

Tobias Schmuck

*Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation*





Tobias Schmuck

*Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions-  
und Logistiknetzwerke mittels Simulation*

Bericht aus dem Lehrstuhl für  
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik  
Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

**FAPS**



**Meisenbach**  
GmbH Verlag

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung:

22. November 2013

Vorsitzende des Promotionsorgans:

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann

Prof. Dr.-Ing. Reinhard German

### **Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

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

ISSN 1431-6226

ISBN 978-3-87525-374-0

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks  
und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus,  
vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des  
Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein  
anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichts-  
gestaltung - mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich  
genannten Sonderfällen -, reproduziert oder unter Verwendung  
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder  
verbreitet werden.

© Meisenbach Verlag Bamberg 2014

Herstellung: inprint GmbH, Erlangen

Printed in Germany

# **Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation**

Der Technischen Fakultät der  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
zur  
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Tobias Schmuck  
aus Bamberg



## **Vorwort und Danksagung**

Die vorliegende Dissertation basiert auf meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, dem damaligen Leiter dieses Lehrstuhls innerhalb des Departments Maschinenbau, danke ich sehr herzlich für die engagierte Förderung bei der Durchführung meiner Arbeit, für die konstruktiven Anregungen sowie für das mir entgegengebrachte Vertrauen, das mir ein eigenverantwortliches Arbeiten ermöglichte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Reinhard German, dem Leiter des Lehrstuhls für Rechnernetze und Kommunikationssysteme, danke ich für die wohlwollende Übernahme des Korreferats. Darüber hinaus möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Klaus Meyer-Wegener, dem Leiter des Lehrstuhls für Datenmanagement, als weiterem Mitglied des Prüfungskollegiums und bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke, dem Leiter des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes bedanken.

Bei meinen Kollegen am Lehrstuhl bedanke ich mich für die hervorragende Zusammenarbeit, die zu einer sehr angenehmen Arbeitsatmosphäre beigetragen hat. Besonders möchte ich meinen Kollegen Dr.-Ing. Andreas Dobroschke, Dipl.-Ing. Matthias Brossog, Dipl.-Inf. Jochen Mehrhof und Dr.-Ing. Markus Michl danken. Ein herzliches Dankeschön gilt Herrn Dr.-Ing. Andreas Schaller, der im Rahmen zahlreicher Diskussionen und Gespräche einen wesentlichen Anteil zu dieser Arbeit beigetragen hat.

Ferner möchte ich mich bei allen Studierenden bedanken, die mich im Rahmen ihrer Tätigkeiten bei der Dissertation unterstützt haben. Besondere Beiträge leisteten dazu Herr Dipl.-Ing. Florian Kraft, Frau Dipl.-Wirtsch.-Ing. Karolin Dorn und Frau Dipl.-Wirtsch.-Ing. Katrin Gutknecht.

Mein größter Dank gilt jedoch meiner Rika für die immerwährende Motivation, Geduld und Unterstützung, die mir bei der Anfertigung dieser Dissertation sehr geholfen hat. Ihr widme ich diese Arbeit.

Bamberg, im Oktober 2014

Tobias Schmuck



## Inhalt

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation .....	1
1.2	Ziel und Gang der Arbeit .....	2
2	Wertschöpfungsnetzwerke im globalen Umfeld.....	4
2.1	Globalisierte Produktion und Produktionssystematik.....	5
2.1.1	Aufspaltung der Wertschöpfungskette und Konzentration auf Kernkompetenzen.....	5
2.1.2	Markt als Entscheidung für den Produktionsstandort.....	7
2.1.3	Anpassung der Wertschöpfungskette und Verschiebung der Kundenspezifizierung.....	8
2.2	Die Rolle der Logistik in global verteilten arbeitsteiligen Netzwerken .....	9
2.2.1	Beschaffungslogistik .....	11
2.2.2	Produktionslogistik .....	13
2.2.3	Distributionslogistik .....	14
2.2.4	Physische Logistik .....	14
2.2.5	Dispositive Logistik .....	15
2.3	Planung und Steuerung der Logistik mit <i>Supply Chain Management</i> .....	19
2.3.1	Begriffsbestimmung <i>Supply Chain Management</i> .....	20
2.3.2	Abbildung charakteristischer Kundenbedarfe in <i>Supply Chains</i> .....	21
2.3.3	Der Bullwhip-Effekt als Zeichen für bestehende Defizite in mehrstufigen Liefernetzwerken .....	22
2.3.4	<i>Supply Chain Planning</i> als Bestandteil des <i>Supply Chain Managements</i> .....	24
2.3.5	Nachhaltige Logistikplanung durch <i>Supply Chain Simulation</i> .....	25
3	Produktion und Logistik in der Kommunikations- und Konsumelektronik .....	27
3.1	Einflussfaktoren auf die Produktion elektronischer Kommunikations- und Konsumprodukte .....	28
3.2	Herstellung elektronischer Baugruppen.....	31
3.2.1	Prozessfolge bei der Leiterplattenbestückung im <i>Frontend</i> -Bereich .....	32
3.2.2	Materialflusskonzepte bei der Bestückung elektronischer Baugruppen .....	33

3.2.3	Endmontage im Backend-Bereich.....	34
3.3	Herausforderungen bei der Distribution mobiler Kommunikations- elektronik .....	36
3.3.1	Technologische Entwicklung mobiler Kommunikationselektronik .....	36
3.3.2	Wandel der Produktionssystematik .....	38
3.3.3	Potentiale durch die Bildung neuer Distributionsstrategien .....	40
3.3.4	Distribution mobiler Kommunikationselektronik.....	41
4	Digitale Planungswelten in Produktion und Logistik .....	45
4.1	Simulation im Umfeld der Digitalen Fabrik.....	45
4.1.1	Digitale Fabrik.....	45
4.1.2	Simulation in der Produktionstechnik .....	47
4.1.3	Die Rolle der Materialflusssimulation .....	48
4.2	Ein Vorgehensmodell zur Durchführung von Simulationsstudien .....	51
4.2.1	Systembegriff .....	53
4.2.2	Modellierung und Abstraktion.....	56
4.2.3	Phasenbeschreibung .....	58
4.3	Vision neuer digitaler Planungswelten.....	64
4.3.1	Planen und Simulieren in der <i>Cloud</i> .....	65
4.3.2	Social Media in Organisationen - Potenziale bei Planung und Simulation in Produktion und Logistik .....	66
4.3.3	Simulation als eine <i>Software-as-a-Service</i> -Dienstleistung.....	68
5	Ein Referenzmodell zur Modellierung und Simulation von Logistik- und Supply Chain Netzwerken .....	69
5.1	Einordnung des Begriffes „Referenzmodell“ .....	69
5.1.1	Referenzmodelle für die Simulation von Produktions- und Logistiksystemen .....	70
5.1.2	Das SCOR-Modell als logistisches Referenzmodell .....	72
5.1.3	Modularer Grundaufbau des entwickelten Referenzmodells.....	73
5.2	Grundbausteine für die Modellbildung .....	74
5.2.1	Der Grundbaustein DEMAND .....	76



5.2.2	Der Grundbaustein TRANSPORT.....	77
5.2.3	Der Grundbaustein DELIVER .....	78
5.2.4	Der Grundbaustein STORE .....	80
5.2.5	Der Grundbaustein MAKE.....	84
5.2.6	Der Grundbaustein SOURCE .....	86
5.2.7	Der Grundbaustein PLAN .....	88
5.3	Modulbildung für eine differenzierte Modellgestaltung.....	88
5.3.1	Das Liefermodul.....	89
5.3.2	Das Produktionsmodul.....	90
5.3.3	Das Lagermodul.....	90
5.4	Modellierung und Anwendung .....	91
5.4.1	Modellierung und Parametrisierung grundlegender Systemkonfigurationen .....	92
5.4.2	Modellinitialisierung.....	92
5.4.3	Simulation verbrauchsgesteuerter Dispositionsverfahren .....	93
5.4.4	Simulation des Bullwhip-Effekts .....	95
6	Konzeption eines modularen webbasierten Dienstes zur Simulation von Produktions- und Logistiksystemen.....	100
6.1	Grundlagen und Begriffe zur webbasierten Simulation.....	100
6.1.1	Grundstruktur des Internets .....	100
6.1.2	Web-Applikationen und webbasierte Dienste.....	104
6.2	Simulation als webbasierter Dienst.....	104
6.2.1	Begriff der webbasierten Simulation .....	105
6.2.2	Eigenschaften der webbasierten Simulation als unternehmens- externe Dienstleistung .....	106
6.2.3	Eigenschaften der webbasierten Simulation bei unternehmens- internem Einsatz .....	108
6.3	Architektur einer anforderungsgerechten Kommunikations- und Informationsstruktur.....	109
6.3.1	Architekturstile und –schichten zur webbasierten Simulation .....	110
6.3.2	Ein mehrschichtiges Architekturkonzept zur webbasierten Simulation .....	114

6.3.3	Datenbanksysteme .....	115
6.4	XML-basierte Modell- und Datenübertragung.....	116
6.5	Modellierung unter Verwendung von Bausteinbibliotheken .....	118
7	Aufbau und prototypische Umsetzung einer webbasierten Anwendung zur Simulation von Produktionsprozessen in der Elektronik.....	120
7.1	Bausteinbibliothek zur Modellierung von Abläufen in der Elektronikproduktion .....	121
7.1.1	Bausteinauswahl.....	121
7.1.2	Anlagenrelevante Zustände und Parameter .....	123
7.1.3	Bausteinmodellierung .....	125
7.2	Datenverwaltungsebene.....	127
7.2.1	Die Organisation der Modelltabellen und die Abbildung der Bausteinreihenfolge .....	128
7.2.2	Änderung der Bausteinreihenfolge.....	130
7.2.3	Aufbau der Bausteintabellen .....	131
7.2.4	Verwaltung der Simulationsergebnisse.....	132
7.3	Darstellungsebene und Datenbankzugriff.....	132
7.3.1	Eine Methode zur strukturierten Darstellung und dynamischen Generierung von Webinhalten .....	133
7.3.2	Die Kommunikation zwischen Darstellungs- und Datenebene.....	135
7.3.3	Verwaltung temporärer Verbindungsdaten mit Hilfe von <i>Sessions</i> .....	137
7.3.4	Darstellung der Simulationsmodelle im Internetsystem .....	138
7.3.5	Modellierung und graphische Darstellung des Linienaufbaus.....	139
7.3.6	Parametrisierung der Modellelemente .....	142
7.3.7	Simulation und Ergebnisabruf .....	144
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	148
	Literaturverzeichnis .....	151

