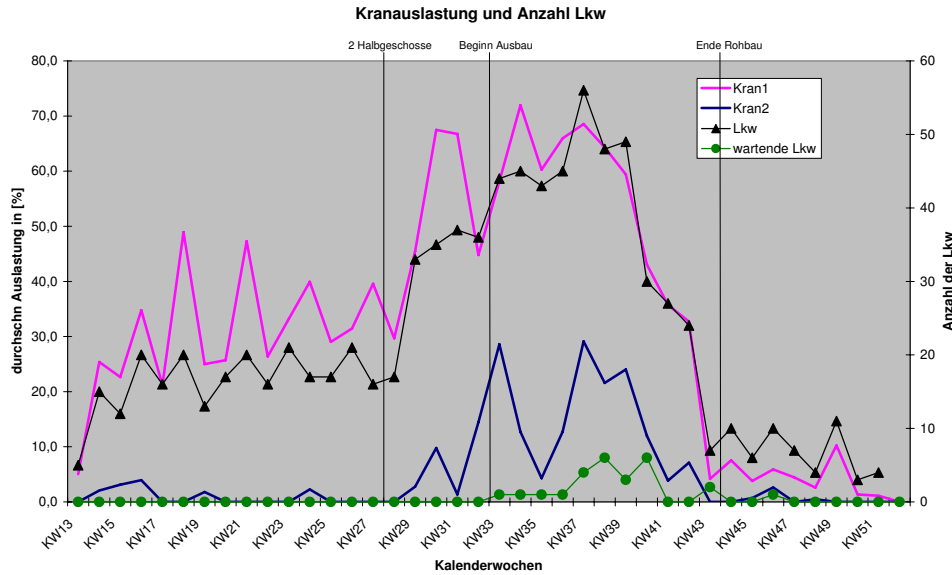


Abbildung 6.10: Kranauslastung und Anzahl Lkw

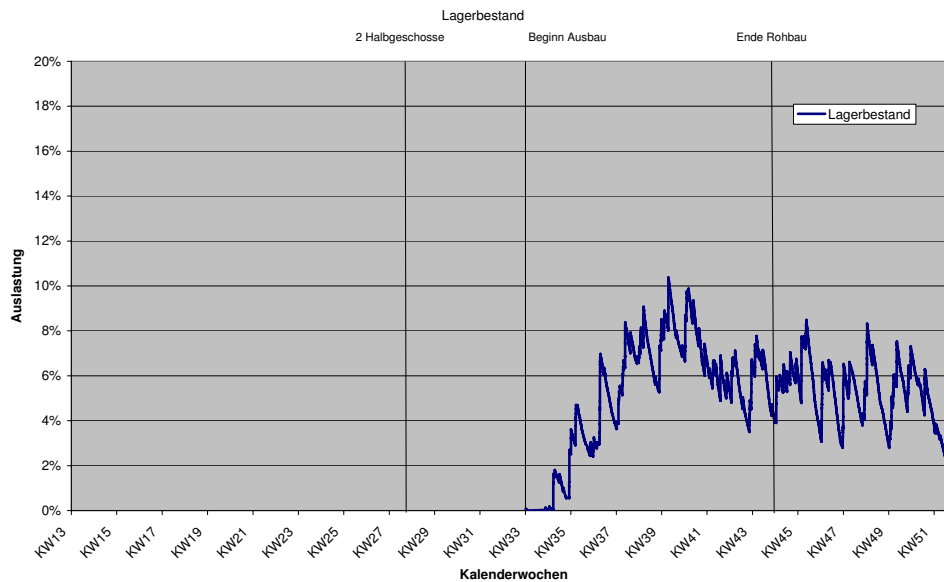


Abbildung 6.11: Auslastung Lager

durchgeführt, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Für deren repräsentative Ermittlung wurden 60 unabhängige Simulationsläufe durchgeführt, deren Mittelwerte aufgelistet sind:

- # Lkw gesamt 877

- # wartende Lkw gesamt 21,7 mit einer mittleren Wartezeit von ca. 11 min
- # BE im Lager 5327 mit einer durchschnittlichen Lagerdauer ca. 6 Tagen¹
- erforderliche Lagerfläche 55 m² ²

Beschreibung der Untervariante '1.3' *Hauptlager und Etagenlager*

Durch 'Einschalten' des Parameters Etagenlager und Verwendung der Systemlast C entsteht die Untervariante '1.3' *Hauptlager und Etagenlager*. Die folgende Grafik (Abb.6.12) korrespondiert zu Abb.6.9 und zeigt die kumulierte Liefermenge der Systemlast C.

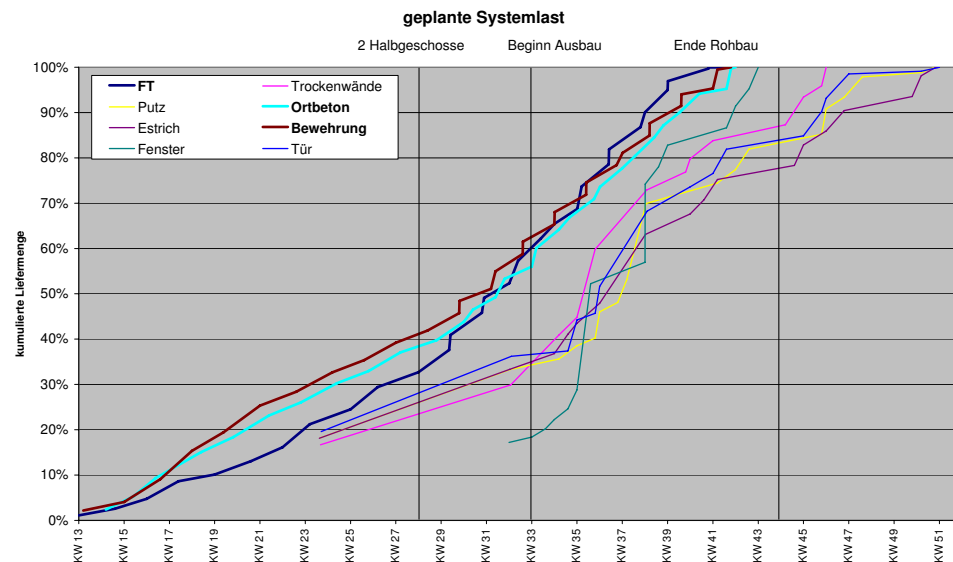


Abbildung 6.12: Kumulierte Liefermenge Systemlast C über die Bauzeit

Für die Systemlast wurden Materiallieferabschnitte zusammengefasst und in die Zeit eingeplant, in der die Lager für den Kran erreichbar sind. Es bestehen drei Etagenlager in den Geschossen eins, fünf und neun. Der Verlauf der Liefermenge in der Grafik zeigt deutlich die frühere Anlieferung und die Sprunghaftigkeit gegenüber der Ausgangssituation, da mehr Material auf einmal geliefert wird.

Die Grafiken 6.13, 6.14 und 6.15 zeigen den Verlauf der Kranauslastung und die Lkw-Anzahl sowie die Lagerbestandskurven beispielhaft für einen Simulationslauf.

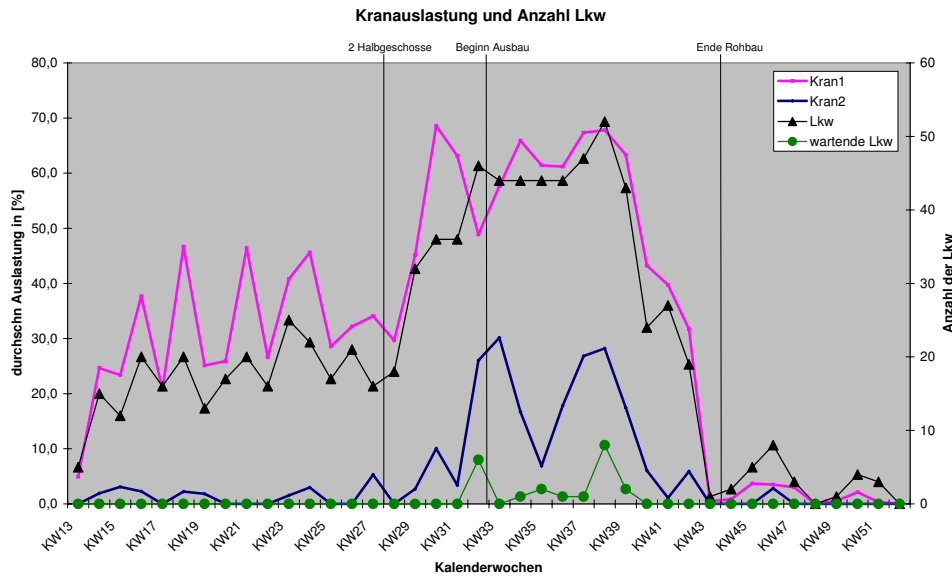


Abbildung 6.13: Kranauslastung und Anzahl Lkw

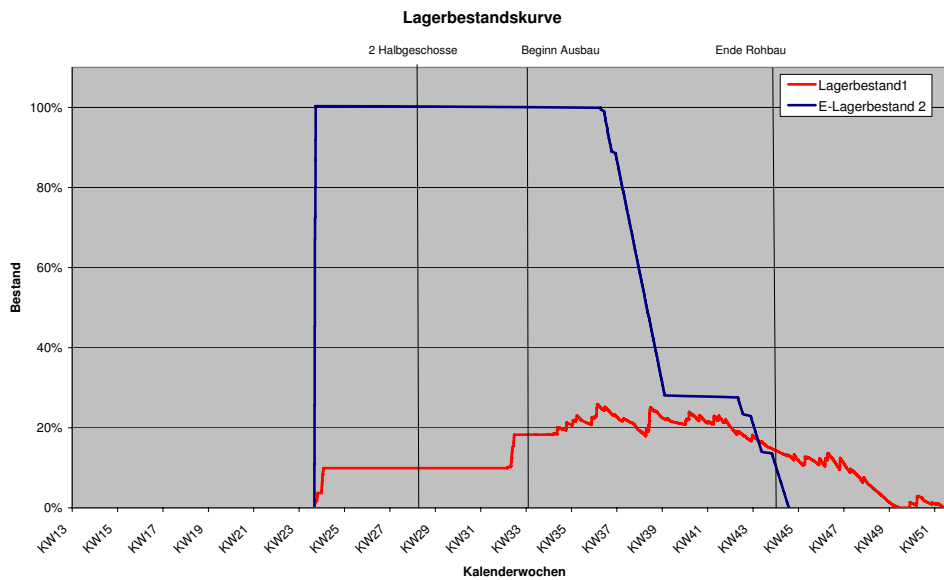


Abbildung 6.14: Auslastung Hauptlager und Etagenlager 2

Zielgröße ist die Verringerung der Lager-Einbauortentfernung. Diese wurde, nach Material getrennt, für jedes Lager einzeln bestimmt und dann zusammengefasst. Um eine Vergleichsgröße zu erhalten, wurde die dem Material

¹ohne Berücksichtigung etwaiger Wochenenden

²weitere Ergebnisse s. Abschnitt 6.4.8

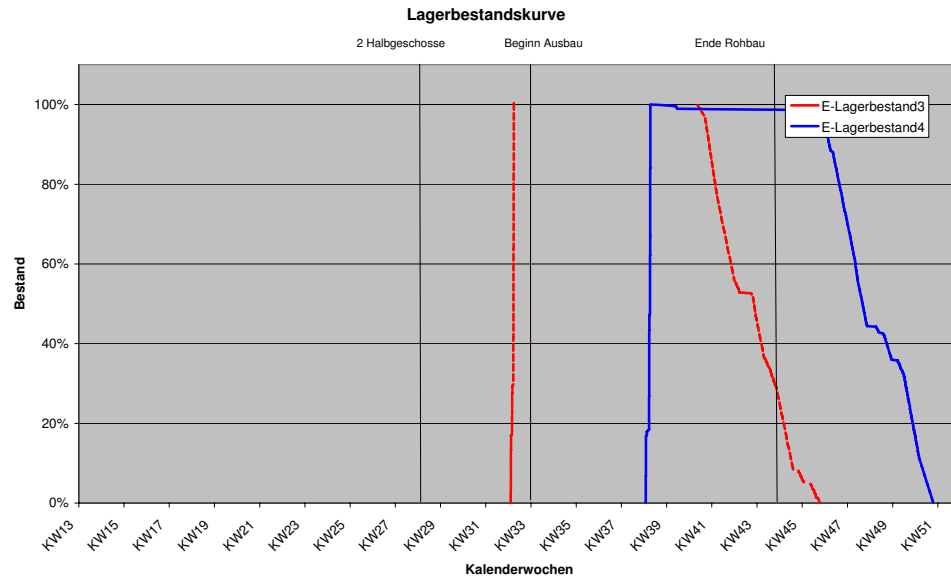


Abbildung 6.15: Auslastung Etagenlager 3 und 4

entsprechende Einheit mit dem Lager-Einbauort-Abstand in m multipliziert. Die Vergleichswerte sind Tabelle 6.9 zu entnehmen.

Material	Kennzahl Variante 1.2	Kennzahl Variante 1.3	Einheit [Eh]	Veränderung
	[Eh · Abstand]	[Eh · Abstand]		[%]
Trockenbau	142906	113152	$[m^2 \cdot m]$	-20,8
Putz	1744659	1397537	$[m^2 \cdot m]$	-19,9
Estrich	49089	39531	$[m^3 \cdot m]$	-19,5
Fenster	14950	11819	$[Stk \cdot m]$	-20,9
Türen	14960	13764	$[Stk \cdot m]$	-8,0

Tabelle 6.9: Kennzahl Einheit·Abstand Lagerort zu Einbauort

Die weiteren Ergebnisse (Auswertung der Mittelwerte aus 60 Simulationsläufen) sind:

- # Lkw gesamt 838
- wartende Lkw gesamt 30,2 mit einer mittleren Wartezeit von ca. 20 min
- # BE im Lager ebenfalls 5327 mit einer durchschnittlichen Lagerdauer 44,2 Tagen³

³ohne Berücksichtigung etwaiger Wochenenden

- erforderliche Lagerfläche 160 m^2

Fazit: Die Simulation zeigt eine im Mittel 17,8 %-tige Verkürzung des Transportweges auf der Baustelle. Vergleichsweise teure Handtransporte lassen sich durch das Einführen von Etagenlagern deutlich reduzieren.

Durch Multiplikation der Kennzahlen mit Kostensätzen ist es möglich, diese direkt mit etwaigen Kapitalbindungskosten, die durch die verlängerte Lagerung entstehen, zu vergleichen. Da diese aber von den Verträgen mit den jeweiligen Lieferanten abhängen, ist jeweils eine Einzelfallentscheidung erforderlich. Dabei müssen qualitative Faktoren, wie Behinderungen durch gelagertes Material auf den Etagen und Gefahren einer längeren Lagerdauer auf der Baustelle (Beschädigung und Diebstahl) in den Kostensätzen berücksichtigt werden. Diese können aber vergleichsweise gut im Vorhinein abgeschätzt werden.