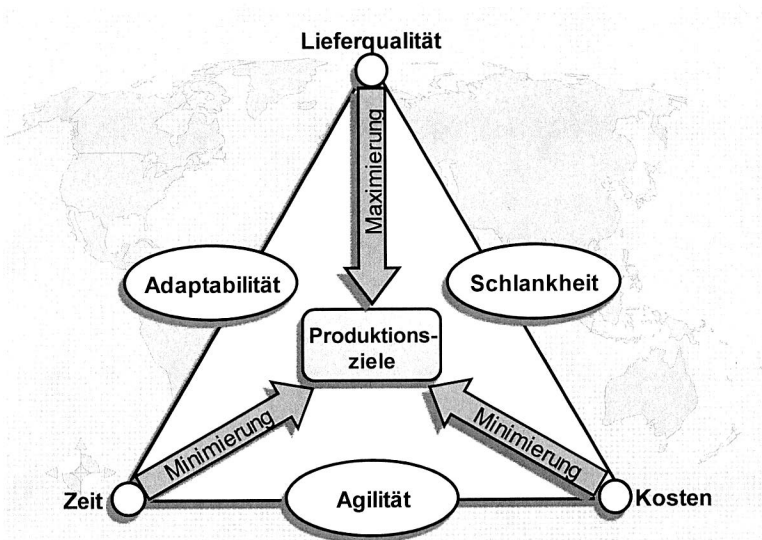
# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Unternehmen sind einem ständigen Wandlungs- bzw. Anpassungsprozess ausgesetzt – zum einen durch sich verändernde Produkte, herzustellende Mengen und neue Technologien, zum anderen durch die damit verbundenen wirtschaftlichen Ziele. Der Wettbewerb fordert daher von Unternehmen, flexibel auf unterschiedliche Märkte reagieren zu können. Die Folge ist, dass auch die Produktionssysteme fähig sein müssen, agil den Veränderungen zu entsprechen. Agilität zeichnet sich dabei als die Fähigkeit eines bestehenden Systems aus, sich innerhalb definierter Grenzen schnell und eventuell auch im häufigen Wechsel an Veränderungen anzupassen. Als Beispiel sei hier die Reaktion eines Systems auf gestiegene Stückzahlen innerhalb eines Kapazitätskorridors zu nennen. Die Adaption von Systemen geht über die Agilität hinaus und beinhaltet die Fähigkeit eines Systems, nicht nur schnell auf Veränderungen zu reagieren, sondern dies vor allem auch strukturell und nachhaltig zu tun, so beispielsweise der Wandel eines *Push*-Systems zu einem *Pull*-System. Einher geht zugleich die kontinuierliche Reduzierung der Verschwendung in der Produktion (Schlankheit) (vgl. Bild 1-1). Sind Handlungsbedarfe in einem Produktionssystem erkannt, gilt es, ein optimales Maß an Agilität, Adaptabilität und Schlankheit zu bestimmen. Die Balance muss dabei so effizient und unentwegt vollzogen werden, dass die Produktion nicht von optimalen Betriebszuständen abweicht. Dazu gehören beispielsweise die minimierten Kosten und Zeitanteile bei gleichzeitig hoher Qualität. [85] [123]

Globalisierte Märkte verstärken diese Forderung zudem. Schlüsselbranchen wie die Automobil-, Hightech- und Elektronikindustrie sind dadurch ganz individuellen Herausforderungen ausgesetzt. So ist beispielsweise die Konsumelektronik immer stärker durch den Übergang vom kosten- zum zeitbezogenen Wettbewerb geprägt [95]. Im globalen Umfeld spielen damit gerade Zeit und Lieferqualität eine immer wichtigere Rolle. Zeit beinhaltet dabei die Dauer, die von der Auftragserteilung bis zur Bereitstellung der Ware beim Kunden beansprucht wird. Sie wird von der benötigten Durchlaufzeit (DLZ) aller Prozesse zur Kundenauftragsabwicklung bestimmt. Die Lieferqualität hingegen definiert sich über zwei Eigenschaften: zum einen, inwieweit die Lieferung hinsichtlich Art und Menge mit dem Kundenauftrag übereinstimmt, zum anderen, in welchem Zustand sich die Ware befindet [32].

In einer globalisierten Wertschöpfung wird gerade der Logistik eine immer wichtigere Rolle zugesprochen. Es reicht also inzwischen nicht mehr aus, bereits ausgereifte Produktionsprozesse zu verbessern, vielmehr muss die Optimierung die logistischen Prozesse inklusive ihrer Schnittstellen mit einschließen [95].



**Bild 1-1:** Faktoren und geforderte Eigenschaften für den wirtschaftlichen Produktionserfolg im globalen Umfeld

Gerade um dieses Gleichgewicht sicherzustellen, kann auf den Ansatz der Digitalen Fabrik nicht mehr verzichtet werden. Das Ziel ist hierbei die digitale Begleitung des Produkt- und Produktionsentstehungsprozesses auf Basis eines integrierten Datenmanagements von der Produktkonstruktion bis hin zum Anlauf und Betrieb des Produktionssystems. Einen Eckpfeiler der Digitalen Fabrik stellt die Ablaufsimulation dar. Unter ihrer Zuhilfenahme können die dynamischen Materialflusssysteme der Produktion und Logistik analysiert und alternative Systemkonstellationen bewertet werden.

## 1.2 Ziel und Gang der Arbeit

Allerdings bleibt bis heute, aufgrund des zunächst hohen Aufwands bei der Modellierung und der Notwendigkeit eines Simulationsexperten, der Simulationseinsatz vielen Unternehmen verwehrt. Branchenspezifische Referenzmodelle bzw. Bausteinbibliotheken, mit denen ein Systemplaner mit möglichst wenig Einarbeitungsaufwand fähig ist, ein Simulationsmodell zu erstellen, schaffen hier Abhilfe. Im genauen soll das heißen, dass beispielsweise ein Logistikplaner die Struktur des zu simulierenden Systems beschreibt und die zur Simulation notwendigen Parameter im Dialog mit den Referenzbausteinen eingibt.

Unter Betrachtung, dass sich das Internet zu einem weltumspannenden Informations- und Kommunikationsnetz entwickelt hat und hier gigantische Rechenzentren ange-

geschlossen sind, können Unternehmen zentral mit Rechenleistung, Daten und Software versorgt werden und das über eine einzige Schnittstelle – dem Internet-Browser. Die sogenannten SaaS-Anwendungen (*Software-as-a-Service*) bzw. das *Cloud Computing* versprechen nicht nur einen unkomplizierten und kostengünstigen Zugang zu den Anwendungen der Digitalen Fabrik, sondern lassen ebenso ein kollaboratives Arbeiten zu. Treibt man diese Idee weiter, ist auch im Sinne der web-2.0-Bewegung eine offene „selbstwachsende“ Internet-Planungsplattform denkbar, die einerseits diverse Planungswerkzeuge integriert und andererseits auch Modelle beinhaltet, die von der Anwendungsgemeinschaft oder von Maschinenherstellern sowie Dienstleistern bereitgestellt werden. Dies können beispielsweise 2D/3D-Layoutmodelle, technische Datenblätter oder auch Simulationsmodelle sein.

Ziel dieser Arbeit ist somit, für die oben genannte Aufgabenstellung in der Praxis anwendbare Voraussetzungen zu schaffen. Um Maßnahmen für agile, adaptive sowie schlanke Produktions- und Logistiksysteme dementsprechend zielgerichtet ableiten zu können und deren Wirksamkeit im Vorfeld virtuell abzusichern, werden hier einerseits ein Referenzmodell zur Planung und Simulation eines Supply Chain Netzwerks und andererseits ein webbasiertes System zur Simulation von Produktions- und Logistiksystemen entwickelt. Als Basis dient hier die Elektronikproduktion, da gerade diese Branche einem immerwährenden und schnellen Strukturwandel unterworfen ist. Dieser wissenschaftliche Beitrag ist ein Schritt zu einer umfassenden SaaS-Anwendung bezüglich der Planung und Simulation von Produktions- und Logistiksystemen. Die Strukturierung der Arbeit spiegelt die dazu notwendige Vorgehensweise wider.

So stellt **Kapitel zwei** zunächst die aktuellen Herausforderungen an eine globale Wertschöpfung dar und erarbeitet die Grundlagen logistischer Netzwerke. Systeme der Elektronikproduktion, insbesondere der Kommunikationselektronik, sind beispielhaft für die neuen Anforderungen an Produktion und Logistik. Daher erfolgt in **Kapitel drei** eine Prozessanalyse der Produktion und Distribution in der Elektronik. **Kapitel vier** erörtert die Notwendigkeit simulativer Planungsmethoden und stellt ein Vorgehensmodell zur Simulation in Produktion und Logistik vor. Danach baut **Kapitel fünf** auf diesen vorausgegangenen Ergebnissen auf und beschreibt die Entwicklung eines allgemeingültigen Referenzmodells zur Abbildung von Logistiknetzwerken für die Simulation. **Kapitel sechs** erläutert die Konzeption des webbasierten Simulationssystems und beschreibt dessen wissenschaftlichen Hintergrund. **Das siebte Kapitel** widmet sich der prototypischen Umsetzung eines webbasierten Systems zur Simulation von Bestücklinien in der Elektronikproduktion. **Kapitel acht** schließt diese Arbeit mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick ab.

## 2 Wertschöpfungsnetzwerke im globalen Umfeld

Industrieunternehmen sind durch die zunehmende Individualisierung und die hohe Varianz der Produkte sowie die immer kürzer werdenden Produkt- und Technologielebenszyklen einem verschärften Wettbewerb ausgesetzt. Auf der Suche nach immer neuen Absatzmöglichkeiten und kostengünstigeren Produktionsmöglichkeiten hat sich eine interkontinentale Verflechtung der Kapital-, Dienstleistungs- und Warenwirtschaft vollzogen.