Zudem bleibt festzuhalten, dass die Simulation Kennzahlen und damit Grundlage für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bezüglich der Etagenlager liefert.

6.4.3 Variante 2 *Minimierung der Lkw-Durchlaufzeit*

Ziel der Untersuchung von Variante 2 ist es zu zeigen, welche Auswirkungen die Vergabe von Lieferzeitfenstern haben und wie sich eine Optimierung der Auslastung der Lkw (Systemlast) auf das Gesamtsystem auswirken. Es wurde untersucht, in wie weit eine Änderung der Kranstrategie Auswirkungen auf die Lkw-Durchlaufzeit hat. Im einen Fall wurde ein ankommender Lkw bevorzugt bedient, im anderen zuerst der Transport Lager zu Einbauort. Alle Einstellungen wurden getrennt von einander durchgeführt, so dass sich insgesamt 8 (2^3) Untervarianten ergaben, von denen jeweils vier mit den Systemlasten A und B berechnet wurden.

- Lieferzeitfenster ja/nein
- Kran 'bevorzugt' Lkw oder Lager
- Systemlast A (Referenz) oder Systemlast B (optimierte Lkw-Auslastung)

Lieferzeitfenster

Die Einführung von Lieferzeitfenstern, also die Entzerrung der Anlieferung in den Morgenstunden und in der Mittagszeit, reduziert die Anzahl wartender Lkw im Mittel um 12,5 % und reduziert deren Wartezeit um im Mittel 8,8 %. Grafik 6.16 zeigt, in welchen Kalenderwochen wartende Lkw existieren. Somit kann man 'kritische' Wochen im Vorfeld ermitteln. Hier wäre eine

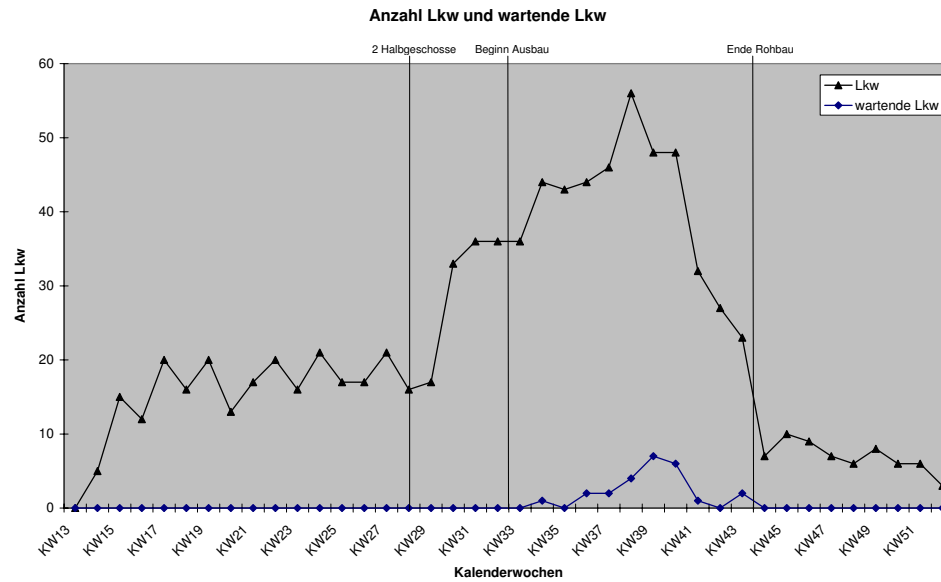


Abbildung 6.16: Anzahl der Lkw und der wartenden Lkw

weite reichende Steuerung der Anlieferverkehre für den kritischen Zeitraum denkbar. Auffällig ist, dass eine höhere Gesamtzahl an Lkw eine relativ höhere Anzahl wartender Lkw bedeuten, dies aber nicht absolut gilt. So kommt es in dem abgebildeten Szenario in KW 43 noch zu zwei wartenden Lkw bei einer Gesamtzahl 23, während in der anderen Woche bis zu 43 Lkw in der Woche noch keine Wartezeiten auslösen.

Kran bevorzugt Lager

Krantransporte aus dem Lager gegenüber der Entladung der Lkw zu priorisieren bewirkt eine leichte Verbesserung (im Mittel 1 %) der Ausgewogenheit des Kraneinsatzes, hat aber zur Folge, dass mehr Lkw warten müssen und die Wartezeiten länger werden. Die Ausgewogenheit zeigt sich einerseits durch einen kleineren Mittelwert in der Kranauslastung und in einer kleineren Streuung. Die Auswirkungen auf die vorhandenen Messgrößen sind nicht von Bedeutung. Es sind umfangreichere Untersuchungen erforderlich, um Ressourcen-Regeln zu bewerten. Dazu sind die Auswirkungen z. B. wartendes Personal in einer Simulation genauer abzubilden. Ein weiteres Szenario wäre, dass der Kran das Lager 'freiräumen' muss, um neues Material einlagern zu können. Das sollte aber im Vorfeld der Simulationsplanung schon vermieden werden und ist damit nicht 'abbildungswürdig'.

Optimierung der Lkw-Auslastung

Im Ausgangsszenario wird jedem Materiallieferabschnitt ein Arbeitsabschnitt (vgl. Kap. 5.3) zugeordnet und als eine Transportmenge behandelt, die in der Zeitspanne 2 bis 0 Tage vorher ausgeliefert wird. Durch eine grobe Optimierung der Lkw-Auslastung mittels Umverteilung von Bauelementen zu frühzeitigeren Materiallieferabschnitten (vgl. Abb. 5.7), reduziert sich die Anzahl der Lkw von 877 auf 755. Dies ist eine Reduzierung um fast 14 % über alle Materialien. Betrachtet man nur die Materialien, die kein besonderes Transportmittel erfordern (alles außer Fertigteile und Ortbeton) liegt die Reduktion sogar bei 65 %. Gleichzeitig wird das Lager deutlich stärker belastet, die durchschnittliche Lagerdauer erhöht sich von ca. 4 auf 7,5 d. Zudem ist eine größere Lagerfläche (810 m^2 , gegenüber 55 m^2) erforderlich. Dies entspricht etwa dem Faktor 15. Für die Lkw erhöht sich die Wartezeit von 11,5 min auf ca. 15 min, allerdings bleibt die Anzahl der wartenden Lkw in etwa gleich. Durch die vermehrte Zwischenlagerung von Bauelementen, die direkt eingebaut werden könnten, erhöht sich die Kranleistung um ca. 3 %.

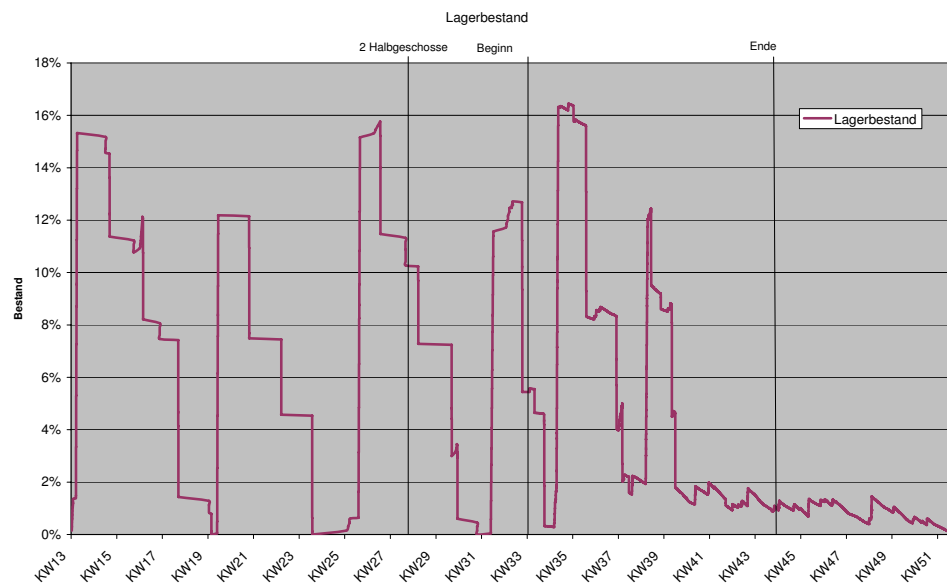


Abbildung 6.17: Lagerauslastung bei Optimierung der Lkw-Auslastung

Abbildung 6.17 zeigt den veränderten Lagerbestand mit den verhältnismäßig großen Ausschlägen in der Rohbauphase. Das ist in dem großen Flächenbedarf der Fertigteile begründet, die liegend gelagert werden müssen. Durch die Optimierung der Lkw-Auslastung werden Bauelemente bereits geliefert, die nicht unmittelbar eingebaut werden können und somit zwischengelagert werden. Die Lagerbestände gehen bis zur Ausbauphase immer auf Null

zurück, da die gelagerten Bauelemente vollständig verbaut werden. Ein Sicherheitsbestand ist auf Grund der 'Abrufstrategie' nicht erforderlich.

Fazit: Die drei aufgeführten Strategien führen zu Verbesserungen der Systemleistung, wenngleich es nicht zu größeren Änderungen der Zielgrößen führt. Sie sollten nur als Ergänzung bzw. in Kombination mit anderen eingesetzt werden, um effektivere Gesamtstrategien zu erhalten.

- **Lieferzeitfenster:** Trotz deren Einführung reduziert sich die Anzahl der wartenden Lkw nicht auf Null. Hier muss genauer auf die Situation im kritischen Bereich (ca. 10 Wochen) eingegangen werden (vgl. Sondervariante 6.4.6)
- **Kran 'bevorzugt'...**: Die bevorzugte Bearbeitung des Lagers führt zwar zu leichten Verbesserungen der Ausgewogenheit (geringere Lastspitzen) des Krans, für sinnvolle Schlussfolgerungen sind aber detaillierte Simulationen mit weiteren Messgrößen erforderlich.
- **optimierte Lkw-Auslastung:** Die Anzahl der Lkw insgesamt lässt sich um 14 %, bzw. ohne Fertigteile und Ortbeton sogar um 65 % reduzieren. Diese Optimierung erfordert allerdings die Bereitstellung erheblicher Lagerflächen. Da diese i. d. R. begrenzt sind, muss ein Kompromiss zwischen Reduzierung der Lkw-Fahrten (Lieferanten) und der Lagerfläche (Baustelle) gefunden werden. Die Anzahl wartender Lkw und deren Wartezeiten verbessern sich im Übrigen nicht.

6.4.4 Variante 3 Verkürzung der Bauzeit um 10 %

In Variante 3 wird die Bauzeit um 10 % gekürzt, d. h. alle Zeitspannen zwischen Anfang der Baustelle ($t = 0$) und den Lieferzeitpunkten ($t = n$) werden um 10 % verringert, während alle anderen Leistungswerte sowie die Aufwandswerte konstant bleiben. Die Zielgröße ist die Robustheit des Systems gegenüber einer erhöhten Systemlast. Die Fragestellung lautet: Wann kollabiert das System? Die Einflussgrößen sind Kranauslastung, Anzahl wartender Lkw, Wartezeit Lkw und Lagergröße.

Grafik 6.18 zeigt gegenüber der Referenz (Abb. 6.10) eine deutliche Linksverschiebung, wobei die Linksverschiebung des Lagers (Abb. 6.19) nicht ganz so deutlich ausfällt (vgl. Abb. 6.11). Der Anteil an der Gesamtleistung steigt für Kran 2. Gleichzeitig nimmt die Ausgewogenheit beider Krane zu (geringere Spitzen). Die Gesamtauslastung der Krane steigt von 35,2 % auf 37,6 %. Nimmt man die Entnahme des letzten Bauteils aus dem Lager als Referenzpunkt für das Ende der Bauzeit, zeigt sich, dass die effektive Bauzeit sich nur um 6,5 % verkürzt hat. Die Anzahl der wartenden Lkw steigt im Mittel um 11 Fzg. und die mittlere Wartezeit steigt auf ca. 11 1/2 min. Die Lagerauslastung steigt zwar relativ um 34 %, da es sich aber um geringe Absolutwerte

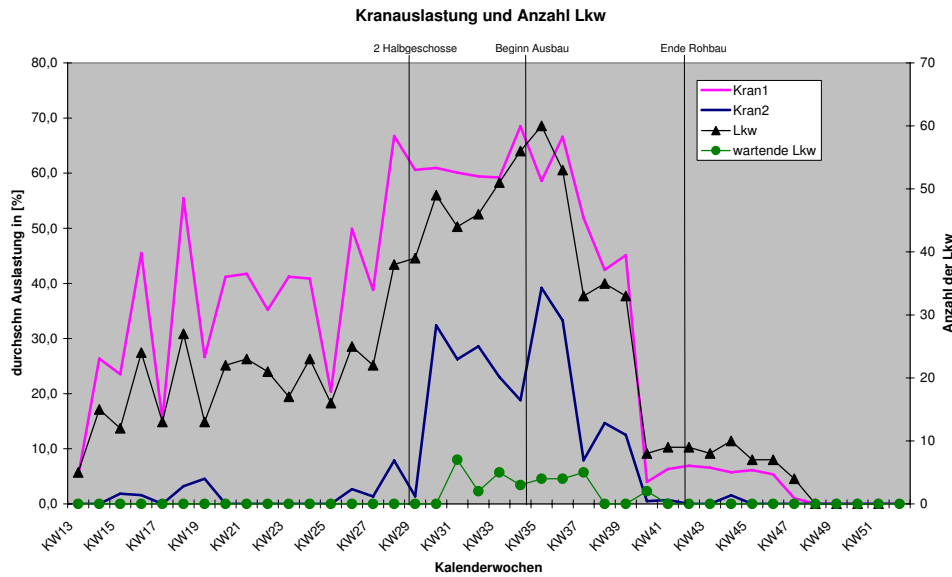


Abbildung 6.18: Kranauslastung und Anzahl der Lkw sowie der wartenden Lkw bei 10 % Bauzeitreduzierung

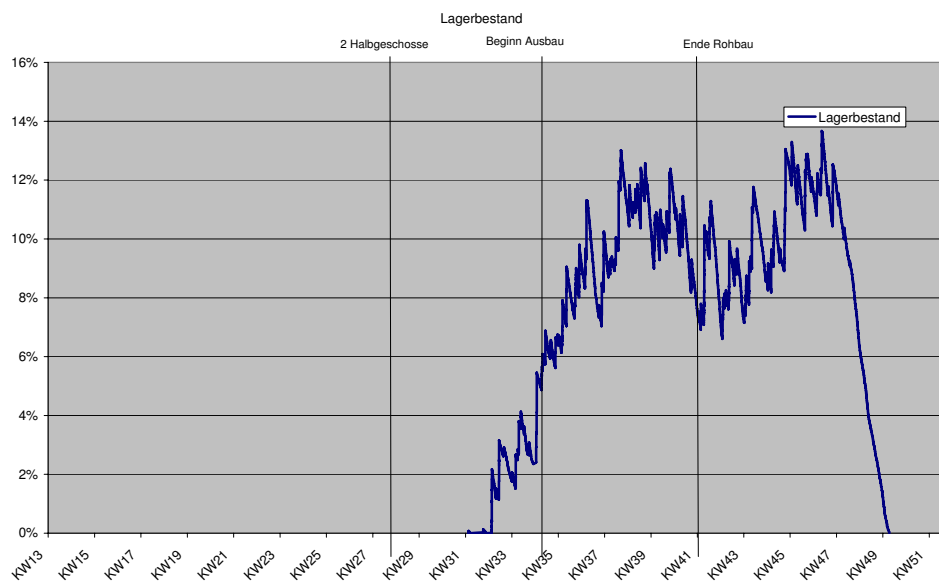


Abbildung 6.19: Lagerbestand bei 10 % Bauzeitreduzierung

handelt, ist diese Steigerung nicht von Bedeutung. Dies erkennt man auch an der Untervariante mit den reduzierten Lkw-Fahrten (vgl. Varianten 3.5-3.8 in Kap. 6.4.8). Der Lagerflächenmehrbedarf ist in diesem Fall (vgl. Kap. 6.4.3) unwesentlich.

Fazit: Im System sind große Leistungsreserven bezüglich der Logistikprozesse Transport, Umschlag und Lagerung vorhanden. Dass die effektive Bauzeit sich nur um 6,5 % verkürzt, zeigt den Engpass auf: die Verarbeitungsprozesse. Dies belegt auch die ansteigende mittlere Lagerdauer der Baustoffe.

6.4.5 Variante 4 Verkürzung der Bauzeit um 15 %

In dieser Variante wurde die Bauzeit um 15 %, um die Auswirkungen weiterer Verkürzungen zu untersuchen. Ziel- und Einflussgrößen sind die gleichen wie bei Version 3.

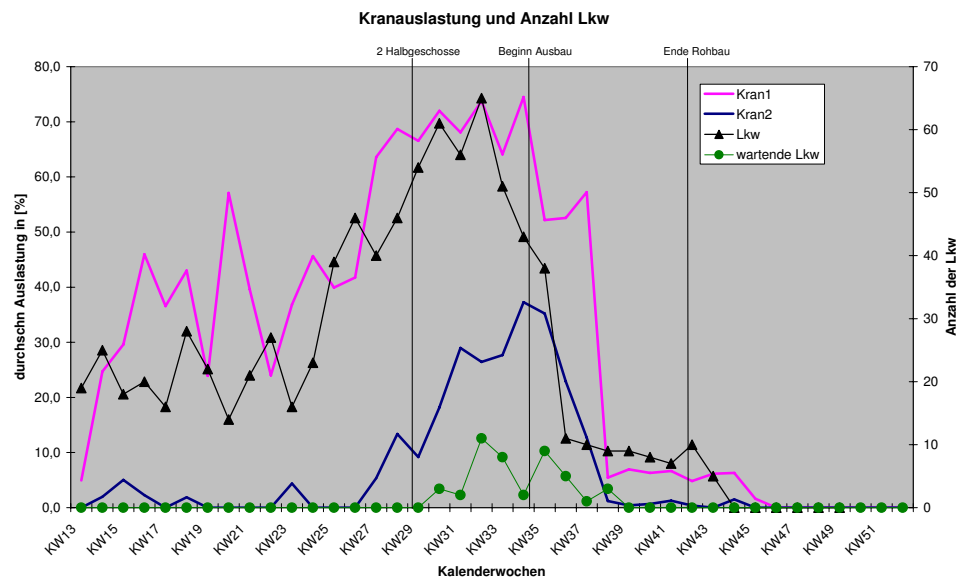


Abbildung 6.20: Kranauslastung und Anzahl der Lkw sowie der wartenden Lkw bei 15 % Bauzeitreduzierung

Gegenüber dem Referenzsystem 6.10 bzw. der vorherigen Variante 6.18 sind die Kurven weiter nach links gestaucht. Die Spitzenbelastungswerte beider Krane steigen, wobei es zu einer leichten Umverteilung auf den zweiten Kran kommt. Die Lkw-Daten ändern sich gegenüber der Variante 3 folgendermaßen:

- # wartender Lkw steigt von ca. 36 auf ca. 47 Fzg.,
- die durchschnittliche Wartezeit von ca. 11 1/2 auf 13 min

Die Lagerauslastung in der Spitze steigt um ca. 50 %, von 74 m^2 auf 110 m^2 . Die Auslagerung des letzten Bauteils aus dem Lager erfolgt etwas früher als

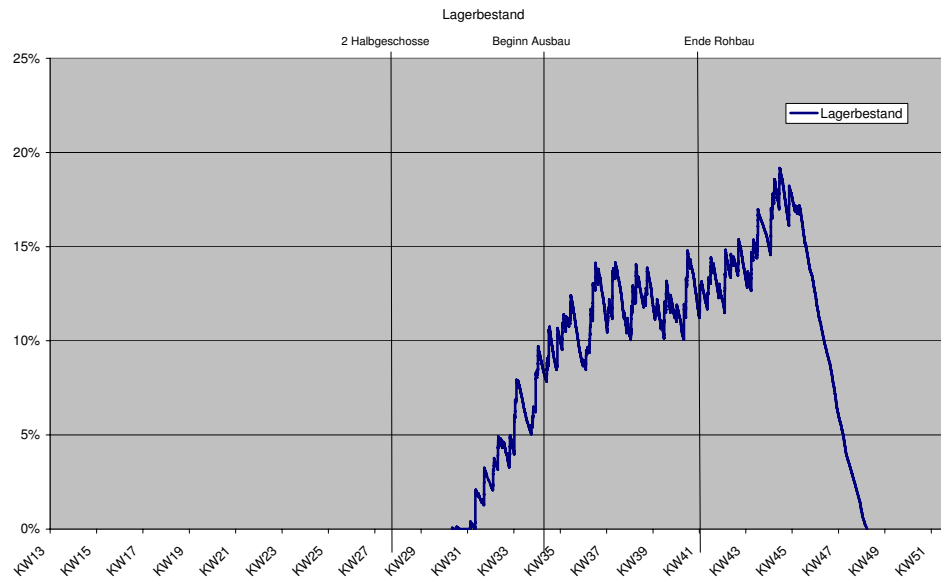


Abbildung 6.21: Lagerbestand bei 15 % Bauzeitreduzierung

bei Variante 3, womit sich eine 'effektive' Verkürzung der Bauzeit um 9,6 % ergibt.

Fazit: Auch eine weitere Reduzierung der Bauzeit hat kein Kollabieren des Systems, auch nicht lokal, verursacht. In weiteren Versuchen wurde die Bauzeit weiter reduziert, ohne dass das System kollabierte. Hierbei muss allerdings beachtet werden, dass hier nur reine Materialtransporte zum Ansatz kamen. Für einen effektiven Baubetrieb ist eine volle Auslastung des Krans nicht denkbar, d. h. der Hauptkran kommt bei einer Auslastung von über 70 % in bestimmten Kalenderwochen an die Leistungsgrenzen. Dennoch zeigen sich deutlich die Umverteilungsmöglichkeiten des Systems und damit seine Leistungsfähigkeit. Probleme bezüglich der logistischen Prozesse sind offensichtlich eher im organisatorischen Bereich begründet, als in der Leistungsfähigkeit zugehöriger Ressourcen.

Sondervariante *Begrenzung der Kranreichweite*

In dieser Variante wird die Reichweite des Krans 2 um 5 m verkürzt. In den Regeln für das Einfahrtsatom (vgl. Kap. 5.5.3) ist hinterlegt, dass ein Kran nur dann bedient wird, wenn die Bauelemente innerhalb der Reichweite des Krans liegen. Mit der Reduzierung um 5 m sind nicht mehr alle Bauelemente in dessen Reichweite, d. h. Kran 2 kann Kran 1 nicht vollständig ersetzen.

Die Auswirkungen auf die Systemleistung sind groß. Die Anzahl wartender Lkw wächst um das 6,6 fache auf 146 Fzg., die Wartezeit steigt auf ca.

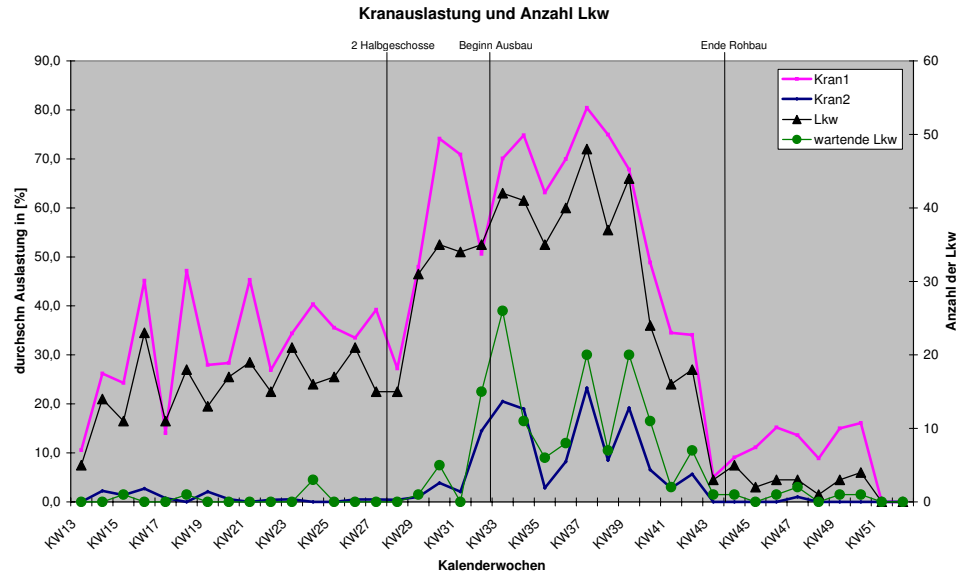


Abbildung 6.22: Kranauslastung und Anzahl der Lkw sowie der wartenden Lkw bei Kranreichweitenreduzierung

30 min. Maximal warten 3,5 Lkw gleichzeitig gegenüber der Ausgangsvariante bei der maximal knapp 2 Lkw gleichzeitig warten mussten. Der Anteil an allen Transporten für einen Kran verändert sich unwesentlich.

Fazit: Gegenüber den anderen Varianten hat die Reduzierung der Reichweite die größten Auswirkungen. Das System reagiert empfindlich auf Einschränkungen der Flexibilität. Dabei ist auffällig, dass sich das Anteilverhältnis an allen Transporten nur marginal verändert. Es kommt demnach nicht zu einer generellen Verlagerung der 'Aufträge' auf einen Kran, sondern zu einer Umsortierung.

Ein flexibles System bezüglich alternativer Materialflusswege ist für einen reibungslosen Ablauf der Logistikprozesse von großer Bedeutung.

6.4.6 Sondervariante *Optimierung der Lkw-Ankunft*

Die Veränderung der Bauzeit und die Einführung von Lieferzeitfenstern hat zwar eine Veränderung im Hinblick auf die die Anzahl wartender Lkw und deren Wartezeit gebracht, aber es kam zu keiner deutlichen Reduzierung der Zielgrößen. Daher wurde die Systemlast im Hinblick auf die Ankunftszeiten der Lkw verändert. Vor allem die Lkw für die Ausbaugewerke wurden aus der kritischen Zone nach vorne verlagert.

Grafik 6.23 zeigt die Lagerbestandskurven der Systemlast B (vgl. Kap. 6.4.3) und der Systemlast B, bei der die Materialien des Ausbaus zeitlich nach vor-

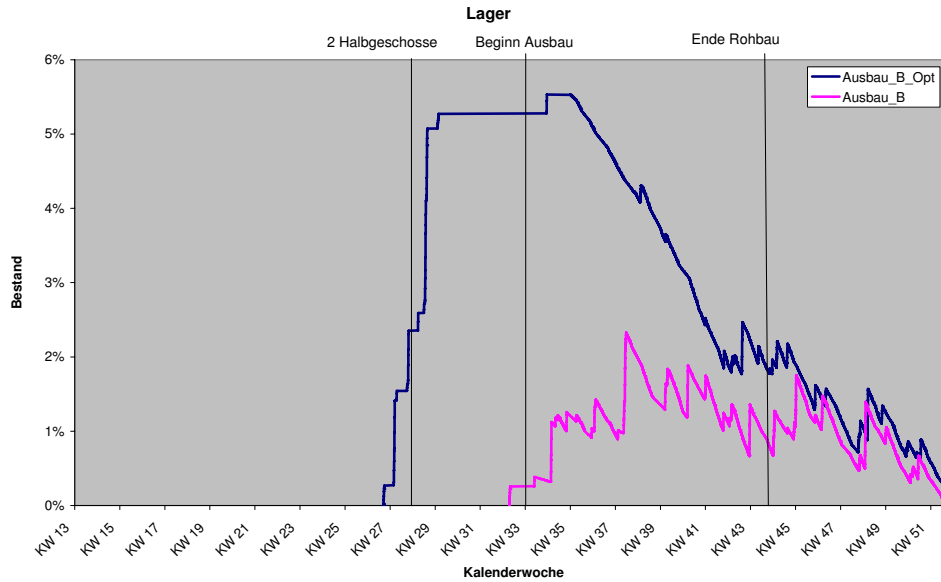


Abbildung 6.23: Lagerbestandskurve für die Systemlast B (vgl. Kap. 6.4.3) und der Optimierung

ne verlegt wurden. Die Lagerbestandskurve der optimierten Systemlast hat einen steileren Anstieg und ein höheres Anfangsniveau, da in der Anfangsphase nur eingelagert wird. Die durchschnittliche Lagerdauer⁴ verlängert sich von 7,5 d auf 23,8 d und die maximale Lagerauslastung wächst um ca. 30 % auf 1050 m^2 .

Der grobe Verlauf der Anzahl der Lkw (vgl. Abb. 6.24) über die Bauzeit ist in etwa gleich geblieben, wobei das hohe Niveau deutlich gesenkt wurde. Durch die Vorverlegung einiger Lkw ist der Anstieg etwas flacher. Im Mittel gibt es immer noch acht wartende Lkw, die allerdings fast ausschließlich zu den Rohbaugewerken gehören. Hier ist eine verfeinerte Steuerung der Lieferabrufe erforderlich.

Fazit: Der Eingriff in die Systemlast hat deutliche Auswirkungen auf die Anzahl wartender Lkw. Es zeigt sich, dass ein gezieltes nach vorne Verschieben der Lkw für den Ausbau die kritische Zone entlastet. Das Verfahren ist sehr wirksam und führt zu einer deutlichen Entlastung der Baustellensituation, wenn die Anzahl wartender Lkw reduziert werden muss. 'Erkauft' wird das durch eine deutlich längere durchschnittliche Lagerdauer, die erforderliche Lagerfläche wächst ebenfalls.