Dieser Globalisierungsprozess wird u. a. durch freie Handels- und Wirtschaftszonen sowie durch innovative und immer kostengünstigere Kommunikations-, Informations- und Transportmöglichkeiten getrieben und zählt noch vor der dem technischen Fortschritt als größter Wohlstandstreiber in den vergangenen drei Jahrzehnten. Insbesondere Deutschland als Exportland profitiert von der fortgeschrittenen internationalen Arbeitsteilung, dies verdeutlichen weltwirtschaftliche Konjunkturzyklen, die sich auf Deutschland als Exportland überdurchschnittlich stark auswirken.

Der Begriff der Globalisierung wurde bereits in den vierziger Jahren des 20. Jahrhunderts geprägt, aber erst durch Theodore Levitt mit dem 1983 erschienenen und vielbeachteten *Harvard Business Review*-Artikel „*The Globalization of Markets*“ weit in die Öffentlichkeit getragen. [104]

Heute ist die Globalisierung bereits so weit fortgeschritten, dass diese keine Entscheidungsfrage mehr darstellt. Die Entscheidung ist also keine Frage des *Ob*, sondern vielmehr, wie die individuellen Wertschöpfungsketten und die in ihnen integrierten Prozesse gestaltet und angepasst werden können. Mehr denn je sind Produktions- und Logistiksysteme gefordert, die die Fähigkeit besitzen, sich den entsprechenden Umständen schnell und flexibel anzupassen, um sich den schnell wandelnden Märkten anpassen zu können. Agilität, Adaptabilität und Schlantheit sind Schlagworte, deren Inhalte Produktions- und Logistiksysteme nicht nur gestärkt aus wirtschaftlich schwierigen Zeiten herausführen, sondern vor allem Unternehmen rentabel und schlagfertig machen sollen, wenn aufgrund eines starken Wirtschaftswachstums die Bedarfe an Produkten steigen.

Im Folgenden wird daher erörtert, welche Konsequenzen ein globales Produktionsumfeld auf die Wertschöpfungskette und somit auf die Produktionssystematik hat. Daraufhin wird die Rolle der Logistik im globalen Produktionsumfeld herausgearbeitet und anschließend das *Supply Chain Management* als Planungs- und Koordinationsmethode großer Wertschöpfungsnetzwerke behandelt.

## 2.1 Globalisierte Produktion und Produktionssystematik

Unternehmen sind prinzipiell bestrebt, Gewinn zu erzielen bzw. ihre übergeordneten Ziele, wie beispielsweise die Steigerung der Profitabilität oder Rentabilität, zu erreichen. Auf Basis der Gewinn- und Verlustrechnung kann dies entweder aus einer Umsatzsteigerung, einer Kostensenkung oder ggf. aus einer Kombination von beiden geschehen. Eine Steigerung des Umsatzes kann durch Erhöhung der verkauften Mengen bzw. durch Preisanhebung erfolgen. Letzteres ist oft hinsichtlich des Wettbewerbs eher schwierig. Auf Seite der Kosten steht vor allem die Senkung der Erbringungskosten, die durch Aufwendungen innerhalb der Wertschöpfungskette anfallen. [62]

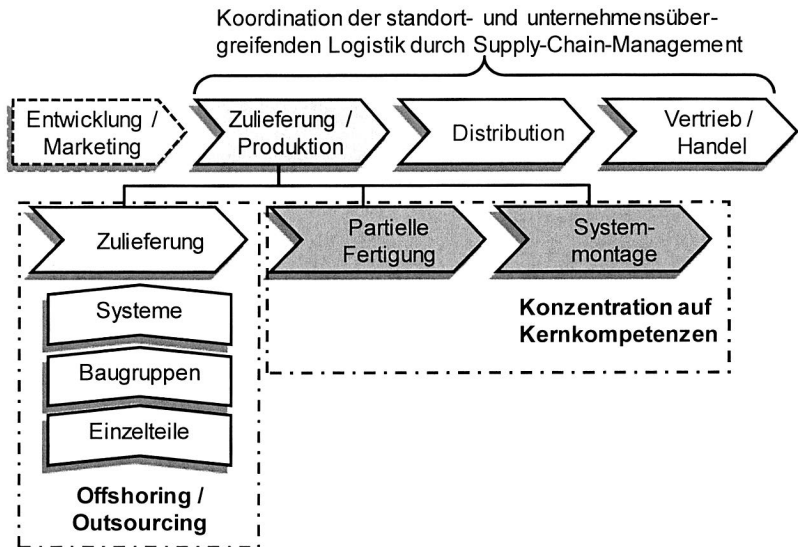
Durch eine global verteilte Produktion können international ausgerichtete Unternehmen einerseits durch niedrigere Arbeits- oder Beschaffungskosten die Produktionskosten senken, andererseits ermöglicht sie es ihnen, neue Märkte zu erschließen oder eine geforderte Kundennähe zu erreichen. Welche Strategie nun am erfolgversprechenden ist, hängt stark vom Produkt bzw. von der Branche des Unternehmens ab. Die Anpassung der Wertschöpfungskette und die damit verbundene Produktionssystematik können daher höchst unterschiedlich erfolgen und müssen individuell geschehen.

### 2.1.1 Aufspaltung der Wertschöpfungskette und Konzentration auf Kernkompetenzen

Der Begriff der Wertschöpfungskette beschreibt die stufenweise Abfolge der Leistungsschritte, von der Konzeption eines Produktes bis zum Verkauf an den Kunden. Die Wertschöpfungskette beinhaltet insbesondere die Prozesse der Schaffung von Mehrwert durch Bearbeitung. Eine branchentypische Wertschöpfungskette ist in Bild 2-1 dargestellt, die in die generischen Prozesse *Entwicklung und Marketing*, *Zulieferung* und *Endproduktion*, *Distribution* sowie *Vertrieb und Handel* eingeteilt sind. Prozessübergreifend erfolgen die logistischen Prozesse.

Um beispielsweise niedrigere Arbeitskosten in anderen Regionen zu nutzen, sind Unternehmen im Zuge der Globalisierung gewillt, ihre Wertschöpfungskette aufzuspalten und integrierte Prozesse bzw. Produktionssysteme ganz oder teilweise auszugliedern. Diese Unternehmensstrategie kann einerseits durch das so genannte *Offshoring*, also die durchzuführende Internationalisierung durch Direktinvestitionen im Ausland, oder andererseits durch Eigenfertigungs- und Fremdbezugs-Entscheidungen, dem so genannten *Outsourcing* von Prozessen innerhalb der Wertschöpfungskette realisiert werden. Welche Strategie auch immer zur Senkung der Erbringungskosten gewählt wird,

die aufgespaltenen Wertschöpfungskette bedarf der Koordination und Planung des Material- und Informationsflusses zwischen Lieferant und Kunden. [8] [58] [62]



**Bild 2-1:** Aufspaltung der Wertschöpfungskette durch Konzentration auf das Kerngeschäft

Gleichzeitig können im Zuge der Wertschöpfungskettenaufspaltung weitere Wettbewerbsvorteile, etwa durch Konzentration auf die Kernkompetenzen, generiert werden. Solches geschieht, indem Produktionsschritte, administrative Prozesse oder ganze Strukturen in die Hand Dritter gegeben werden. Die Konzentration auf die Kernkompetenzen hat das Potential, den Zugang zu einer Vielzahl von Märkten zu ermöglichen. Dabei sollten sie einen wesentlichen Beitrag zum wahrgenommenen Kundennutzen des Endproduktes haben und zugleich sollte es für Mitbewerber schwierig sein, diese zu kopieren oder sich leicht aneignen zu können. Kernkompetenzen müssen vielmehr die Eigenschaft haben, dass sie langsam aufzubauen sind. Durch die Konzentration auf die Kernprozesse kann auch eine Verringerung der Wertschöpfungstiefe (Eigenfertigungsanteil eines Unternehmens bei der Gütererstellung) zur Folge haben. Somit kommt der Beschaffung, die am Anfang der logistischen Kette und damit auch am Beginn der Steuerung der Materialflüsse steht, eine wichtigere Rolle für eine erfolgreiche Leistungsbereitstellung und die Aufrechterhaltung der Wettbewerbsfähigkeit zu. Zur Beschaffungslogistik sei auf den Abschnitt 2.2.1 verwiesen. [96] [80]



### 2.1.2 Markt als Entscheidung für den Produktionsstandort

Im Rahmen ihrer Zielverfolgung sind viele Unternehmen gewillt, zu wachsen oder zu expandieren. In diesem Sinne ist unter Wachstum zu verstehen, dass sich Unternehmen mit ihrem bestehenden Produktportfolio in allen Märkten Anteile vergrößern, in denen sie bereits aktiv sind. Unter Expansion hingegen ist einerseits der Einstieg in neue Segmente mit neuen Produkten zu verstehen oder andererseits der Einstieg in neue Märkte mit einzelnen Produkten bis hin zum gesamten Produktportfolio.