Der Vorteil der Simulation in diesem Fall ist die gezielte Steuerung der Lkw auf Grund der Simulationsergebnisse im Gegensatz zu pauschalen Restriktionen für die Lieferverkehre, wie dies z. B. bei den Logistikkonzepten des

⁴ bezogen auf alle Elemente

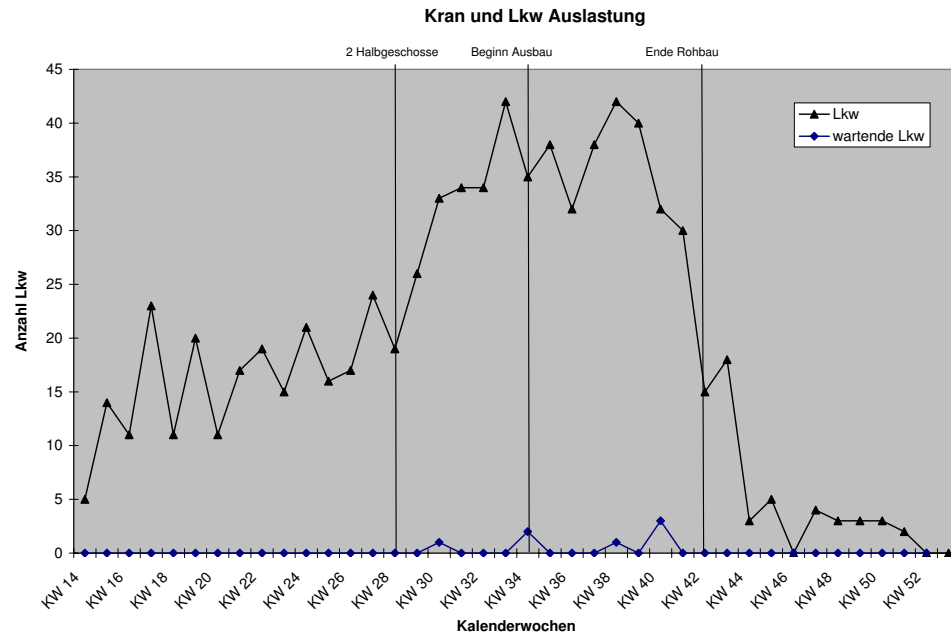


Abbildung 6.24: Anzahl der Lkw sowie der wartenden Lkw bei Systemlast-optimierung

Potsdamer Platzes der Fall war.

6.4.7 Sondervariante *Zusammenladungsmöglichkeiten*

Diese Sondervariante ist lediglich eine zusätzliche Auswertung der bereits vorhandenen Daten mit einem speziellen Hintergrund. Der in [Lei03] beschriebene Gebietsspediteur würde zur besseren Auslastung Sammeltouren bilden und verschiedene Materialien, soweit sie gemeinsam transportierbar wären, zusammen auf die Baustelle bringen. Um das Potential abzuschätzen, wie viele Materialien zusammen auf die Baustelle geliefert werden könnten, werden die Lkw-Ergebnisse nochmals gesondert ausgewertet. Folgende Materialien sind grundsätzlich zusammen transportierbar:

- Bewehrung,
- Putz,
- Gipskartonplatten,
- Estrich,
- Fenster,

- Türen.

Die Ausgangsvariante generierte 877 Lkw-Fahrten insgesamt, ohne die Fertigteil- und Ortbetonfahrten verbleiben 172 Lkw-Fahrten. Wie bereits in Kapitel 6.4.3 erwähnt, lassen sich diese durch grobe Optimierung der Auslastung um 65 % auf 60 reduzieren. Dass Fahrzeuge mit diesen Materialien nur schlecht (35 %) ausgelastet sind, ist in der Baupraxis kein unrealistischer Wert.

Über Datenbankabfragen wurde nun ermittelt, wie viele Lkw in einem Zeitfenster von ein oder zwei Tagen die Baustelle erreichen und Materialien geladen haben, die theoretisch zusammen geladen werden können. Das in Tabelle 6.10 dargestellte Ergebnis ist die obere Grenze und soll nur einen Anhaltspunkt liefern, wie groß das Potential ist. Wie in der Beschreibung des Bauvorhabens erwähnt, wurden nicht alle Materialien des Ausbaus im CAD-Modell abgebildet. Diese können aber in der Regel zusammen geladen werden und bieten damit weiteres Potenzial in diese Richtung.

# Lkw gesamt	# Lkw ohne FT und OB	# Lkw im 2-Tage- Zeitfenster	# Lkw im 1-Tag- Zeitfenster	Anteil in Prozent
877	172	131	113	76 % bzw. 66 %

Tabelle 6.10: Ergebnisse der Abfrage zur Zusammenlegung von Material

Grob überschlagen ließen sich bei einer durchschnittlichen Auslastung von 35 % (s. o.) und 113 Lkw, die innerhalb des 1-Tages-Zeitfensters liegen, $113 - (0,35 \cdot 113) = 73$ Lkw-Touren sparen. Damit fällt die Reduzierung (prozentual: 57 %) geringer aus als bei der Optimierung von Kap. 6.4.3 mit 65 %.

$$A_{Lkw} - (\emptyset Auslastung_{Lkw} \cdot A_{Lkw}) = A_{Lkw,red} \quad (6.1)$$

$$113 - (0,35 \cdot 113) = 73 \quad (6.2)$$

mit

$$A_{Lkw} = \# \text{ Lkw im 1-Tag-Zeitfenster}$$

$$A_{Lkw,red} = \text{reduzierte } \# \text{ Lkw-Touren}$$

Fazit: Die Logistikstrategie 'Gebietspediteur' bietet ausreichend Möglichkeiten die Zahl der Lkw-Touren durch Sammeln zu reduzieren. Sie belastet das Lager nicht stärker, weil Materialien zur besseren Auslastung nicht frühzeitiger als erforderlich geliefert werden. Ist das Lager der begrenzende Faktor, können Sammeltouren eine Alternative zu der Variante in Kapitel 6.4.3 sein, die eine Reduzierung der Lkw-Fahrten in der gleichen Größenordnung zulässt.

Höherer Handlingsaufwand wegen des zusätzlichen Umschlags können in Kauf genommen werden, da das Prinzip in der stationären Industrie bereits erfolgreich eingesetzt wird und sich die Besonderheiten des Bauwesens hier nicht auswirken. Dennoch muss im Bauwesen noch Überzeugungsarbeit geleistet werden, da diese Strategie nur in Ausnahmefällen zur Anwendung kommt, was mit der Wahlfreiheit der Lieferanten durch die Nachunternehmer zusammenhängt.

6.4.8 Tabellarische Zusammenstellung

In der Tabelle 6.12 sind alle zuvor beschriebenen Ergebnisse zusammengestellt, um die Unterschiede der Varianten zu verdeutlichen und Tendenzen zu dokumentieren. Die Farben referenzieren auf die unterschiedlichen Systemlasten. Erläuterungen zu den Spalten sind in Tabelle 6.11 zu entnehmen.

Spalte	Erläuterung
Kran 1	Anteil von Kran 1 am Transport aller Bauelemente
MW	Mittelwert der Auslastung von Kran 1
Streuung	Streuung um den Mittelwert der Auslastung Kran 1
Sum Busy	Summe der Einsatzzeit beider Krane pro Bauzeit
max Busy 1	Maximale Einsatzzeit von Kran 1 pro KW
max Busy 2	Maximale Einsatzzeit von Kran 2 pro KW
# Lkw	Gesamtanzahl aller Lkw im System
Lkw Wartezeit	durchschnittliche Wartezeit der Lkw in [s]
# wart. Lkw	Anzahl wartender Lkw
max. Auslast.	erforderliche Größe des/der Lager in $[m^2]$
# BE im Lager	Anzahl der Bauelemente im Lager
Ø Lager-entfern.	Mittelwert aller Entfernungen zwischen Lager und Zielort der eingelagerten Bauelemente
Kennzahl	Produkt aus Anzahl der BE im Lager und mittlerer Lagerentfernung
Ø Lagerdauer	Mittelwert der Lagerdauer der Bauelemente in [d]
Ende Bauzeit	Dauer der Bauzeit in [d]

Tabelle 6.11: Erläuterung der Tabellenspalten von 6.12

Nr		Kran 1	MW	Streuung	Sum Busy	max busy1	max busy2	# Lkw	Lkw War-tezeit	# wart. Lkw	max. Auslast.	# BE im Lager	Ø Lager-entfern.	Kenn-zahl	Ø Lager-dauer	Ende Bauzeit
1	1	73 %	30,8	24,5	35,2	76,9	32,6	877	1256	88	55	5327	47,2	251,4	3,0 d	193,7
	2	83 %	30,6	23,1	35,2	73,1	28,2	877	587	20	55	5327	47,2	251,4	4,0 d	194,5
	3	77 %	30,2	23,9	35,2	71,9	30,0	838	1188	30,2	147	5327	39,8	212,0	35,0 d	193,0
2	1	82 %	30,6	23,3	35,2	71,6	30,7	877	662	21,7	55	5327	47,2	251,4	4,0 d	194,5
	2	82 %	30,4	23,0	35,2	71,3	30,2	877	741	24,1	55	5327	47,2	251,4	3,2 d	195,0
	3	82 %	30,4	23,0	35,2	71,8	30,9	877	669	20,7	55	5327	47,2	251,4	4,0 d	195,0
	4	82 %	30,3	22,9	35,2	71,2	31,0	877	709	22,8	55	5327	47,2	251,4	4,0 d	194,8
	5	74 %	30,7	23,8	36,2	73,6	34,8	755	903	20,5	825	7229	47,1	340,5	9,4 d	194,1
	6	73 %	30,8	23,8	36,2	73,1	31,1	755	1006	24,7	810	7230	47,1	340,5	7,5 d	194,1
	7	74 %	30,4	23,5	36,3	71,9	35,8	755	853	23,6	810	7230	47,1	340,5	7,5 d	194,1
	8	75 %	30,5	23,6	36,3	71,8	35,5	755	904	25,6	810	7230	47,1	340,5	7,5 d	194,2
3	1	80 %	29,1	24,3	35,1	68,6	39,6	877	669	32,1	74	5327	47,2	251,4	5,2 d	181,9
	2	79 %	29,3	24,6	35,1	71,2	37,8	877	725	36,0	74	5327	47,1	250,9	5,4 d	181,8
	3	80 %	28,9	24,4	35,3	70,8	38,7	877	666	35,0	74	5327	47,1	250,9	5,4 d	182,0
	4	80 %	28,8	24,3	35,3	70,4	38,7	877	713	40,2	73	5327	47,1	250,9	5,3 d	181,8
	5	71 %	29,4	25,4	36,1	72,3	43,3	755	976	33,6	814	7262	47,1	342,0	8,9 d	181,0
	6	70 %	29,3	25,1	36,1	72,6	42,5	755	1040	36,6	813	7259	47,1	341,9	8,4 d	180,9
	7	72 %	29,2	25,0	36,3	71,6	44,6	755	908	36,9	813	7262	47,1	342,0	8,8 d	181,1
	8	72 %	29,1	24,9	36,2	71,9	44,9	755	948	38,3	815	7261	47,1	342,0	8,5 d	181,1
4	1	79 %	29,1	26,4	35,1	73,7	41,6	877	817	44,8	110	5327	47,1	250,9	7,1 d	176,2
	2	79 %	29,1	26,5	35,1	73,6	42,1	877	828	49,0	110	5327	47,1	250,9	6,4 d	176,2
	3	79 %	28,9	26,5	35,3	73,4	45,4	877	782	46,4	110	5327	47,1	250,9	7,2 d	176,2
	4	79 %	28,8	26,5	35,3	72,8	45,6	877	817	47,9	110	5327	47,1	250,9	7,0 d	176,0
	5	77 %	30,2	27,4	36,1	76,3	44,1	755	1203	43,0	814	7301	47,1	343,9	9,9 d	176,0
	6	72 %	29,7	27,3	36,1	75,9	43,7	755	1236	44,8	814	7301	47,1	343,9	10,0 d	175,4
	7	73 %	29,4	27,3	36,3	75,7	46,1	755	1166	44,4	814	7301	47,1	343,9	10,0 d	175,3
	8	74 %	29,4	27,3	36,3	75,3	46,0	755	1145	43,6	814	7301	47,1	343,9	10,0 d	175,5

Tabelle 6.12: Zusammenstellung aller Ergebnisse

6.5 Diskussion der Ergebnisse und Übertragbarkeit

In diesem Kapitel erfolgt eine Gesamtbetrachtung der Simulation und der Auswertung des Anwendungsbeispiels. Im Mittelpunkt stehen übergeordnete Aussagen über das Modell, den Ergebnissen und deren Übertragbarkeit auf andere Bauvorhaben sowie die Entwicklung allgemein gültiger Aussagen.

Das Modell hat sich sowohl hinsichtlich von Systemlaständerungen als auch von Modelländerungen als robust erwiesen. Lediglich bei einer Sondervariante haben sich deutlich andere, wenngleich plausible, Ergebnisse eingestellt, da die Leistungsfähigkeit des Systems stark eingeschränkt wurde (vgl. 6.4.5).

1. Hauptaussage

Flexibilität vor Leistungserhöhung

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Umschlag-Ressourcen für die Logistikprozesse flexibel sein sollten. Redundante Ressourcen können erheblich einfacher Systemspitzen bewältigen. Das ist ein wichtigerer Aspekt als deren Grenzleistung im Sinne der Geschwindigkeit, mit der Material transportiert werden kann. Man kann daraus ableiten, dass logistische Probleme auf Baustellen wahrscheinlich nicht auf der unzureichenden Leistungsfähigkeit einer einzelnen Ressource beruhen, sondern auf der 'Nichtaustauschbarkeit' von Materialwegen. Dies deckt sich auch mit der Erfahrung von Baulogistikexperten⁵.

2. Hauptaussage

Liefer-Entzerrung vor Liefer-Steuerung

Daneben weist die Simulation aus, dass die Einführung von Lieferzeitfenstern durchaus einen positiven Effekt hat, aber in kritischen Bereichen Transporte um Wochen nach vorne verschoben (Liefer-Entzerrung) werden müssen, damit die Anzahl wartender Lkw deutlich verringert wird. Es wird deutlich, dass es nicht ausreicht die ankommenden Lkw über die Zeitfenster zu takten, sondern den gesamten Anlieferungsprozess zu beachten. Andernfalls müssen, wie Praxisbeispiele zeigen, die Lieferzeitfenster sehr streng eingehalten und unpünktliche Lieferungen abgewiesen werden. In der Baupraxis sollten daher lieferzeitunkritische Materialien soweit wie möglich vorverlegt werden. Zudem sind Lieferzeitfenster auch nur in wenigen kritischen Wochen erforderlich.

⁵Gespräch mit Herrn Goetz von der Bauserve GmbH am 17. Nov. 2006

3. Hauptaussage

Etagenlagerung vor Hauptlagerung

In den Untersuchungen wurde eine signifikante Reduzierung der Baustellentransportentfernung durch Einführung von Etagenlagern erreicht. Damit lassen sich die baustellenseitigen Transporte verringern. Das erforderte das Vorhalten von Lagerkapazitäten und eine längere Lagerdauer. Die Simulation liefert die Datengrundlage für eine Wirtschaftlichkeitsuntersuchung.

Die Allgemeingültigkeit der oben genannten Aussagen ist nur mit der Einschränkung der örtlichen Randbedingungen möglich. Bei ähnlichen Gegebenheiten, wie in Kapitel 6.1 beschrieben, d. h. mit Ähnlichkeiten bezüglich

- des Bauverfahrens,
- der Kubatur,
- der Platzverhältnisse und
- der Zeitleiste,

lassen sich die Aussagen direkt übertragen. Da Ressourcen in der Regel immer mit großen Reserven ausgelegt werden, haben die Systeme eine ausreichende Elastizität, um kleinere Abweichungen oder Schwankungen gut zu kompensieren. Problematischer wird es, wenn sich einzelne Ressourcen am Leistungslimit befinden. Dann wird sich das System deutlich anders verhalten (vgl. Sondervariante Reichweitenreduzierung). Genau hier setzt die Stärke der Simulation ein. Sie liefert Zahlenwerte, die mit dem Erfahrungswissen der Bauleiter abzugleichen sind. Durch Nachkalkulationen lassen sich die Simulationen von Bauvorhaben weiter verfeinern, so dass die Aussagegenauigkeit zunehmen wird. Ziel ist es, die logistischen Prozesse so zu planen, dass man sich der Grenzleistung des Systems nähert bei gleichzeitiger Einhaltung eines Sicherheitsabstandes.

Werden die Vorteile der Simulation genutzt, wird sie eine ähnliche Entwicklung nehmen, wie die Berechnungsverfahren in der Statik. Auch dort wurde das Erfahrungswissen der Baumeister über die Tragfähigkeit von statischen Systemen und Bauteilen durch computergestützte Rechenverfahren, wie z. B. die Finiten Elemente, ersetzt. In der Statik hat die Computerentwicklung die Arbeit der Ingenieure verändert, sie selbst aber nicht ersetzt. Das gleiche wird für die Simulation gelten.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Der Betrieb einer Baustelle ist die Kernkompetenz von Bauunternehmen und der Ort der primären Wertschöpfung. Auf Grund der besonderen Randbedingungen werden Baustellen im hohen Maße durch Erfahrungswissen der Mitarbeiter gesteuert, da der prototypische Charakter der Bauwerke ein 'Ausprobieren' verschiedener Ansätze nicht zulässt.

Ein wesentlicher Anteil der Tätigkeit auf der Baustelle, der Produktionsstätte, ist logistischer Art. Gerade hier zeigen sich in der Baupraxis immer wieder Mängel, bzw. Potenziale zur Produktivitätssteigerungen. Softwaretechnische Unterstützung für die Bauleitung gibt es allerdings nur im geringen Maße.

Daher entstand die Idee dieser Arbeit, ein Instrument zu entwickeln, dass die Bauleitung darin unterstützt im Vorhinein kostengünstig und schnell verschiedene Konzepte bezüglich der Logistik zu testen und zu bewerten.

Die Baulogistik hat in den letzten Jahren eine stärkere Aufmerksamkeit in der Bauwirtschaft erfahren, nicht zuletzt durch die 'Erfolge' der Logistik in der stationären Industrie. In der Forschung sind diesbezüglich eine Reihe von Arbeiten entstanden, die die Umsetzung logistischer Prinzipien in der Baupraxis untersucht haben. Parallel dazu entwickelt sich in der Forschung zunehmend der Einsatz von Simulationen im Bauwesen.

Aufbauend auf bereits vorhandenen Forschungen wurden in dieser Arbeit die Unterschiede des Bauwesens zur stationären Industrie bezüglich der Logistikanforderungen aufgearbeitet und um eine Reihe von Aspekten ergänzt. Die Ergänzungen waren erforderlich, um die Methode der Simulation mit dem Anforderungsprofil des Bauwesens korrekt verknüpfen zu können.

Grundlegende Aspekte und Begriffsbestimmungen der Simulationsmethode bezogen auf den in der Arbeit vorgestellten Ansatz und dienen der Überleitung zur Modellentwicklung. Ebenso wurde die Simulationsumgebung vorgestellt, um die Randbedingungen der Arbeit abzustecken.

In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, wie aus bereits vorhandenen elektronischen Daten eine Systemlast zu erzeugen ist. Hierzu wurden notwendige logistische Stammdaten bestimmt. Ein datenbankorientiertes Gebäudemodell unterstützte die Entwicklung eines effizienten Systemlastgenerators.

Als Basis für das weitere Vorgehen wurde ein 'allgemeingültiges' Simulationsmodell für die logistischen Prozesse einer Hochbaustelle entwickelt. Es diente dazu, Anforderungen an parametrisierbare Bausteine („Atome“) abzuleiten, die im Anschluss erarbeitet wurden. Es entstand eine Bibliothek für eine Simulationsumgebung, in der logistische Prozesse einer individuellen Baustelle durch Anordnen, Verbinden und Parametrisieren speziell entwickelter Atome abgebildet werden können.

An einem Praxisbeispiel wurden die Auswirkungen hergeleiteter Logistikstrategien dargestellt und beurteilt. Dabei konnte die Validität des Modells nachgewiesen werden. Im Anschluss erfolgte die Extrahierung allgemeingültiger Aussagen aus den Ergebnissen. Das Logistiksystem sollte bezüglich des Materialtransports eher flexibel als mit hoher Leistungsfähigkeit ausgelegt sein, eine Lieferentzerrung ist einer Liefersteuerung vorzuziehen und Etagenlager sind gegenüber einem Hauptlager von Vorteil.

7.2 Ausblick

Eine Baustelle ist auf Grund ihrer Einmaligkeit prädestiniert für eine Simulation. Verschiedene Lösungsansätze können im Vorfeld virtuell erprobt und bewertet werden. Allerdings muss die Simulation ihren *Return On Invest* mit dem realen Abschluss der Baustelle erreicht haben. Dies wiederum bedeutet, dass der Aufwand einer Simulation gering gehalten werden muss, gegenüber Simulationen in der stationären Industrie. Dort erfolgen i. d. R. die Kosteneinsparungen durch Simulation in der längerdauernden Betriebsphase.

Der inzwischen hohe Komfort in der Eingabe heutiger Simulationsprogramme ist der *eine* entscheidende Punkt dafür, dass dieser Aufwand für eine Simulation reduziert werden kann. Gerade das Bausteinkonzept, mit den Möglichkeiten der Wiederverwendung auch sehr spezieller Komponenten und Ressourcen, ermöglicht es, ein Simulationsmodell sehr schnell zusammenzustellen oder zu verändern. Diese 'erweiterte' Baustelleneinrichtungsplanung ermöglicht Kostenreduzierungen im Kernbereich von Bauunternehmen.

Das Erzeugen der Systemlast aus einem Gebäudemodell heraus ist der *andere* entscheidende Punkt, um eine erhebliche Reduzierung des Gesamtaufwands bei der Simulation zu erreichen. Bei der Entwicklung einer konsistenten, nicht redundanten Datengrundlage für alle beteiligten Akteure vom Entwurf über die Kalkulation bis hin zum Betrieb von Gebäuden gab es in den letzten Jahren große Fortschritte. Gleichwohl ist das Gebäudemodell mit der CAD Planung in drei Dimensionen noch längst nicht allgemeine Baupraxis. Hier muss weiter an der Standardisierung des Datenaustausches gearbeitet und Überzeugungsarbeit bei den Praktikern geleistet werden.

Für genauere Untersuchungen lassen sich aus dem Gebäudemodell weitere Elemente der Systemlast ableiten. Als Beispiel sei hier die Schalung genannt. Es lassen sich auch m^2 -Deckenflächen auslesen. Das angewendete Schalverfahren legt die Menge des vorzuhaltenden Schalmaterials und die erforderlichen Fertigungsprozesse fest. Zu diesen korrespondieren Logistikprozesse, die davon entsprechend abgeleitet werden können.

Eine 'automatisierte' Aufarbeitung dieser Rohdaten würde den Aufwand für eine Simulation weiter reduzieren. Die nächsten Schritte wären in einer CAD-gebundenen Baustelleneinrichtungsplanung zu machen, bei der die geplanten Ressourcen bereits mit simulationsrelevanten Parametern zu versehen wären. Dieses erweiterte Gebäudemodell würde nicht nur die Systemlast liefern, sondern auch Lage und Leistungskenngrößen der Ressourcen. Über eine zu definierende Schnittstelle könnten Simulationsmodelle 'automatisch' aus der Baustelleneinrichtungsplanung erstellt werden.

Neben der technischen Weiterentwicklung bezüglich der Bausteinbibliotheken von Materialfluss-Simulatoren und dem Gebäudemodell als Systemlast, müssten verstärkt Praxisdaten aufgenommen werden, um die Modelle genauer zu kalibrieren. Die bisherigen Aufwandswerte sind auf die Handrechnung abgestimmt.

Die Erweiterung der Bausteinbibliothek ist in zwei Richtungen notwendig. Einerseits müssen weitere branchenspezifische Ressourcen, wie z. B. eine Betonpumpe oder ein Bauaufzug entwickelt werden. In wie weit auch Fertigungsprozesse simuliert werden müssen, um zu genaueren Ergebnissen zu gelangen ist ebenfalls zu klären. Andererseits ist die Verfeinerung der bereits vorhandenen Bausteine eine zukünftige Aufgabe. Für Grenzleistungsbetrachtungen spielt z. B. die Kollisionsprüfung eine Rolle. Überschneiden sich Kranbereiche über größere Bereiche, so sind gegenseitige Wartezeiten nicht mehr vernachlässigbar.

Die Strategie-Entwicklung für Logistikprozesse muss ebenfalls weiter voran getrieben werden. In der Forschung existieren wenig Konzepte oder Ansätze, wie Baustellen aus logistischer Sicht zu führen sind. Das erfordert die Zusammenarbeit in vertikaler Richtung von operativer, dispositiver und administrativer Ebene, um die Konzepte auf einander abzustimmen. Die Simulation

bietet sich hier als Werkzeug an. Konzepte können miteinander verglichen und im Vorhinein getestet werden.

Neue Fragestellungen werden sich durch Praxisanwendung ergeben. Die Einbeziehung des Umfeldes (z. B. stark befahrene Zufahrtsstraßen) oder der Zulieferer mit ihren Prozessen sind denkbare Erweiterungen.

Eine Kopplung der Simulation mit Informations- und Kommunikationstechnologien würde es ermöglichen diese auch baubegleitend einzusetzen. Der aktuelle Baufortschritt würde laufend mittels Ident- und Übertragungstechnik der Datenbank gemeldet, die auf Grund der tatsächlichen Situation eine neue Simulation anstößt.

Die simulationsgestützte Logistikplanung einer Baumaßnahme hat damit das Potenzial genauso selbstverständlich zu werden, wie die Statik oder die Kalkulation.

Literaturverzeichnis

- [Abo99] Abourizk, Simaan M.: . In: <http://delivery.acm.org/10.1145/170000/167911/p1271-abourizk.pdf? key1=167911&key2=3250324011&coll=GUIDE&dl=GUIDE&CFID=34501631&CFTOKEN=47600755>.
- [Are03] Arendt, Claus: Modernisierung alter Häuser, Deutsche Verlagsanstalt, München, 2003, S. 7.
- [Bal00] Ballard, Glenn: Lean Project Delivery System. In: www.leanconstruction.org/lpds.htm, besucht am 23.07.2002.
- [Bar03] Bargstädt, Hans- Joachim; Blickling, Arno: Neue Methoden für die bauteilorientierte Ausschreibung und Kalkulation unter Beachtung des Integrated Product Lifecycle Management (PLM/PDM) von Bauwerken, 2003.
- [Bau00] Baumgarten, Helmut; Walter, Stefan: Stand und Entwicklung der Logistik. In: Logistik-Management. Strategien, Konzepte, Praxisbeispiele Band 1. Lose Blattsammlung, Grundwerk Stand 2000. Hrsg: Zentes, Joachim; Wiendahl, Hans-Peter; Baumgarten, Helmut (Hrsg.), 2000.
- [Bau92] Bauer, Hermann: Baubetrieb 1+2, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, u.a., 1992.
- [Bau97] Baumgarten, Helmut; Penner, Hendrik: Baustellenlogistik Potsdamer Platz. Hrsg: Technische Universität Berlin, Berlin, 1997.
- [Bau98] Bauer, Markus: Prozessorientierte Beschaffungslogistik an Beispielen der Automobilindustrie, Bd./Vol. 2310, Peter Lang Europäischer Verlag der Wissenschaften, 1998, S. 83-88.
- [BBB06] BBB-Professoren: Positionspapier zu Situation und Zukunftsperspektiven der Bauwirtschaft in Deutschland. In: Baumarkt + Bauwirtschaft, 01.04.2006, 2006, S. 14-16.

- [Ber83] Berner, Fritz: Verlustquellenforschung im Ingenieurbau: Entwicklung eines Diagnoseinstruments unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit und Genauigkeit von Zeitaufnahmen, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1983.
- [Ber97] Bertelsen, Sven; Nielsen, Jorgen: Just-in-time Logistics in the Supply of Building Materials. In: 1 st International Conference on Construction Industry Development 9-11 Dec. 1997, 1997.
- [Ble01] Blecken, Udo; Boenerth, Lothar: Baukostensenkung durch Anwendung Innovativer Wettbewerbsmodelle, 2001.
- [Ble84] Blecken, Udo: Logistikkonzept für den Auslandsbau. In: BMT 10, 1984.
- [Boe02a] Boenert, Lothar: Logistik als neues Dienstleistungsfeld zur Senkung der Baukosten.
- [Boe02b] Boenert, Lothar; Blömeke, Michael: Mit Konzept gewinnen alle. In: Trockenbau, 2/02, 2002, S. 46f.
- [Boe04] Boenert, Lothar: Kostensenkung durch ein zentrales Logistikmanagement. Hrsg: Fachtagung Baulogistik Baulog 2004, 2004.
- [Böt94] Böttcher, Peter D.P.: Rechnergestützte Arbeitsvorbereitung in Baubetrieben, Dissertation, Universität- Gesamthochschule Kassel, 1994.
- [Bre01] Bretthauer, G.; Dietze, S., Häfele, K.-H., Isele, J., Jäkel, J. : Nachhaltiges Planen, Bauen und Wohnen im Informationszeitalter. In: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/cgi-bin/psview?document=fzk/6626>. Hrsg: Forschungszentrum Karlsruhe, 2001.
- [Bri98] Britz, Angelika: Großbaustelle Berlin: stadt- und verkehrsverträglich?. In: Internationales Verkehrswesen, 50/Nov, 1998, S. 560f.
- [Cha04] Chahrour, Racha ;Franz, Volkhard: Computersimulation im Baubetrieb-Forschungsstand, innovative Einsatzmöglichkeiten. Hrsg: Kai Mertins, Markus Rabe, Fraunhofer IRB Verlag, 2004.
- [Cha06] Chahrour, Racha ; Franz, Volkhard: Integration von CAD und Simulation zur Analyse von Erdbauprozessen. In: Simulation in Produktion und Logistik 2006. Hrsg: Wenzel, S., SCS Publishing House e.V., 2006.
- [Che01] Cheung, Sai-On; Tong, Thomas Kim-Lun, Tam Chi-Ming: Site precast yard layout arrangement though genetic algorithms. In: Automation in Construction, 11(2002), 2001, S. 35-46.