Eine Branche, in der diese Strategie stark vertreten ist, ist die Automobilindustrie. Die BMW Group beispielsweise benennt diese Strategie als „Produktion folgt dem Markt“. Hier sollen einerseits hohe Einfuhrzölle, die den Import von kompletten und verkaufsfertigen Automobilen erschweren, umgangen werden, um so den Marktzugang zu erleichtern. Andererseits wird das Unternehmen durch Werke vor Ort zu einem *Local Player* und erhält somit eine höhere Akzeptanz für seine Produkte im entsprechenden Absatzmarkt. [85]

Ein weiteres Beispiel hierfür ist die Strategie des Volkswagen-Konzerns, die die weltweite Marktführerschaft in der Automobilindustrie zum Ziel hat. Erreicht soll dieses Ziel unter anderem durch eine hohe Dezentralisierung der Produktion werden. Im Gegensatz zu Toyota ist der Volkswagen-Konzern nicht in allen Regionen mit Produktionsstätten vertreten. Besonders am Beispiel des nordamerikanischen Marktes ist zu erkennen, dass Volkswagen im direkten Vergleich mit Toyota eine deutlich geringere Menge an Autos absetzt. [93]

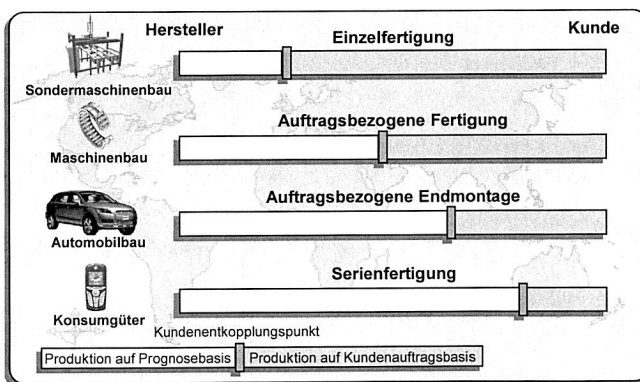
Auch Daimler gab im Dezember 2009 bekannt, dass die C-Klasse künftig nicht mehr in Sindelfingen, sondern in den USA gebaut werden sollte. Durch die Produktion des Modells in den USA sollten sich so ebenfalls die Vorteile hinsichtlich geringerer Produktions-, Zoll- und Logistikkosten ergeben. Zudem ermöglicht die Fahrzeugmontage in den USA ein weiteres Wachstum auf dem amerikanischen Markt, weil somit ein starker Euro nicht ins Gewicht fällt. [26]

Die Wahl des Produktionsstandortes hat neben der Erschließung des Absatzmarktes aber auch Vorteile durch höhere Einkaufsvolumina. Das so genannte *Natural Hedging* in Produktions- und Absatznetzen mit unterschiedlichen Währungen sorgt so für einen gewissen Ausgleich bei Warenströmen und Währungsschwankungen. [85]

### 2.1.3 Anpassung der Wertschöpfungskette und Verschiebung der Kundenspezifizierung

Herstellern sind viele Produktvarianten oft willkommen, da eine hohe Typenvielfalt auch eine schlechte Vergleichbarkeit der Produktwerte für den Kunden mit sich bringt. Durch diese Verschleierungstaktik ist somit auch ein höherer Preis erzielbar (vgl. hohe Typenvielfalt eines Mobiltelefonherstellers). Produktionsseitig bewirkt eine hohe Produktvarianz aber auch höhere Durchlaufzeiten. Zudem ist für die Wahl der Produktionssystematik das Verhältnis zwischen dem vom Kunden gewünschten Lieferzeitpunkt und der benötigten Durchlaufzeit in der bestehenden Wertschöpfungskette von bedeutender Rolle. Wichtig ist es also, den Kundenentkopplungspunkt (*Order Penetration Point*) in der Wertschöpfungskette, also der Punkt an dem die Kundenspezifikation stattfindet, weit nach hinten zu verschieben. Denn dies bewirkt eine signifikante Verringerung der Varianten in den vorherigen Produktionsschritten und hat somit dort einen reduzierten Rüstaufwand zur Folge. Idealerweise findet die Berücksichtigung der Kunden- und Produktspezifikationen erst am Ende der Wertschöpfungskette statt - beispielsweise innerhalb des logistischen Prozesses der Distribution. [36]

Da kundenspezifische Produkte im Allgemeinen nach den Anforderungen des Kunden zusammengesetzt sind, muss bei der Produktion jeder Auftrag neu festgelegt werden, was eine hohe Variantenvielfalt zur Folge hat. Um nun den Kundenentkopplungspunkt in der Wertschöpfungskette zu verschieben, gilt es, entweder typisierte Produkte mit kundenspezifischen Varianten oder Standardprodukte mit Varianten bereitzustellen [90]. Bild 2-2 stellt die Thematik der Kundenspezifikation noch einmal hinsichtlich der Produktionsart und anhand typischer Branchen dar.



**Bild 2-2:** Kundenspezifikation und Kundenentkopplungspunkt nach Branchen und Produktionsart

Typisierte Produkte mit kundenspezifischen Varianten bauen dabei auf einem Grundtyp auf, der wiederum selbst auf Standardkomponenten basiert. Bei der Kundenspezifizierung wird dann der Grundtyp variabel ergänzt bzw. angepasst. Die Endprodukte haben so noch einen relativ hohen kundenspezifischen Anteil. Für Standardprodukte mit Varianten existiert meist ein Variantenprogramm, das mit einer beschränkten Anzahl an Standardkomponenten realisiert wird. Der kundenspezifische Einfluss auf die Gestalt des Endproduktes beschränkt sich daher meist auf die Komponentenauswahl bzw. einer Produkteigenschaft, die sich leicht integrieren lässt. Bei Standardprodukten ohne Varianten haben die Kunden meist keinen oder nur geringen Einfluss auf die Produktzusammensetzung. Synonym können auch die im englischen Sprachgebrauch üblichen Bezeichnungen *Make-To-Stock*, *Assemble-To-Order*, *Make-To-Order* und *Purchase- and Make-To-Order* für die unterschiedlichen Produktionstypologien und Gestaltungsmöglichkeiten von Logistiknetzwerken verwendet werden. Der Zeitpunkt des Übergangs von auftragsneutraler zu auftragsbezogener Produktion hat auch großen Einfluss auf die Gestaltung des logistischen Netzwerkes und bestimmt dessen konkrete Struktur. Zudem kann sich die Gestaltung auf die Reaktionsfähigkeit des Netzwerkes und somit auf die Lagerbestände aller am Wertschöpfungsprozess teilnehmenden Unternehmen auswirken. [2] [22]

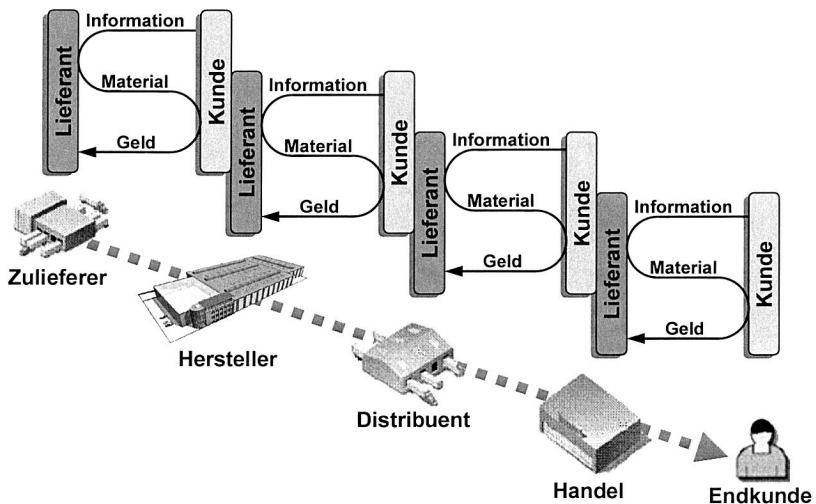
Aus der Verschiebung des Kundenentkopplungspunktes und der Konzentration auf die Kernkompetenzen in Verbindung mit global verteilten arbeitsteiligen Produktionsnetzwerken können aber auch neue Dienstleistungsbranchen entstehen. Darunter ist auch die Kontraktlogistik (vgl. Unterkapitel 2.2). Zur Verschiebung des Kundenentkopplungspunktes in Verbindung mit dem Einsatz der Kontraktlogistik soll hier exemplarisch das Aufspielen kundenspezifischer Software auf ein elektronisches Gerät angeführt werden. Zur detaillierten Beschreibung der Kundenspezifizierung bei mobilen Geräten der Kommunikationselektronik innerhalb des Distributionsprozesses sei hier auf die Unterkapitel 4.3 und 4.4 verwiesen.

## **2.2 Die Rolle der Logistik in global verteilten arbeitsteiligen Netzwerken**

Die wachsende Bedeutung der Logistik wird maßgeblich von den globalisierten Beschaffungs- und Absatzmärkten sowie einer weltumspannenden Produktion in Verbindung mit Produktionsauslagerungen getrieben. Auch immer kürzere Produktlebenszyklen, die Deregulierung der international geltenden Handelsvorschriften sowie steigende Kundenanforderungen hinsichtlich Zeit, Qualität, Kosten und Flexibilität gelten als Wachstumsförderer der Logistik. Die Logistik muss sich diesen Herausforderungen stellen und den daraus entstehendem komplexeren Prozessen Rechnung tragen. So

steigen mit Zunahme des Wettbewerbs nicht nur die Anforderungen zur Optimierung der unternehmensinternen Logistikprozesse, sondern vielmehr auch die Anforderungen an eine optimale Gestaltung der Logistik zwischen den global verteilten Standorten und Lieferanten. [14]

Wurde der Begriff Logistik ursprünglich im militärischen Bereich (bereits im 19. Jahrhundert) zur Planung des Nachschubs und der Truppenbewegung verwendet, trat der Begriff im wirtschaftlichen Sinne erst ab ca. 1955 auf. Zunächst als reine Unterstützungsfunktion mit stark physischer Ausprägung aufgefasst, erweiterte sich der Aufgabenbereich der Logistik darum, übergreifende Unternehmensprozesse zu optimieren. So wird aus heutiger Sicht die Logistik als Führungs- und Managementmethode beschrieben, deren Aktivität auf die gesamte und somit auch auf die unternehmensübergreifende Optimierung von Logistikprozessen konzentriert und die Wertschöpfungsketten zu globalen Netzwerken integriert. In Bezug auf das moderne Logistikverständnis ist die Logistik um so mehr als eine angewandte Wissenschaft, bei der wirtschaftliche Zusammenhänge als logistische Fließsysteme interpretiert werden, zu betrachten. Zu den zentralen Fließsystemen zählen dabei die Material-, Informations- und Geldflüsse, die eine übergreifenden Planung und Steuerung erfordern (vgl. Bild 2-3). Hieraus entwickelte sich das *Supply Chain Management* als Managementkonzept zur Gestaltung und zum Betrieb von logistischen Netzwerken. Zur weiteren Ausführung der Thematik zum *Supply Chain Management* sei auf das Unterkapitel 2.3 verwiesen. [19]