- [Cla02] Clayton, Mark j.; Warden, Robert B.; Parker, Thomas W.: Virtual construction of architecture using 3D CAD and simulation. In: Automation in Construction, 11(2002), 2001, S. 227-235.
- [Cla06] Clausen, Uwe; Weber, Jörg: Nutzung von Gebäudedaten in der Baulogistik. In: Baulogistik-Konzepte für eine bessere Ver- und Entsorgung im Bauwesen. Hrsg: Clausen, Uwe, Verlag Praxiswissen, 2006.
- [Cla07a] Clausen, Uwe; Weber, Jörg: Modell zur Bewertung von Logistikkonzepten auf Baustellen.
- [Cla08] Clausen, Uwe; Weber, Jörg: „Branchenlogistik: Baugewerbe“ zur Veröffentlichung vorgesehen in Handbuch der Verkehrslogistik 2. Auflage. Hrsg: Clausen, Uwe, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, u.a., 2008.
- [Cor04] Cordes, Michael: Warten auf den Aufschwung. In: Verkehrsrundschau, 13/2004, 2004, S.18-19.
- [Die94] Dietrich, Reinhard: Bauprojekt Potsdamer Platz. Vorteile - Nachteile für die Durchführung der Baumaßnahme der Daimler Benz AG. Hrsg: Bundesvereinigung Logistik, 1994.
- [Dom97] Dombrowski, Kerstin: Am Potsdamer Platz ist aller Laster Ende. In: Die Depesche, Nr.150/Sep, 1997.
- [Dre80] Drees, G.; Sommer, H.; Eckert, G. : Zweckmäßiger Einsatz von Turmdrehkränen auf Hochbaustellen. In: BMT 12, 1980.
- [Eic98] Eichler, Peter: Baustellenlogistik in Berlin. In: Internationales Verkehrswesen, 01.11.1998, 1998, S. 563-564.
- [Elw03] ELWIRA: Datenbank der Deutschen Bauindustrie zur Auswertung von Baudaten.
- [Eng91] Engel, Wolfgang: Beitrag zur Logistik im Bauwesen. In: Wissenschaftliche Zeitschrift. Hrsg: Technische Hochschule Leipzig, Heft 5, 1991, S. 339-344.
- [Ern04] Ernst, Eva Elisabeth: Frachtraten wie anno 1994. In: Verkehrsrundschau, 13/2004, S. 16-17.
- [Flä99] Flämig, Heike: Möglichkeiten und Grenzen einer stadtverträglichen Gestaltung produktionsbezogener Verkehre: Branchenbezogene Perspektive - Baulogistik. In: Seminardokumentation Forum Stadtökologie. Hrsg: Kühn, Gerd, Bd. 9, 1999.

- [Gir03] Girmscheid, Gerhard; Hartmann, Andreas: Innovationsmanagement in Bauunternehmen. In: Bautechnik 80 (2003), Ernst & Sohn, 10, S. 719-730.
- [Gir06] Girmscheid, Gerhard: Strategisches Bauunternehmensmanagement, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, u.a., 2006.
- [Gro02] Grote, Heinz: Kosten senken mit KOPF: Kybernetische Planung, Organisation und Führung, Patzer Verlag, Berlin, Hannover, 2002.
- [Gud05] Gudehus, Timm: Logistik, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, u.a., 2005.
- [Hal92] Halpin, Daniel W.; Riggs, Leland S.: Planning and Analysis of construction operations, John Wiley & Sons, Inc., New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1992.
- [Hal99] Halpin, Daniel W.; Martinez, Luis-Henrique: Real world applications of construction process simulation. In: <http://delivery.acm.org/10.1145/330000/324947/p956-halpin.pdf?key1=324947&key2=9669224011&coll=GUIDE&dl=GUIDE&CFID=34501631&CFTOKEN=47600755>. Hrsg: Winter Simulation Conference 1999, besucht am 28.12.2004.
- [Har82] Hartung, Joachim; Elpelt, B.; Klösener K.-H.: Statistik, Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik, Oldenbourg, München u.a..
- [Hei02] Heimann, Bernhard: Beitrag zur Modellierung von Informationsflüssen in logistischen Systemen, Verlag Praxiswissen, Dortmund 2002.
- [Hei69] Heinz, Klaus: Mathematisch-statistische Untersuchungen über die Erlang-Verteilung. Hrsg: Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, Westdeutscher Verlag, Köln, Opladen, 1969.
- [Hoc02] Hochstadt, Stefan: Die Zukunft der Qualifikation in der Bauwirtschaft. Innere und äußere Momente des Strukturwandels, Dissertation, Osnabrück, 2002.
- [Hof07] Hofstadler, Christian: Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, u.a., 2007.
- [Hof99] Hoffmann, Manfred: Zahlentafeln für den Baubetrieb, Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig, 1999.
- [Höl02] Hölkermann, Oliver: Berliner Beiträge zum Bauwesen Band 1: Modell eines prozessorientierten Informationssystems zur Steuerung von Bauunternehmen, Weißensee Verlag, 2002.

- [Hon01] Hong, Zhang; Shi, Jonathan J.; Tam, C.M.: Visual modelling and simulation for construction operations. In: Automation in Construction, 11(2002), 2001, S. 47-57.
- [Hon02] Hong, Zhang; Shi, Jonathan J.; Tam, Ci-Ming: Application of simulation related techniques to construction operations. In: Engineering, Construction and Architectural Management, 9(2002), 2002, S. 433-445.
- [How99] Howell, Gregory A.: What is Lean Construction - 1999.
- [Huf97] Hufschmied, Peter: Stadtverträgliches Logistikkonzept für die Bauvorhaben am Potsdamer Platz in Berlin - ein Modell für Großbaustellen. In: Innovationen im Baustellenverkehr. Strategien, Modelle, Beispiele. Hrsg: Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung und Bauwesen NRW , ILS-Schriften, 109, 1997, S. 62f.
- [IAI05] NN: IFC Standard. In: <http://www.iai-international.org/>, besucht am 07.12.2005.
- [Jac98] Jacob, Dieter: Referenzprozesse für optimale Beschaffungsstrategien. In: Baumarkt + Bauwirtschaft, 01.09.1998, 1998.
- [Jac00] Jacob, Dieter: Strategie und Controlling in der mittelständischen Bauwirtschaft. In: Baumarkt + Bauwirtschaft. Hrsg: TU Bergakademie Freiberg/Sachsen, 01.03.2000, S. 52-57.
- [Jeh99] Jehle, Egon: Produktionswirtschaft: eine Einführung mit Anwendungen und Kontrollfragen, Verlag Recht und Wirtschaft, Heidelberg, 1999.
- [Jün98] Jünemann, Reinhardt; Beyer, Andreas: Steuerung von Materialfluß- und Logistiksystemen. Hrsg: Jünemann, R.; Pfohl H.-C., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, u.a., 1998.
- [Jün00] Jünemann, Reinhardt; Schmidt, Thorsten: Materialflußsysteme, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, u.a., 2000.
- [Kal03] Kalkühler, Jan: Prozesskettenoptimierung im schlüsselfertigen Bauen durch Verbesserung von Logistikkonzepten dargestellt am Beispiel der Nachunternehmervergabe, Berlin 2003.
- [Kam94] Kamm, Hellweg: Materialwirtschaftliche Steuerung im Baubetrieb Analyse und Verbesserung baubetrieblicher Beschaffungsvorgänge, VDI-Verlag, 1994.
- [Kan04] Kang, Leen-Seok Lee; Yong-Su Kwak, Jung-Min: 4D-Modellsystem. In: CAD. Hrsg: Gyeongsang Nat.University, 01.02.2004, S. 13-15.

- [Kla06] Klaus, Peter; Kille, Christian: Die Top 100 der Logistik. Hrsg: Deutsche Verkehrszeitung (DVZ), Bundesvereinigung Logistik (BVL), 2006.
- [Kli00] Klinger, Angela: Referenzmodell für Strategien. In: in Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik. Hrsg: Wenzel, S., SCS-Europe BVBA, 2000, S. 55-70.
- [Kos92] Koselka, Laurie: Application of the new Production Philosophy to Construction, 1992.
- [Kra01] Krampe, Horst; Lucke, H.-J.: Einführung in die Logistik. In: Grundlagen der Logistik. Hrsg: Krampe, Horst, Hussverlag, 2. Auflage, 2001, S. 15-29.
- [Kra04] Krauß, Siri; Gunzenhauser, Albrecht: Hochhaus "Skyper": Bauausführung und Logistik. Hrsg: Baumarkt+Bauwirtschaft, 01.04.2004, 2004.
- [Kra05] Krauß, Siri: Die Baulogistik in der schlüsselfertigen Ausführung, Dissertation, Berner, Fritz, Universität Stuttgart, Schriftenreihe des Instituts für Baubetriebslehre der TH Stuttgart, Bauverlag GmbH, Berlin 2005.
- [Kra86] Krampert, Lothar: Der Einfluß von Arbeitseinsatz und Arbeitsstakt auf die Kosten von Hochbauten in Ortbeton, Dissertation, TH Darmstadt, 1986.
- [Kuh95] Kuhn, Axel; Bernemann, St.; Manthey, Chr.; Kaeseler; Baron, Chr.; Winz, G.: Prozessketten in der Logistik; Entwicklungstrends und Umsetzungsstrategien. Hrsg.: Kuhn, Axel, Verlag Praxiswissen, Dortmund, 1995.
- [Kul81] Kulick, R. : Logistische Aufgaben bei der Vorbereitung und Abwicklung von Auslandsbaustellen. In: Bauingenieur, Springer-Verlag, 56, 1981.
- [Law00] Law, Averill M.; Kelton, W. David: Simulation Modeling and Analysis, Mac Graw Hill, Boston, Burr Ridge, u.a., 2000.
- [Lei03] Leinz, Jürgen: Strategisches Beschaffungsmanagement in der Bauindustrie, Dissertation, TU Bergakademie Freiberg/Sachsen, 2003.
- [Len96] Lennerts, Kunibert: Ein hybrides, objektorientiertes System zur Planung optimierter Baustellenlayouts, 1996.
- [Les94] Lessmann, H.; Rieser, A; Gehri, M.: Logistik in der Bauwirtschaft. In: Bauingenieur, Springer-Verlag, 69, 1994, S. 165-174.

- [Lip99] Lipsmeier, Klaus: Abfallmanagementsysteme in der baubetrieblichen Praxis. In: Bautechnik 76, Ernst & Sohn, 1999.
- [Lun84] Lunzer, W.: Ein Beitrag zur Schaffung einheitlicher Instrumente für die Kostenplanung im Hochbau in Österreich, 1984.
- [Mai95] Maier, Wilhelm: Unkonventionelles Logistikkonzept für Europas größte Stadtbaustelle. In: Bulletin CRB, 01.05.1995, 1995, S. 6-11.
- [Man04] Mantscheff, Jack; Boisserée, Dominik: Baubetriebslehre I, Werner Verlag, Düsseldorf, 2004.
- [Mar01] Martin, Hans-Jürgen; Brettschneider, Guntram; Klein, Günter: Entwicklung und Einführung eines Internetbasierten Logistik-System für mittelständische Bauunternehmen (ILS), 2001.
- [Men03] Menzel, Karsten; Schach, Rainer ; Scherer, Raimar J.; Eisenblätter, Karin; Naumann-Jährg, René: Reorganisationspotentiale im Bauwesen durch Nutzung mobiler Informations- & Kommunikationstechnologien, 2003.
- [Mey05] Wolfgang Meyer; Ralf Cserny: Logistik am Bau. Hrsg.: Hans Mayziedt, Horst Fissenewert, Werner Verlag, 2005.
- [Möl01] Möller, Christian: Beitrag zur Potenzialanalyse im kombinierten Verkehr für Güterverkehrszentren, Dissertation, Universität Dortmund, 2001.
- [Mor06] Morchutt, Uwe: Schlanke Prozesse am Bau. In: Baumarkt + Bauwirtschaft, 01.07.2006, 2006.
- [Neu00] Neufert, Peter; Neff, Ludwig: Bauentwurfslehre, Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 2000.
- [Nit02] Nitsch, Andreas: Von der Idee zur Vorfertigung - Neue Möglichkeiten der Informationstechnologie.
- [NN01] NN: Artikelstammdaten und elektronisches Bestellwesen im Fachhandel der Baubranche. Hrsg: Heinze GmbH, BauDatenbank GmbH, 2001.
- [NN04] NN: About CSCM; <http://cic.vtt.fi/lean/cscm/index.html>. In: <http://cic.vtt.fi/lean/cscm/index.html>, besucht am 20.11.2004.
- [NN98] NN: Per Satellit durchs Regierungsviertel. In: Logistik Heute, 01.06.1998, 1998, S. 66f.
- [NNa03] NN: Lean Construction Institute Building knowledge in design and construction; <http://www.leanconstruction.org/>. In: <http://www.leanconstruction.org/>, besucht am 15.12.2003.

- [NNb03] NN: Schlussbericht: Virtueller Bauleitstand. Hrsg: Fraunhofer Gesellschaft, 2003.
- [NNc03] NN: Duden - Deutsches Universalwörterbuch A-Z, Dudenverlag, Mannheim, Leipzig u.a., 2003.
- [NNa05] NN: Wichtige Gesamtwirtschaftliche Größen. In: www.destatis.de/d_home.htm. Hrsg: Statistisches Bundesamt Deutschland, besucht am 10.10.2005.
- [NNb05] NN: Wichtige Baudaten 2004. In: www.bauindustrie.de/index.html. Hrsg: Hauptverband der Deutschen Bauindustrie, besucht am 10.10.2005.
- [NNd05] NN: Ich-Ags in Deutschland im Baugewerbe. Hrsg: Statistik der Bundesagentur für Arbeit, 2005.
- [NNe05] NN: Mobiko. In: www.mobiko.de, besucht am 29.09.2005.
- [NNf05] NN: Verband der deutschen Automobilindustrie. In: <http://www.VDA.de>, besucht am 14.12.2005.
- [NNg05] NN: Brockhaus - Die Enzyklopädie: in 30 Bänden, F. A. Brockhaus, Leipzig, Mannheim, 2005.
- [NN06a] NN: Datenreport 2006, Zahlen und Fakten über die Bundesrepublik Deutschland, Auszug aus Teil 1; Hrsg: Statistisches Bundesamt Deutschland, 2006.
- [NNb06] NN: Informationstechnologie in Unternehmen und Haushalten 2005. Hrsg: Statistisches Bundesamt Deutschland, 2006.
- [NNa07] NN: Nachhaltige Entwicklung in Deutschland, Indikatorenbericht 2006; Hrsg: Statistisches Bundesamt Wiesbaden, 2007.
- [NNb07] NN: Zahlen & Fakten. In: www.bauindustrie.de/index.html. Hrsg: Hauptverband der Deutschen Bauindustrie, besucht am 22.03.2007.
- [OBr99] O'Brien, William J.: Construction Supply-Chain Management: A Vision for Advanced Coordination, Costing, and Control. In: NSF Berkeley-Stanford Construction Research Workshop, 1999.
- [Oll03] Ollesky, Kai; Kaiser, Jörg; Würsching, Bernd: Ist Lean Thinking auf die Bauindustrie übertragbar?. In: Baumarkt + Bauwirtschaft, 01.03.2003, 2003, S. 30.
- [Ols77] Olshausen, Hans-Gustav: Verfahrens- und Kostenvergleiche von Ortbeton- mit fertigteil - system Bauweisen, Dissertation, TU Braunschweig, 1977, S. 150-155; S. 172-173.