**Bild 2-3:** Prinzipielle Darstellung einer Supply Chain in Anlehnung an Klaus [19]

In Zeiten der Globalisierung, in denen die Logistik immer mehr zum Erfolgsfaktor avanciert, spielt auch die Kontraktlogistik eine immer wichtigere Rolle. Der Begriff der Kontraktlogistik wird im englischen Sprachgebrauch als *Third Party Logistics* (3PL) bezeichnet und die entsprechenden Dienstleistungsunternehmen als *Third Party Logistic Provider* [57]. Diese Dienstleister sind spezialisierte Distributionsunternehmen, die logistische Prozesse von anderen übernehmen. Aufgrund von Bündelungseffekten und weitreichenden Erfahrungen können solche Dienstleister logistische Prozesse häufig effizienter gestalten als ihre Kundschaft. Zu herkömmlichen Transportunternehmen, KEP-Diensten (Kurier-, Express- und Paketdienste), Sammelgutspeditionen oder traditionellen Lagerhausbetreibern unterscheiden sich 3PL-Unternehmen unter anderem durch eine Problemlösungs- und Kundenanpassungsfähigkeit sowie ein breites Spektrum an Einzelleistungen, zeitlich weitreichende Kundenbeziehungen und einem höheren gegenseitigen Nutzen. [66] [90] [108]

Das Ziel der Logistik muss es also sein, Funktionsbereiche unter Berücksichtigung einer hohen Lieferqualität (z. B. Termintreue), einer kurzen Durchlaufzeit, niedriger Bestände und einer hohen Flexibilität (Reaktion auf Änderungen von Terminen, Mengen und Kundenwünschen) auszugestalten. Die klassischen Funktionsbereiche sind dementsprechend die Beschaffung, die Produktion und die Distribution. In den Abschnitten 2.2.1-2.2.3 wird daher näher auf die daraus entstehenden Prozesse der Beschaffungs-, Produktions- und Distributionslogistik (*Source, Make, Deliver*) eingegangen. Ausgangspunkt ist, dass sich die Beschaffungslogistik mit der Planung und Steuerung des Zulaufs der Waren und Materialien von den Lieferanten bis zu Produktionsbetrieben und Verkaufspunkten befasst, die Distributionslogistik demgegenüber mit der Verteilung der Waren und Produkte an die Kunden oder Empfänger. Aus operativer Sicht wird der Informationsfluss vom Kunden zum Lieferanten durch die dispositive Logistik gestaltet und der Materialfluss zum Abnehmer selbst von der physischen Logistik [63] [39]. Vergleiche hierzu die Abschnitte 2.2.4 und 2.2.5.

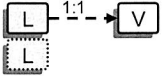
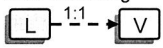
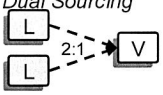
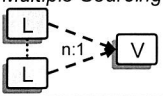



### **2.2.1 Beschaffungslogistik**

Die Beschaffungslogistik umfasst sämtliche organisatorische und physische Abläufe zur Heranschaffung und Bereitstellung der Leistungen, die zur Durchführung eines betrieblichen Prozesses benötigt und dabei nicht selbst erbracht werden. Die Beschaffungslogistik muss in diesem Zuge die mengen-, termin- und qualitätsgerechte Materialversorgung sicherstellen. [55]

Dies kann alle Prozesse vom Einkauf bis hin zum Transport des Materials zu einem Eingangslager oder zur Produktion umfassen. Die Beschaffungslogistik ist somit das

Bindeglied zwischen der Distributionslogistik der Lieferanten und Produktionslogistik der Kunden. Eine fundierte Planung und Koordination führt somit zu optimal gestalteten Schnittstellenprozessen zwischen unternehmensinternen oder –externen Lieferanten und unternehmensinternen oder –externen Kunden. [55]

Einen zentralen Punkt bei der Planung und Koordination stellt die richtige Wahl der Beschaffungsstrategie der einzelnen Unternehmen in komplexen logistischen Netzwerken dar. Die geeignete Wahl der Beschaffungsstrategien beeinflusst die Leistungsfähigkeit des gesamten Logistiknetzwerkes, um die vom Kunden nachgefragten Leistungen in optimaler Weise anzubieten. Die wichtigsten Beschaffungsstrategien lassen sich wie folgt unterscheiden [122] [90]:

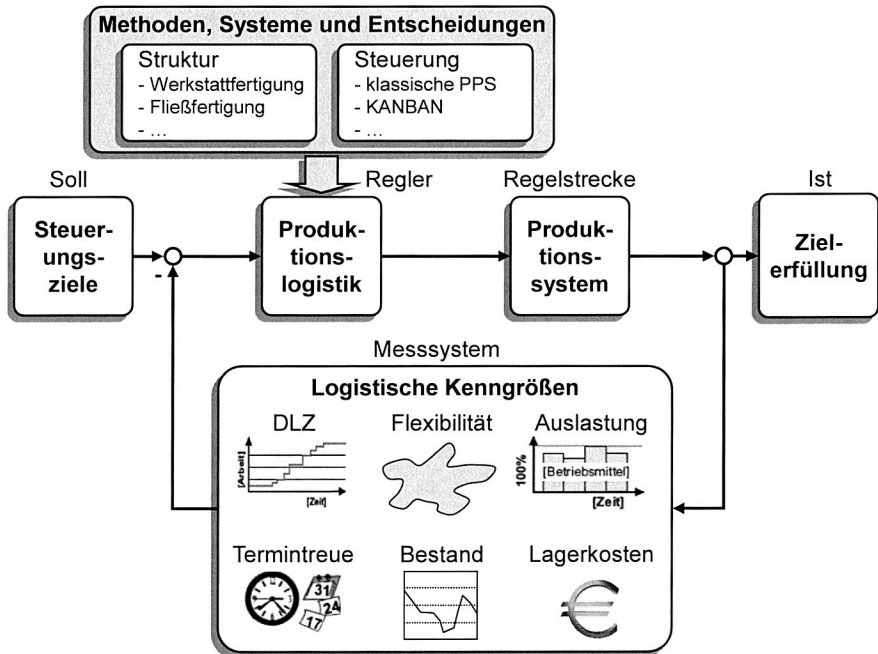
Strategie	Beschreibung	Anwendungsbeispiel
<b>Single Sourcing</b> 	Beschaffung einer Leistung erfolgt bei einem ausgewählten Lieferanten	Minimierung der Transaktionskosten und Beschleunigung der Auftragsabwicklung
<b>Sole Sourcing</b> 	Beschaffung einer Leistung ist nur bei einem einzigen Lieferanten möglich	Beschaffung einer patentrechtlich geschützten Leistung
<b>Dual Sourcing</b> 	Beschaffung einer Leistung wird bei zwei Lieferanten bezogen	Minimierung von Lieferausfällen bei Beibehaltung der Vorteile vom <i>Single Sourcing</i>
<b>Multiple Sourcing</b> 	Eine bestimmte Leistung wird bei mehreren Lieferanten beschafft	Minimierung des Risikos von einem bestimmten anderen Unternehmen abhängig zu sein
<b>Local Sourcing</b> 	Leistungen werden aus der unmittelbaren örtlichen Umgebung des Unternehmens beschafft	Vorteile bei intensiver Zusammenarbeit mit persönlichen Treffen oder auch bei aufwändigen Transportprozessen
<b>Global Sourcing</b> 	Leistungen werden vom weltweit besten Lieferanten bezogen	Hochtechnologie oder Speziallösungen
<b>Modular Sourcing</b> 	Leistungsbeschaffung konzentriert sich auf wenige Lieferanten, die im Gegenzug komplexe Systeme liefern	Lieferanten übernehmen technische Koordination und Beschaffung notwendiger Komponenten

**Tabelle 2-1:** Beschaffungsstrategien in logistischen Netzwerken

Aufbauend auf den oben aufgeführten Strategien, ist Lager- und Transportkapazitäten festlegen oder eine Entscheidung darüber zu treffen, ob ein externer Logistikdienstleister in Anspruch zu nehmen ist. [76]

## 2.2.2 Produktionslogistik

Die Aufgabe der Produktionslogistik ist die Planung, Steuerung und Überwachung innerer Materialfluss-, Lager und Transportprozesse in Produktionsbetrieben. Sie ist somit zwischen der vorgelagerten Beschaffungs- und der nachgelagerten Distributionslogistik angesiedelt. Die Schnittstellen bilden hier der Wareneingang (z. B. Rohmateriallager) auf Beschaffungsseite und der Wareneingang (z. B. Fertigwarenlager) auf Distributionsseite. Das Ziel der Produktionslogistik ist also die Schaffung einer logistikgerechten Struktur und Steuerung des Materialflusses. Dabei kann sie im Sinne eines fluss- und netzorientierten Logistikverständnisses direkt in das Logistiknetzwerk eingebunden sein. Zusammen mit Methoden und Systemen zur effizienten Gestaltung der Produktion ist die Produktionslogistik in einen Regelkreis eingebettet (vgl. Bild 2-4).



**Bild 2-4:** Regelkreis der Produktionslogistik in Anlehnung an [36]

Die Produktionslogistik ist generell nicht von standort- und unternehmensübergreifenden physischen Transportdistanzen geprägt. Sie zeichnen vielmehr ein intelligenter Produktionsablauf und eine bedarfsgerechte Bereitstellung des Materials innerhalb eines örtlich abgegrenzten Produktionssystems aus. [76] [37]

### **2.2.3 Distributionslogistik**

Die Distributionslogistik (auch physische Distribution, Warenverteilung, Vertriebslogistik, Absatzlogistik) umfasst die Gestaltung, Steuerung und Kontrolle aller Prozesse, die notwendig sind, um Waren von einem Industrie- oder Handelsunternehmen zu dessen Kunden zu überführen. Sie ist somit das Bindeglied zwischen der Produktion und dem Absatz, also zwischen unterschiedlichen Wirtschaftsstufen. Insbesondere umfasst sie alle Lager und Transportvorgänge von Waren zum Abnehmer. Handelt es sich bei den Kunden um Unternehmen, so nimmt auf deren Beschaffungsseite die Beschaffungslogistik die Verknüpfungsfunktion wahr (vgl. 2.2.1). Diese Konstellation zwischen Beschaffungs- und Distributionslogistik wird deshalb auch als Marketing-Logistik bezeichnet. In Abhängigkeit von der Arbeitsteilung im Distributionskanal können demnach einzelne logistische Aktivitäten entweder in den Bereich der Distributions- oder der Beschaffungslogistik fallen.