- [Ott01] Otto, Matthias: E- Business- orientierte Baulogistik. In: <http://www.tu-berlin.de/zek/koop/publikationen/bauotto.pdf>. Hrsg: TU Berlin, besucht am 27.11. 2002, S. 88f.
- [Pag91] Page, Bernd: Diskrete Simulation, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, u.a., 1991.
- [Pfo03] Pfohl, Hans-Christian: Logistiksysteme, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, u.a., 2003.
- [Pfo05] Pfohl, Hans-Christian; Boldt, Oliver; Koldau, Alexander: E-Commerce im Baustoffhandel-Rahmenbedingungen und Einstiegsstrategien. In: Jahrbuch der Logistik 2005. Hrsg: Wolf-Kluthhausen, 2005.
- [Pid04] Pidd, Michael: Computer simulation in management science 5th ed., John Wiley & Sons Ltd., Chichester, New York u.a., 2004.
- [Ram01] Ramesh, KVSSNS; Varghese, Koshy; Sridharan, T.: Planning Construction Operations using Discrete Event Simulation. In: IE(I) Journal-CV, Vol. 82, December 2001, 2001, S. 150-156.
- [Rob04] Robinson, Stewart: Simulation The Practice of Model Development and Use, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, New York u.a., 2004.
- [Sch01] Schnüll, Robert; Hoffmann, Stephan, Kölle, Matthias, Engelmann, Frank: Grundlagen für die Bemessung von fahrgeometrischen Bewegungsräumen für Nutzfahrzeuge mit mehr als 3,5 t zulässigem Gesamtgewicht. Hrsg: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn, 2001.
- [Sch02] Schönberger, Karsten: Entwicklung eines Workflow-Management-Systems zur Steuerung von Bauprozessen in Handwerkernetzen, Dissertation, Universität Karlsruhe, Fak. f. Bauingenieur- und Vermessungswesen, 2002.
- [Sch03] Schmidt, Norbert: Wettbewerbsfaktor Baulogistik, Dissertation, Universität Nürnberg, Edition Logistik, Band 6, Deutscher Verkehrsverlag, Hamburg 2003.
- [Sch97] Schmidt, Ulrich: Angewandte Simulationstechnik für Produktion und Logistik. Hrsg: Kuhn, Axel, Verlag Praxiswissen, Dortmund, 1997.
- [Sch98] Schlittgen, Rainer: Einführung in die Statistik, Oldenbourg, München, Wien, 1998.

- [Scho00] Schönball, Ralf: Die Bauwirtschaft läuft unrund; http://www.berlin.ihk24.de/share/bw_archiv/bw2000/0006012a.htm, 04.01.2005, 2000.
- [Scho02] Schopbach, Holger: Ansätze zur Kostensenkung in Konstruktion und Baubetrieb durch Einsatz mathematischer Optimierungsmethoden, Kassel Univ. Press, Kassel 2002.
- [Ste02] Steiger, Winfried: Baulogistik für Großbaustellen. In: Baumarkt + Bauwirtschaft, 3/2002, 2002, S. 87f.
- [Ste06] Steinhauer, Dirk: Simulation im Schiffbau – Unterstützung von Werftplanung, Produktionsplanung und Produktentwicklung bei der Flensburger-Schiffbaugesellschaft. In: Simulation in Produktion und Logistik 2005, SCS Publishing House e.V., 2006.
- [Str06] Streck, Stefanie: Nachhaltiges Bestandsmanagement als zukunftsfähiges Geschäftsmodell. In: RKW Baurationalisierung ibr, 01.07.2006, 2006.
- [Tam04] Tamaschke, Hans: Systematische Verkehrssteuerung von und zu Baustellen. In: VDBUM Information, 01.05.2004, 2004.
- [Taw01] Tawik, Hissam; Fernando, Terrence: A simulation Environment for construction Site planning. Hrsg: Salford University UK, 2001.
- [Töp01] Töpfer, Regina: Baustelleneinrichtungsplanung. Hrsg: TU Dresden, expert verlag.
- [VDI 2195] Verein deutscher Ingenieure: VDI Richtlinie 2195: Zeit- und Umschlagstudien an Kranen. VDI-Gesellschaft Materialfluß und Fördertechnik, 01.04.1985.
- [VDI 3573] Verein deutscher Ingenieure: VDI Richtlinie 3573: Arbeitsgeschwindigkeiten schienengebundener Umschlagkrane VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluß Logistik, 01.07.1994.
- [VDI 3633-1] Verein deutscher Ingenieure: VDI Richtlinie 3633, Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen, Grundlagen. Hrsg: VDI, Beuth Verlag, 1993.
- [VDI 3633-3] Verein deutscher Ingenieure: VDI Richtlinie 3633, Blatt 3: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen, Experimentplanung und -auswertung. Hrsg: VDI, Beuth Verlag, 1995.
- [Vri99] Vrijhoef, Ruben; Koskela, Lauri: Roles of Supply Chain Management in Construction. In: <http://cic.vtt.fi/lean/cscm/index.html>.

- [Web05] Weber, Jörg; Kath, Thilo: Baulogistik: ein aktuelles Meinungsbild. In: Baumarkt + Bauwirtschaft, 01.06.2005, 2005.
- [Web06] Weber, Jörg: Simulation von Logistikkonzepten auf Baustellen. In: Simulation in Produktion und Logistik 2006. Hrsg: Wenzel, S., SCS Publishing House e.V., 2006.
- [Wei05] Weitz, Heinrich: Die Erwartungen der deutschen Bauindustrie an das Baujahr 2006. In: RKW Baurationalisierung ibr, 01.12.2005, 2005.
- [Wei06] Weissenberger-Eibl, Marion; Spieth, Patrik: Wissensmanagement in Logistiknetzwerken im Kontext der Grenzen der Selbststeuerung. In: Wirtschaft & Logistik. Hrsg: Pfohl, H-Chr. und Wimmer, Th., Deutscher Verkehrsverlag, 2006.
- [Wei07] Weitz, Heinrich: Bauaufschwung hält 2007 an. In: Baumarkt + Bauwirtschaft, 03/2007.
- [Wil77] Wilhelm, Günter: Das Warteschlangenproblem bei Produktionsketten im Straßenbau. Hrsg: Drees, G., Bauverlag GmbH, Wiesbaden, Berlin, 1977.
- [Wir01] Wirth, Siegfried; Mann, H.; Krampe, H.: Logistik im Industrieunternehmen. In: Grundlagen der Logistik. Hrsg: Krampe, Horst, Hussverlag, 2. Auflage, 2001, S. 15-29.
- [Wom92] Womack, James; Jones, D. T.; Roos, D.: Die zweite Revolution in der Autoindustrie: Konsequenzen aus der weltweiten Studie aus dem Massachusetts Institute of Technology, Campus-Verlag, Frankfurt, New York, 1992.
- [Yan04] Yang, J.L.; Mahdjoubi, L.: A fuzzy decision support system for materials route in construction site; In: <http://www.arcom.ac.uk/workshops/02-Salford/04-Yang.pdf>, besucht am 10.10.2004.
- [Zen04] Zentralverband Deutsches Baugewerbe: Analyse und Prognose (Bauwirtschaftlicher Bericht 2003/2004), 2004.

Glossar

*.dxf-Standard	D rawing E xchange F ormat ist ein ASCII-Text-basiertes CAD-Datei Austauschformat des Unternehmens Autodesk.
3D-CAD-Modell	Ein 3D-CAD-Modell (d reidimensionales C omputer A ided D esign-Modell) ist eine im Computer entwickelte dreidimensionale Zeichnung eines mehrteiligen komplexen Gegenstandes, der durch weitere (z. T. nicht-sichtbare) Attribute beschrieben wird.
ABC-Analyse	Die ABC-Analyse gruppiert Objekte nach zweidimensionalen Kriterien in die drei Klassen A, B und C mit dem Ziel wichtige Objekte von unwichtigen zu unterscheiden. Z. B. können Produkte in einem Lager nach ihrem Wert/Menge Verhältnis klassifiziert werden. Ein typisches Ergebnis wäre, dass 10 % aller Produkte 65 % des gesamten Lagerwertes ausmachen (= Klasse A) 20 %, 15 % des Wertes (= Klasse B), während 70 % aller Produkte nur 20 % des Wertes (= Klasse C).
AVA-Programme	A ngelot V ergabe A brechnung - Programme unterstützen elektronisch die drei vorgenannten Aufgaben im Bauwesen.
B2B-Geschäft	Als B2B-Geschäft (B usiness to B usiness) bezeichnet man den Handel zwischen zwei gewerblichen Partnern über das Internet als Plattform.
Bauvolumen	Das Bauvolumen erfasst alle im Inland erbrachten Bauleistungen, also Neu-, Um- oder Erweiterungsbauten und nichtwerterhöhende Reparaturen.
BMBF	B undes m inisterium für B ildung und F orschung.
DV	D aten V erarbeitung, Kurzform der Elektronischen Daten Verarbeitung. Daten werden in einer (meist elek-

	tronischen) Form erfasst und in einer speziellen Form weiterbehandelt.
E-Business	E lectronic-Business ist die allgemeine Beschreibung für den Internet Handel.
Facility Management	Unter Facility Management versteht man den Betrieb und die Verwaltung von Gebäuden und Anlagen. Häufig ist diese CAD-unterstützt, da viele Verwaltungsgegenstände wie Mietflächen durch das Gebäudemodell visualisieren und bearbeiten lassen.
Finite Elemente	Die Methode der Finiten Elemente ist ein numerisches Näherungsverfahren zur Berechnung partieller Differentialgleichungen. Im Bauwesen wird das Verfahren häufig in der Statik eingesetzt, wenn komplexe Tragwerke berechnet werden müssen.
Generalunternehmer	Das Generalunternehmen übernimmt die Verantwortung gegenüber dem Bauherrn für die Erstellung eines Bauwerks und koordiniert die einzelnen Gewerke. Hierbei kann das Unternehmen selbst die Gewerke durchführen oder Nachunternehmer einsetzen. Je nach Ausprägung werden auch Planungs- oder Ingenieurleistungen übernommen.
I & K-Technologie	Die I nformations- und K ommunikationstechnologie befasst sich mit Techniken, bei denen Daten und Informationen elektronisch erfasst, verarbeitet und weitergeleitet werden. Wesentliche Komponenten sind dabei einerseits die mobilen Endgeräte in allen möglichen Formen und andererseits die zugehörigen Kommunikationsnetze in allen Größenordnungen.
Just-in-Time	Das Just-in-Time Konzept entstammt ursprünglich dem Toyota-Produktions-System und ist die Leistungsbereitstellung genau zum Bedarfszeitpunkt. Das Konzept sieht dabei vor jegliche Zeit-, Material-, Arbeitskraft- oder Energieverschwendung innerhalb der gesamten Lieferkette zu vermeiden. Just-in-Time ist allerdings inzwischen zu einem Schlagwort geworden, das lediglich den Lieferzeitpunkt beschreibt und die aus der Verschwendung entstehenden Kosten nur auf die vorgelagerte Versorgungsstufe, meist die Lieferanten abwälzt.
Lean Production	Die Schlanke Produktion ist im Toyota-Produktionssystem Ende der 1940er Jahre in Japan entstanden,

	bei der sehr konsequent alle nichtwertschöpfenden Prozesse, die nicht unbedingt notwendig sind, eliminiert wurden. Ein Konzept, um dies zu erreichen war die Just-in-Time Belieferung.
Modal Split	Der Modal Split weist die Verteilung eines Verkehrsaufkommens auf verschiedene Verkehrsträger auf. Der Güterverkehr in Deutschland wird vom Straßentransport dominiert, gefolgt von der Schiene, der Binnenschifffahrt, dem Luftverkehr und den Rohrleitungen.
ODBC	Die O pen D ata B ase C onnectivity ist eine auf der Datenbanksprache SQL basierende <i>standardisierte</i> Schnittstelle.
OEM	In der Automobilindustrie werden die Hersteller der Endprodukte als O riginal E quipment M anufacturer bezeichnet. Dabei werden viele Teile und Komponenten nicht mehr selbst produziert, sondern von anderen Herstellern eingekauft. Der Begriff ist allerdings in anderen Branchen wie die Computerindustrie auch anders besetzt, was der eigentlichen Übersetzung entspricht.
Outsourcing	Unter Outsourcing versteht man den Einkauf einer bestimmten Leistung bei einem anderen Unternehmen, die ein Unternehmen bisher selbst ausgeführt hat.
PDA	P ersonal D igital A ssistent; Mobile Kleincomputer, für die es eine Reihe an Softwareanwendungen gibt.
Return on Invest	Der Return on Invest (=ROI) beschreibt den Zusammenhang zwischen investiertem Kapital und dem nachfolgend erzielten Gewinn bezogen auf eine bestimmte Zeitspanne (hier: Beginn der Planungen bis zur Abnahme).
RFID-Technologie	Die R adio F requency I dentification Technologie ermöglicht es Informationen von einem Informationsträger mittels Radiowellen auszulesen, ohne das zu diesem unmittelbarer Sichtkontakt besteht.
Sankey-Diagramm	Sankey-Diagramme bilden Ströme von Objekten von einer Quelle zu verschiedenen Zielen in der Weise ab, dass die Breite der Pfeile zu den einzelnen Zielen die absolute oder relative Menge der Objekte repräsentiert.

SQL	Structured Query Language ist eine Datenbanksprache für relationale Datenbanken.
StVZO	Straßenverkehrszulassungsordnung .
Subunternehmer	Sub- und Nachunternehmer stehen synonym für Unternehmen die im Unterauftrag des Hauptunternehmers Bauleistungen durchführen, ohne eine vertragliche Verbindung zum Bauherrn zu haben. Der Hauptunternehmer ist voll für die erbrachten Leistungen des Sub-/Nachunternehmers verantwortlich.
VOB	Die dreiteilige Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen regelt die Vergabe von Bauaufträgen durch öffentliche Auftraggeber. Der Teil B ‘Allgemeine Vertragsbedingungen für die Ausführung von Bauleistungen’ (VOB/B) muss von öffentlichen Auftraggebern zum Vertragsbestandteil gemacht werden, bei privaten Akteuren kann dieser Vertragsbestandteil werden.