Das primäre Ziel der Distributionslogistik ist die Lieferung der richtigen Waren, zum richtigen Zeitpunkt, an den richtigen Ort, mit der richtigen Qualität. Die zentrale Stellgröße stellt der Lieferservice dar, der gleichzeitig in einem optimalen Verhältnis zu den anfallenden Kosten sein soll. Das Tätigkeitsfeld erstreckt sich dabei u. a. auf die Standortwahl der Distributionslager, die Lagerhaltung auf Seiten der Fertigware, die Auftragsabwicklung, die Kommissionierung und Verpackung, den Warenausgang, die Ladungssicherheit und den Transport. [100] [55] [128]

### **2.2.4 Physische Logistik**

Die physische Logistik übernimmt die Planung, Steuerung und Gestaltung der Materialflüsse innerhalb logistischer Netzwerke wie beispielsweise die Beschaffungs-, Produktions- und Distributionslogistik. Sie verantwortet dabei die operativen Prozesse wie den Transport, den Umschlag, die Lagerung, das Kommissionieren sowie Hilfsfunktionen wie die Verpackung von Waren.

Ein Transportprozess dient der räumlichen Überbrückung von Transportgütern unter Zuhilfenahme von Transportmitteln einschließlich der Materialverteilung. Bei außerbetrieblichen Transporten treten Transportprozesse auf der Beschaffungsseite zwischen



Lieferanten zum Unternehmen und auf Distributionsseite vom Unternehmen zum Kunden auf. Zudem können sie zwischen den einzelnen Unternehmensstandorten und bei der Entsorgung stattfinden. Ein innerbetrieblicher Transport (z. B. in einem produktionslogistischen Netzwerk) oder auch das Fördern findet sowohl zwischen den einzelnen Produktionsstätten und den Lagern als auch zwischen dem Wareneingang und dem Warenausgang statt. An Umschlagpunkten können Transporte gebrochen werden, das heißt, die Transportaufgabe wird dort unterbrochen, um beispielsweise unterschiedliche Transportaufträge zu bündeln. Zum Umschlag zählen Prozesse wie Be- und Entladen, das Sortieren sowie das Ein- und Auslagern. Sie sollten zeit- und somit kostenminimiert gestaltet sein. [50] [32] [46] [111]

Bei der Lagerung handelt es sich um ein geplantes Aufbewahren von Gütern zur Zeitüberbrückung zwischen der Warenverfügbarkeit und dem Bedarf. Zu den Lagerprozessen zählen das Ein- und Auslagern als Teilprozess des Umschlags sowie die Lagerung an sich. In Hinblick auf das Fließprinzip sollten Lager reduziert bzw. vermieden werden, da sie zu einer Unterbrechung des Materialflusses führen. Da sich die Lagerung von Materialien in den meisten Fällen nicht gänzlich vermeiden lässt, sollte es Aufgabe der Logistik sein, die Lagerfunktionen optimal auszuführen, um somit Durchlaufzeiten zu verringern. [32] [50]

Beim Kommissionieren werden Materialien mit einer geforderten Menge, in der Regel aus einem Lager, entnommen und zu Aufträgen zusammengestellt. Unabhängig davon, ob es sich um einen innerbetrieblichen oder um einen Kundenauftrag handelt. Dabei werden die artikelorientiert gelagerten Materialien in auftragsbezogene Lose zusammengefasst. [112] [42]

### **2.2.5 Dispositive Logistik**

Die dispositive Logistik umfasst die Gestaltung der planenden und regelnden Aktivitäten der Informationsflüsse innerhalb der Kunden-Lieferanten-Beziehungen. Aufgrund ihres planenden Charakters wirkt sie sich auf die physische Logistik aus. Zu den wichtigsten Aufgaben der dispositiven Logistik zählen die Mengenplanung, die Termin- und Kapazitätsplanung sowie die Auftragssteuerung [63]. Im Fokus dieser Arbeit soll vor allem die Mengenplanung stehen. Für weiterführende Erläuterungen zur Termin- und Kapazitätsplanung sowie der Auftragssteuerung sei auf [63] verwiesen.

#### Materialbedarfe in logistischen Systemen

Die dispositive Logistik stellt den Grundstock zur Ermittlung der Materialbedarfe in logistischen Netzwerken. Auf ihrer Basis erfolgt die Bedarfsermittlung, um beispielsweise

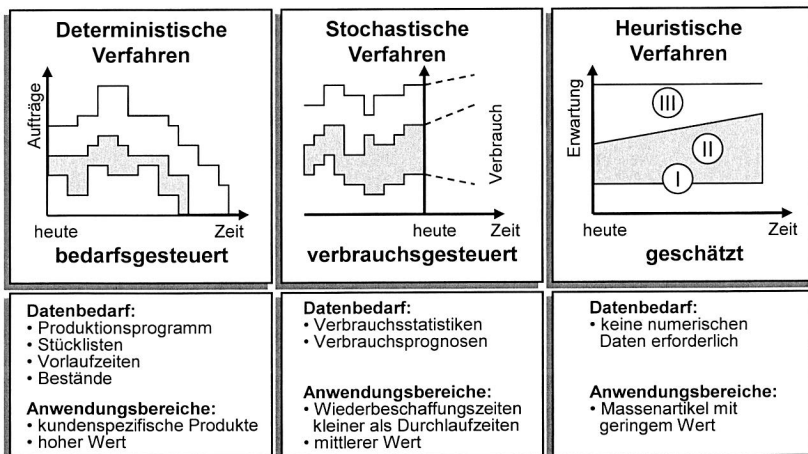
se an jeder Produktionsstufe zum richtigen Zeitpunkt die richtige Menge bereitstellen zu können. Dabei wird unter einem Bedarf die Menge an Materialien verstanden, die während eines bestimmten Zeitraumes an die Verbrauchsstellen benötigt wird. [90]

Die Materialbedarfsarten können zum einen nach ihrem Ursprung und ihrer Erzeugnisebene in Primär-, Sekundär- und Tertiärbedarf unterschieden und zum anderen unter Berücksichtigung der Lagerbestände in Brutto- und Nettobedarf eingeteilt werden [63]. Der Primärbedarf ist ein absatzbestimmter Bedarf. Die Erzeugnisse durchlaufen in der Regel keine Folgeprozesse mehr. Der Sekundärbedarf umfasst den Bedarf der vorgelagerten Prozesse bei mehrstufiger Produktion. Als Tertiärbedarf wird der Bedarf an Hilfs- und Betriebsstoffe bezeichnet. [90] [2]

Der Bruttobedarf gibt die benötigte Menge an Primär-, Sekundär-, und Tertiärbedarfen an. Der Nettobedarf ergibt sich durch Subtraktion des verfügbaren Lagerbestands vom Bruttobedarf. Der verfügbare Lagerbestand wird auch als disponibler Lagerbestand bezeichnet und ergibt sich aus der Summe des physischen Lagerbestands und dem Bestellbestand, vermindert um den reservierten Lagerbestand. [109]

### Methoden der Bedarfsermittlung

Zur Ermittlung der beschriebenen Bedarfe können grundsätzlich drei Methoden zum Einsatz kommen. Diese bieten einerseits die Möglichkeit der Bedarfsmengenermittlung durch festvereinbarte Kundenaufträge, und andererseits können die entsprechenden Bedarfsmengen prognostiziert oder geschätzt werden. Bild 2-5 stellt die drei unterschiedlichen Möglichkeiten der Bedarfsermittlung gegenüber.



**Bild 2-5:** Methoden der Bedarfsermittlung nach [94]

Bei der **deterministischen Bedarfsermittlung** wird von bekannten Kundenaufträgen bzw. vom Produktionsprogramm ausgegangen. Bei der **stochastischen Bedarfsermittlung** liegen zum Zeitpunkt der notwendigen Bestellauslösung keine konkreten Kundenaufträge vor. Sie beruht vorwiegend auf statistischen Daten. Die zukünftigen Bedarfe werden mit Hilfe analytischer Prognoseverfahren auf Basis von Bedarfswerten aus der Vergangenheit ermittelt. Bei der **heuristischen Bedarfsermittlung** liegen keine numerischen Daten für die Bedarfsvorhersage vor. Daher werden die Bedarfe auf Basis von Erfahrungswerten oder Vermutungen geschätzt. Allerdings können kombinierte Methoden zum Einsatz kommen, wenn beispielsweise die Primärbedarfe prognostiziert und die ermittelten Prognosewerte als quasideterministisch aufgefasst werden. Die Sekundärbedarfe können dann durch Stücklistenauflösung ermittelt werden, wenn die notwendigen Informationen zur Anwendung eines deterministischen Verfahrens zur Verfügung stehen. Ist das nicht der Fall oder ist eine Stücklistenauflösung zu aufwändig, lassen sich die Sekundärbedarfe ebenfalls analog zu den Primärbedarfen mit Hilfe von Prognoseverfahren oder Schätzungen bestimmen. [94] [63] [90]

Da sich jede Prognose auf zukünftige Ereignisse bezieht, unterliegt ihre Aussagegenauigkeit einer Unsicherheit. Es treten zufällige oder auch systematische Abweichungen der prognostizierten Werte zu den tatsächlich eintretenden Nachfragewerten auf. Zufällige Abweichungen der geschätzten von den tatsächlich eintretenden Bedarfen folgen meist einer Normalverteilung. Daraus abgeleitet ergibt sich, dass 95 % aller Prognosefehler im Bereich von zwei Standardabweichungen  $\sigma$  um den Wert Null liegen. Nach dem Gesetz der linearen Transformation liegen damit alle Prognosefehler im Bereich von zwei  $\sigma$  um den tatsächlich eintretenden Bedarf. Bei einer systematischen Abweichung des Prognosewertes wird die Bedarfsmenge systematisch unter- oder überschätzt. Die Ermittlung der systematischen und der zufälligen Abweichung dient der Beurteilung der Güte des verwendeten Prognoseverfahrens. Mit Verwendung eines guten Prognoseverfahrens sollte die systematische Abweichung um den Wert NULL schwanken und die Standardabweichung der Prognosefehler relativ gering sein. [109] [48]

### Bestandsmanagement

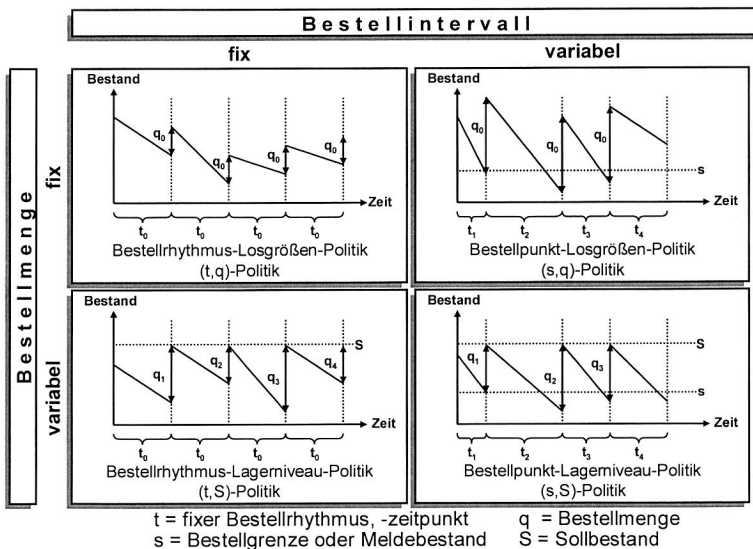
In logistischen Systemen kann die kundenbezogene und kundenanonyme Wertschöpfung mittels Kundenentkopplungspunkten getrennt werden (vgl. 2.1.3). Lager dienen dabei dazu, diese Kundenentkopplungspunkte physisch zu realisieren. Die Regelung der Lager muss dabei so erfolgen, dass die Kapitalbindung minimiert, aber die Lieferbereitschaft nicht derart beeinträchtigt wird, so dass es durch Fehlmengen zu Lieferausfällen kommt. Die Aufgabe des Bestandsmanagements ist es daher, Bestellmengen

und Bestellzeitpunkte für definierte Bedarfspunkte so zu definieren, dass eine mengen- und termingerechte Versorgung mit Materialien erfolgen kann. [94] [51]

Bei der bestandsorientierten Disposition werden aus dem aktuellen Lagerbestand und dem Verbrauch die Bestellmengen zu den entsprechenden Bestellzeitpunkten ermittelt und an den Lieferanten übermittelt. Mit entsprechenden Dispositionsregeln können terminliche und mengenmäßige Bestellvorgänge für die entsprechenden Bedarfe festgelegt werden. Prinzipiell erfolgt eine Bestellauslösung aufgrund eines abgelaufenen Zeitintervalls oder der Unterschreitung eines kritischen Lagerbestands. Zudem kann die zu bestellende Menge fest oder je nach aktuellem Lagerbestand variabel gestaltet sein. Bild 2-6 zeigt Grundtypen von Dispositionsregeln auf, die in das Bestellrhythmusverfahren und das Bestellpunktverfahren unterteilt werden. [51] [63]

Wird beim Bestellrhythmusverfahren eine Bestellung (mit fixer oder variabler Bestellmenge) in konstanten Intervallen ausgelöst, erfolgt beim Bestellpunktverfahren hingegen eine Bestellung aufgrund eines festgelegten Meldebestands, was in der Regel zu variablen Bestellintervallen führt.

Bild 2-6 fasst die Grundformen der Bestellpolitik zusammen.



**Bild 2-6:** Grundformen der Bestellpolitik nach [61] [37]

Bei der Bestellrhythmus-Losgrößen-Politik (t-q-Politik) wird in festen Zeitintervallen jeweils eine konstante Menge an Materialien bestellt. Bei der Bestellrhythmus-

Lagerniveau-Politik (t-S-Politik) wird in konstanten Zeitintervallen das Lager auf einen vordefinierten Sollbestand  $S$  aufgefüllt. Bei der Bestellpunkt-Losgrößen-Politik (s-q-Politik) erfolgt die Auslösung einer Bestellung sobald der vordefinierte Meldebestand erreicht bzw. unterschritten wird. Bei jeder Bestellauslösung wird der Lagerbestand um eine konstante Menge aufgefüllt. Bei der Bestellpunkt-Lagerniveau-Politik (s-S-Politik) wird eine Bestellung ausgelöst, sobald der Meldebestand erreicht bzw. unterschritten wurde. Die Höhe der zu bestellenden Menge leitet sich aus dem zuvor definierten Sollbestand des Lagers ab.

Bei starken Schwankungen der Nachfrage kann es je nach gewählter Bestellpolitik häufig nötig sein, den fixen Meldebestand oder die fixe Bestellmenge anzupassen, um die Lieferfähigkeit aufrecht zu erhalten. Treten derartige Probleme bei einem fixen Meldebestand aus, stellt die Einführung eines reichweitenorientierten Zielbestandes eine Lösung dar. Dabei soll der Bestand im Lager immer für eine angegebene Anzahl an Perioden ausreichen, um die prognostizierte Nachfrage zu decken. Unterschreitet der Lagerbestand diesen Zielbestand, so wird eine Bestellung ausgelöst. Somit passt sich der Zielbestand dynamisch an die Veränderungen der Nachfrage an. Die Probleme einer fixen Bestellmenge lassen sich teilweise durch die Einführung einer reichweitenorientierten Bestellmenge vermeiden. Dabei ergibt sich die reichweitenorientierte Losgröße, die sich direkt aus den periodischen Nettobedarfen ergibt und damit die prognostizierten oder vorliegenden Bedarfe für eine angegebene Anzahl an Perioden abdeckt. Dabei passt sich die Bestellmenge dynamisch an die Veränderungen der Nachfrage an. [2]

### **2.3 Planung und Steuerung der Logistik mit *Supply Chain Management***

Wie bereits unter 2.2 beschrieben betrachtet die moderne Logistik nicht mehr nur einzelne unternehmensinterne Logistikbereiche, sondern integriert die Material-, Informations- und Geldflüsse von vor- und nachgelagerten Wertschöpfungspartnern. Aus dieser modernen Sichtweise entstand der Begriff der *Supply Chain (SC)*, unter dem die so genannten Versorgungs-, Logistik- oder Wertschöpfungsketten verstanden werden. [74] [19] [117]

Im Folgenden wird zunächst näher auf das *Supply Chain Management* eingegangen, dessen primäre Aufgabe es ist, die Planung, Steuerung und Kontrolle der *Supply Chains* zu integrieren. Der darauffolgende Abschnitt erläutert den so genannten Bullwhip-Effekt, dessen Minimierung bzw. Vermeidung ein Hauptziel des *Supply Managements* ist. Da im Fokus der Arbeit die Gestaltung von Logistiknetzwerken steht, behandelt ein weiterer Abschnitt das *Supply Chain Planning* als Planungsmethode.

Eine effiziente Ausgestaltung der *Supply Chains* ist allerdings auf Grund der hohen Komplexität und Dynamik schwierig. Modernen Planungsmethoden wie die Materialflusssimulation können hierbei erfolgreich unterstützen (vgl. Kap 4).

### 2.3.1 Begriffsbestimmung *Supply Chain Management*

Die Auftragsabwicklung im Wertschöpfungsprozess beinhaltet die drei Hauptprozesse Beschaffen, Produzieren und Liefern, die durch einen übergeordneten Planungsprozess koordiniert werden müssen (vgl. Kap 2.2). Durch die Vernetzung der an den wertschöpfenden und logistischen Prozessen beteiligten Akteure entsteht somit ein Geflecht unterschiedlicher Unternehmen oder Unternehmensteil, mit einer Vielzahl an Lieferanten und Kunden. Somit weisen *Supply Chains* Netzwerkcharakter auf. Dieses Netzwerk ist ein aus Knoten und Kanten verkettetes Ressourcennetzwerk, durch das sich Objekte (Materialien, Informationen und Geldmittel) bewegen. Die Knoten repräsentieren Ressourcen, die zur Ausführung von logistischen und wertschöpfenden Aktivitäten verantwortlich sind. Als Kanten werden Transportwege und Informationskanäle verstanden. Das Netzwerk bezieht sich dabei nicht allein auf die einzelnen Knoten und Kanten, sondern vielmehr auf die Wechselwirkung zwischen diesen Elementen und erstreckt sich dabei über alle Netzwerkstufen vom Rohstofflieferanten bis zum Endkunden. [19] [68] [115] [37] [22]

Die zentrale Funktion erfolgreicher Logistik ist es, dieses komplexe Netzwerk zu steuern und gleichzeitig den erhöhten Kundenansprüchen nachzukommen. Die Versorgungsnetzwerke müssen künftig ein hohes Maß an Effizienz, Flexibilität und Adaptivität aufweisen. Im Kern umfasst ein adaptives Belieferungsnetzwerk den Zusammenschluss von Unternehmen über mehrere Fertigungsstufen hinweg zu einer flexiblen und dynamischen Partnerschaft. Als diese zentrale Funktion kann das *Supply Chain Management* (SCM) aufgefasst werden. Es kann somit als eine Methode verstanden werden, die in einem Wertschöpfungssystem die Aktivitäten integriert, gestaltet und koordiniert. [14]

Um diese vielfältige Aufgabenstellung zu beherrschen, kann das *Supply Chain Management* in die Ebenen *Supply Chain Design*, *Supply Chain Planning* und *Supply Chain Execution* unterteilt werden. Dabei umfasst das *Supply Chain Design* die Ausgestaltung von Logistiknetzwerken mit der dazugehörigen Bewertung der notwendigen Investitionen. Im *Supply Chain Planning* werden beispielsweise Verbrauchs-, Bedarfs-, Bestand-, und Transportplanung für künftige Perioden berechnet (vgl Abschnitt 2.3.4). Die *Supply Chain Execution* führt die operativen Prozesse in der Auftragsabwicklung, der Produktion, im Lagerwesen und im Transport durch. [74] [37]

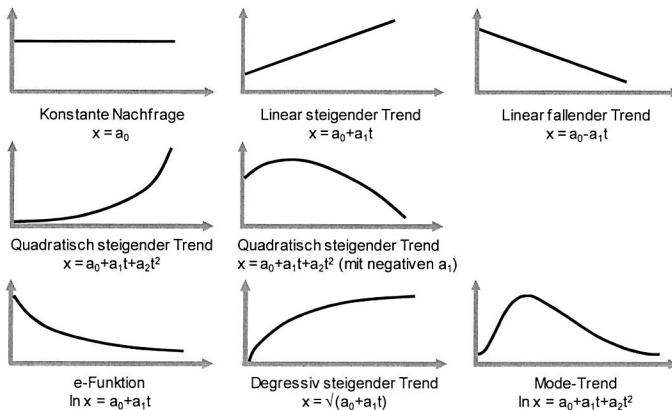
### 2.3.2 Abbildung charakteristischer Kundenbedarfe in *Supply Chains*

Bei der Betrachtung der Nachfrageverläufe von Produkten über einen längeren Zeitraum hinweg, können charakteristische Muster unregelmäßigen oder regelmäßigen Verlaufs festgestellt werden. Beim unregelmäßigen Verlauf kann die Nachfrage sowohl stark schwankend als auch sporadisch auftreten. Bei sporadischer Nachfrage werden Produkte in unregelmäßigen und größeren Zeitabständen nachgefragt, so dass in vielen Perioden kein Bedarf auftritt. Werden Produkte regelmäßig verbraucht, so weist deren Nachfrage meist einen konstanten oder einen ausgeprägten trendförmigen Verlauf auf. Je nach Einfluss saisonaler Schwankungen auf die Nachfrage, sind bei konstanten und sich trendförmig verändernden Nachfragen die Saisoneinflüsse ein Klassifikationsmerkmal [109].