Anhang A

Umrechnungen von Zeiten und Koordinaten

A.1 Simulationszeit \rightarrow Realzeit

Für die Umrechnung der Simulationszeit in die Realzeit werden folgende Vereinfachungen getroffen:

- Startdatum ist stets ein Montag.
- Die tägliche Arbeitszeit ist fest.
- Sa/So wird nicht gearbeitet.

$$t_{real} = t_{sim} + \left(\left\lceil \frac{t_{sim}}{t_{AZT}} \right\rceil - 1 \right) \cdot t_{RZT} + \left(\left\lceil \frac{t_{sim}}{5 \cdot t_{AZT}} \right\rceil - 1 \right) \cdot t_{RZW} \quad (\text{A.1})$$

mit

t_{sim}	=	Simulationszeit
t_{RZT}	=	Ruhezeit pro Tag
t_{RZW}	=	Ruhezeit am Wochenende
t_{AZT}	=	Arbeitszeit pro Woche

A.2 Realzeit \rightarrow Simulationszeit

Neben den in A.1 getroffenen Vereinfachungen gilt für diese Umrechnung die Einschränkung, dass die eingegebene Realzeit in der Arbeitszeit liegen muss. Die Dauer zwischen dem Startwert (TT:MM:JJJJ:hh:mm) und dem Ereignis (TT:MM:JJJJ:hh:mm) in der Realzeit wird als t_{real} eingegeben.

$$\begin{aligned}
t_{sim} &= \left\lfloor \frac{t_{real}}{t_{Wo}} \right\rfloor \cdot t_{AZW} \\
&+ \begin{cases} t_{AZW} & \text{für } \left\lfloor \frac{t_{real} \bmod t_{Wo}}{t_{Tag}} \right\rfloor \cdot t_{AZT} > (t_{AZW} + t_{AZT}) - 1 \\ \left\lfloor \frac{t_{real} \bmod t_{Wo}}{t_{Tag}} \right\rfloor \cdot t_{AZT} & \text{für } \left\lfloor \frac{t_{real} \bmod t_{Wo}}{t_{Tag}} \right\rfloor \cdot t_{AZT} \leq (t_{AZW} + t_{AZT}) - 1 \end{cases} \\
&+ \begin{cases} 0 & \text{für } \left\lfloor \frac{t_{real} \bmod t_{Wo}}{t_{Tag}} \right\rfloor \cdot t_{AZT} > (t_{AZW} - 1) \\ * & \text{für } \left\lfloor \frac{t_{real} \bmod t_{Wo}}{t_{Tag}} \right\rfloor \cdot t_{AZT} \leq (t_{AZW} - 1) \end{cases}
\end{aligned} \tag{A.2}$$

*

$$\begin{cases} t_{AZT} & \text{für } t_{real} \bmod t_{Wo} - \left\lfloor \frac{t_{real} \bmod t_{Wo}}{t_{Tag}} \right\rfloor \cdot t_{Tag} > t_{AZT} \\ t_{real} \bmod t_{Wo} - \left\lfloor \frac{t_{real} \bmod t_{Wo}}{t_{Tag}} \right\rfloor \cdot t_{Tag} & \text{für } t_{real} \bmod t_{Wo} - \left\lfloor \frac{t_{real} \bmod t_{Wo}}{t_{Tag}} \right\rfloor \cdot t_{Tag} \leq t_{AZT} \end{cases}$$

mit

- t_{real} = Realzeit als Zeitspanne zwischen Startdatum und Ereignis
- t_{Wo} = Zeit pro Woche (bei [h] $7 * 24 = 168$)
- t_{Tag} = Zeit pro Tag (bei [h] 24)
- t_{AZW} = Arbeitszeit pro Woche
- t_{AZT} = Arbeitszeit pro Tag

Die folgende Zeichnung zeigt den Verlauf von einem Mittwoch bis zu einem Samstag in der darauffolgenden Woche mit einer täglichen Arbeitszeit von 10 h. Die Realzeit in [h] ist auf der Abszisse aufgetragen – die zugehörige Simulationszeit in [h] kann auf der Ordinate abgelesen werden.

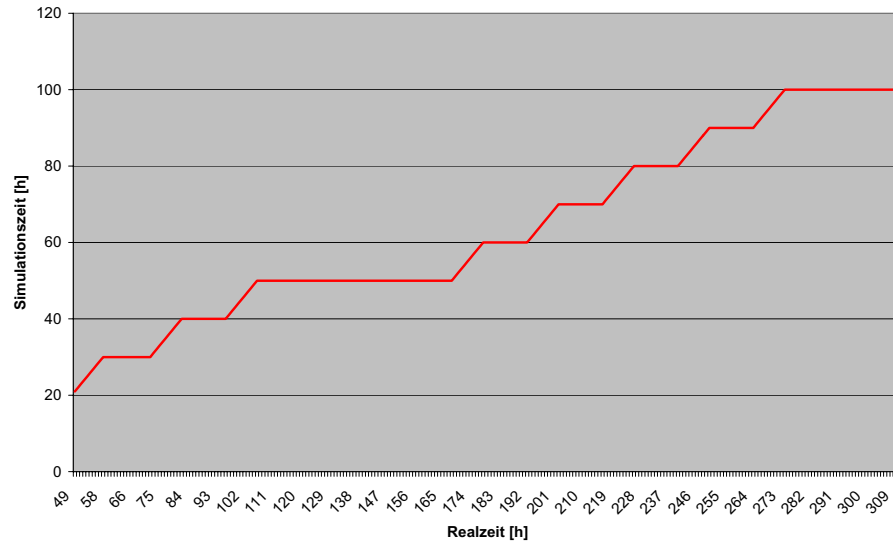


Abbildung A.1: Umrechnung Realzeit in Simulationszeit

A.3 Umrechnung kartesischer Koordinaten

Das Layout der Materialfluss-Simulation und die Koordinaten der Bauteile liegen in Kartesischen Koordinaten vor. Zur Bestimmung der Kranzeiten werden diese in Zylinderkoordinaten umgerechnet.

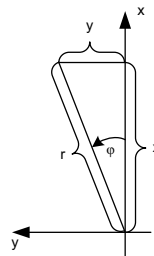


Abbildung A.2: Kartesische/Zylinderkoordinaten

$$\begin{aligned}x &= \cos \varphi \cdot r \\y &= \sin \varphi \cdot r \\z &= h\end{aligned}$$

nach r und φ aufgelöst ergibt sich:

$$\begin{aligned}r &= \sqrt{x^2 + y^2} \\ \varphi &= \arctan \frac{y}{x} + \pi \cdot u_0(-x) \cdot \operatorname{sgn}(y)\end{aligned}$$

Der Winkel φ wird in der Formel im Bogenmaß bestimmt. Eine Umwandlung in Grad erfolgt durch Multiplikation mit $360/(2 * \pi)$. Die Eindeutigkeit des Winkels wird in der Formel durch Verwendung der Funktionen $u_0(-x)$ und $\operatorname{sgn}(y)$ erreicht, wobei $u_0(-x)$ für $-x \leq 0$ den Wert 0 und für $-x > 0$ den Wert 1 annimmt, sowie die Vorzeichenfunktion $\operatorname{sgn}(y)$ für $y > 0$ den Wert 1, für $y = 0$ den Wert 0 und für $y < 0$ den Wert -1 annimmt. Dadurch ergeben sich nach Umrechnung in Grad eindeutige Winkel im Bereich $-180^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$.

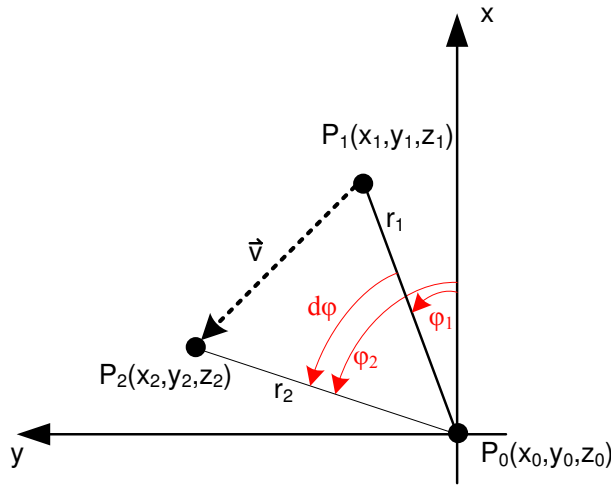


Abbildung A.3: Vektor im Raum

Die Abbildung A.3 zeigt ein dreidimensionales, kartesisches Koordinatensystem, dessen Ursprung durch den Punkt P_0 bestimmt ist. Der Vektor \vec{v} , der in einem Zylinderkoordinatensystem mit selben Ursprung liegt, wird durch die kartesischen Punkte P_1 und P_2 beschrieben und bildet eine Bewegung vom Punkt P_1 zu P_2 ab. Die Einzelkomponenten des Vektors, lassen sich dabei

mithilfe folgender Gleichungen bestimmen. Dazu ist es zunächst erforderlich, die kartesischen Koordinaten der Punkte mithilfe der o. g. Formeln in Zylinderkoordinaten zu transformieren.

$$d\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$$

$$dr = r_2 - r_1$$

$$dz = z_2 - z_1$$

Anhang B

Ergänzende Tabellen

B.1 Datenbanktabellen

B.1.1 Materialtabelle

Feldname	Bedeutung
Material_ID	aus CAD
Einheit	in [Stk, m^3 , m^2 , t]
Transporteinheiten	Menge pro Lkw nach Einheit [Stk, m^3 , m^2 t]
Liefereinheiten	Menge pro Kranumschlag nach Einheit [Stk, m^3 , m^2 t]
Krananschlag	Zeit in [s] zum Anhängen der Last
Kranabgabe	Zeit in [s] zur Abgabe der Last
Lagerbedingungen	im Freien, mit Folie geschützt, nicht möglich usw.
Stapelbarkeit	einfach, mehrfach
Lagerflächenbedarf	in m^2 pro Mengeneinheit
Verschnitt	in % Mehrbedarf
Warengruppenschlüssel	möglicher Zugriff auf eine externe Datenbank
Dauer (min)	Aufandswert für Verarbeitung des Materials in [h]/Einheit
Dauer (max)	

Tabelle B.1: Feldnamen der Materialtabelle mit logistischen Eigenschaften

Die Aufandswerte entstammen im Wesentlichen den Richtwerten für Stundenansätze nach dem Bauarbeitsschlüssel (BAS), die denen der Freundlieb GmbH übereinstimmen. Wenn nach BAS kein Stundensatz vorhanden war, wurden die Angaben der Freundlieb GmbH verwendet.

Material	Einheit (=Eh)	Aufandswert [h/Eh]	Bemerkung
Fertigteil	Stk	0,35-0,5	nach BAS
Bewehrung	t	12-27	nach BAS
Ortbeton	m^3	0,3-0,5	nach BAS
Fenster	Stk	0,8-1,5	nach BAS
Estrich	m^3	0,5-0,8	nach BAS
Putz	m^2	0,3-0,4	nach BAS
Trockenwände	m^2	0,16-0,121	nach Freundlieb GmbH
Türen	Stk	0,8-1,5	nach BAS

Tabelle B.2: Aufandswerte Materialverarbeitung

B.1.2 Arbeitsabschnitte

Spalte 1	Spalte 2
ID	fortlaufende Nummerierung
Anzahl	Anzahl der Bauelemente eines Arbeitsabschnitts
Vorbelegung	zur Entkopplung von Arbeitsabschnitten
Vorgängerabschnitt	ID eines möglichen Vorgängerabschnitts
Einbaufertig	Kennzeichnung des Vorgängerstatus

Tabelle B.3: Spalten der Arbeitsabschnittstabelle

B.1.3 Materiallieferabschnitte

Spalte 1	Spalte 2
ID	fortlaufende Nummerierung
Filltype_ID	Material ID nach CAD
Lieferdatum	Datum und Uhrzeit der geplanten Lieferung
Lieferzeitpunkt	umgerechnet in Sekunden
verkürzter Lieferzeitpunkt	frei

Tabelle B.4: Spalten der Materiallieferabschnittstabelle

B.1.4 Lagertabelle

Spalte 1	Spalte 2
ID	fortlaufende Nummerierung der Läger
location_x	globale x-Koordinate des Lagers
location_y	globale y-Koordinate des Lagers
location_z	globale z-Koordinate des Lagers
Status	0: geschlossen/voll; 1: offen; -1: nicht mehr bedienbar
Abstand	Summe aller Abstände Ziel der Bauelemente zum Lager

Tabelle B.5: Spalten der Lagertabelle

B.2 Logistische Materialwerte

B.2.1 Packmittel-Ladeinheit-Transporteinheit

Material	Packstück		Ladeinheit			Transporteinheit	
	Menge	Packmittel	Anzahl Packst.	Ladehilfsmittel	Menge /Ladeeininh.	Anzahl Ladeeinheiten	Art
Putz	30 <i>kg</i>	Sack	40	Euro-Palette	1200 <i>kg</i>	12	Lkw
Gipskarton	31,2 <i>kg</i>	lose	50	Sonder-Palette	1560 <i>kg</i>	13,5	Lkw
Ortbeton	1 <i>m</i> ³	lose	–	Betonbombe	1 <i>m</i> ³	7	Lkw
Estrich	40 <i>kg</i>	Sack	30	Euro-Palette	1200 <i>kg</i>	15	Lkw
Bewehrung	1300 <i>kg</i>	lose	15	Rolle	1300 <i>kg</i>	15	Lkw
Türen	120 <i>kg</i>	lose	4	Sonder-Palette	1200 <i>kg</i>	13	Lkw
Fenster	60 <i>kg</i>	lose	4	Gestell	600 <i>kg</i>	13	Lkw
Fertigteil	3000 <i>kg</i>	lose	1	lose	1 <i>Stk</i>	12	Lkw

Tabelle B.6: Logistikstammdaten 1

B.2.2 Lagerflächenbedarf

Material	Einheit	Menge		Lagerflächenbedarf		
		Einheit	Einheit	/Ladeeinheit	/Einheit	/Produkt ^a
		/Ladeeinheit	/Transportmittel	[m ²]	[m ²]	[m ²]
Putz	m ²	120	1440	0,95	0,01	0,05
Gipskarton	m ²	78	1053	2,5	0,03	0,19
Ortbeton	m ³	1	7	–	–	–
Estrich	m ³	13	195	0,96	0,07	0,21
Bewehrung	t	1,3	19,5	32,5	25	2,08
Türen	Stk	4	150	2,64	0,26	0,26
Fenster	Stk	4	150	2,64	0,13	0,13
Fertigteil	Stk	1	12	7,5	7,5	7,5

Tabelle B.7: Logistikstammdaten 2

^aDurchschnittswert