Da konkrete Nachfrageverläufe eines Kunden bzw. einer Kundengruppe in algorithmischer Form meist nur schwer abzubilden sind, kann zur Planung und Simulation von Supply Chain Netzwerken zur Abbildung der Kundennachfrage auf die quadratische Gleichung zweiter Ordnung zurückgegriffen werden, die wie folgt beschrieben wird:

$$f(x) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2$$

Mit Hilfe dieser Gleichung lässt sich mit geringem mathematischem Aufwand eine Vielzahl von tendenziell typischen Nachfrageverläufen abbilden. Der konkrete Nachfrageverlauf wird durch die Wahl der Koeffizienten vom Anwender bestimmt. In Bild 2-7 sind die Kurvenverläufe qualitativ dargestellt. [38]

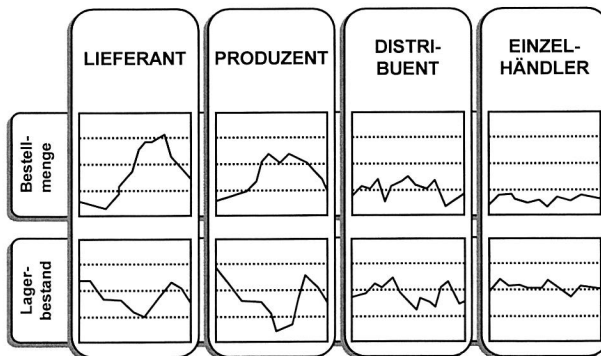


**Bild 2-7:** Charakteristische Kurvenverläufe für Bedarfsnachfragen in Anlehnung an [38]

Weitere typische Kurvenverläufe für die Nachfrage stellen Zeitreihen mit saisonaler Schwankung dar. Diese Verläufe lassen sich mit Hilfe der quadratischen Gleichung nicht darstellen. Eine Möglichkeit zur mathematischen Abbildung von zyklischen Schwankungen bietet die Verwendung einer Sinus-Funktion. Durch Kombination der quadratischen Funktion zweiter Ordnung und der Sinus-Funktion können Zeitreihen abgebildet werden, die durch saisonale Schwankungen und einen Trend bzw. durch einen ansonsten konstanten Verlauf geprägt sind.

### 2.3.3 Der Bullwhip-Effekt als Zeichen für bestehende Defizite in mehrstufigen Liefernetzwerken

Die Wettbewerbsfähigkeit eines Logistiknetzwerkes wird durch die effiziente Abwicklung der Material-, Informations- und Geldflüsse erhöht. Einen wichtigen Aspekt stellt dabei der Informationsfluss dar, da begrenzte Informationen und lokale Entscheidungen unerwünschte Effekte mit sich bringen. Ein empirisches Phänomen, das in der Literatur im Zusammenhang mit Liefer- bzw. Logistiknetzwerken vielfach genannt wird, ist der so genannte Bullwhip-Effekt oder auch Peitschenhieb-Effekt. Dabei führen bereits kleine Veränderungen der Endkundennachfrage zu Schwankungen der Bestellmengen und Bestände längs der Logistikkette. Diese Schwankungen werden umso stärker, je weiter das beobachtete Mitglied in der Supply Chain vom Endkunden entfernt liegt. Durch die zum Teil hohen Bestände im Lager einzelner Wertschöpfungspartner und die ungleichmäßige Auslastung von Kapazitäten entstehen sowohl höhere Lager- als auch Kapitalbindungskosten. Diese Kosten werden an den Endkunden weitergereicht und beeinträchtigen die Wettbewerbsfähigkeit des gesamten Logistiknetzwerkes. Die Beherrschung des Bullwhip-Effekts stellt daher ein zentrales Problem innerhalb von Logistiknetzwerken dar.



**Bild 2-8:** Schwankungen der Bestellmengen und Lagerbestände in der Supply Chain



Das Aufschaukeln der Bestellmengen und der dadurch stark schwankenden Lagerbestände ist in Bild 2-8 dargestellt. Als verantwortlich hierfür können eine unzureichende Planung und Koordination der logistischen Prozesse sowie eine nicht hinreichende Kommunikation zwischen den Wertschöpfungspartnern gesehen werden. Die im Folgenden beschriebenen Faktoren begünstigen zudem die Entstehung des Bullwhip-Effekts. [63] [2]

**Asymmetrien und Verzögerungen des Informationsflusses:** Werden Nachfrageinformationen verzerrt weitergegeben, können diese zu Nachfrage- und Beschaffungsschwankungen führen. So können beispielsweise bei der Verwendung einfacher Prognoseverfahren zur Bedarfsermittlung die entsprechenden Prognosewerte von den tatsächlich auftretenden Bestellungen erheblich abweichen und begünstigen demzufolge die Entstehung des Bullwhip-Effekts.

**Auftragsbündelung in Losen:** Werden Bestellungen für die Bedarfe mehrerer Perioden aufgrund hoher und fixer Bestellkosten oder aufgrund von Mengenrabatten gebündelt, so führt diese Losbündelung zu einer unregelmäßigeren Nachfrage beim Zulieferer und erhöht das Risiko für das Auftreten des Bullwhip-Effekts.

**Preisschwankungen und Mengendegressionseffekte:** Aufgrund von Preisaktionen kann der reale Kundenbedarf verzerrt werden, da diese den Preisvorteil ausnutzen möchten und daher Produkte auf Vorrat kaufen. Wenn die Information einer Preisaktion nicht an die Lieferanten weitergegeben wird, kann es sein, dass diese von einem ansteigenden Bedarf der Kundennachfrage ausgehen und erhöhen ihre Lagermengen, um eine ansteigende Nachfrage bedienen zu können.

**Engpasspoker:** Bei einem Belieferungsengpass erhält jedes Unternehmen den gleichen prozentualen Anteil an seiner Gesamtbestellmenge. Bei dem nächsten Nachfrageüberhang antizipieren Unternehmen diese Zuteilungsmethode und überhöhen ihre Bestellungen, um anschließend diese Bestellungen zu stornieren.

Die oben aufgeführten Faktoren können zu einem Aufbau von Beständen auf den vorgelagerten logistischen Stufen führen. Dabei ist bezeichnend, dass sich durch die Wiederholung der Verhaltensweise auf jeder Wertschöpfungsstufe der Effekt auf der jeweils vorgelagerten Stufe verstärkt.

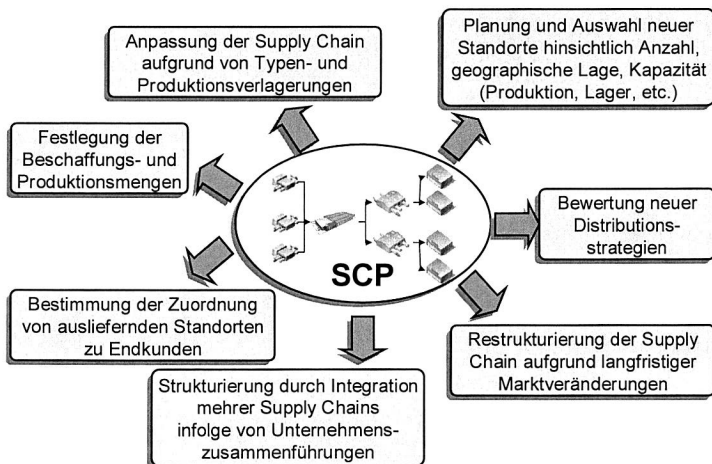
Ein wichtiger Punkt zur Reduzierung des Bullwhip-Effekts stellen sicherlich verbesserte Kommunikations- und Informationsflüsse zwischen den am Wertschöpfungsprozess teilnehmenden Partner dar. Eine optimale Übermittlung von Nachfrageprognosedaten und eine beschleunigte Informationsverarbeitung sind hier die Schlüsselfaktoren, so dass möglichst jedem Partner des Logistiknetzwerkes Informationen über die tatsäch-

liche Nachfrage der Endkunden ohne zeitliche Verzögerung bereit gestellt werden können.

Aber bereits der Einsatz geeigneter Methoden bei der Planung oder der kontinuierlichen Anpassung der Supply-Chain, wie beispielsweise die Simulation, kann dem Bullwhip-Effekt entgegensteuern.

### 2.3.4 Supply Chain Planning als Bestandteil des Supply Chain Managements

Aufgrund der Globalisierung und der daraus resultierenden zunehmenden Vernetzung internationaler Unternehmen werden Planungsaufgaben bezüglich der entstehenden Wertschöpfungsnetzwerke immer wichtiger, aber auch umfangreicher und komplexer. Grundlage einer optimal ausgelegten Supply Chain ist die strategische und taktische Planung sowie die Anpassung der Beschaffungs-, Produktions- und Distributionsprozesse aller am Wertschöpfungsprozess beteiligten Partner. Ziel der Supply Chain Planung kann daher nur das Erreichen minimaler Gesamtkosten bei Einhaltung der geforderten Lieferqualität sein. Der Grundstock der innerhalb der Supply Chain Prozesse entstehenden Kosten sowie die zu erreichende Lieferqualität wird bereits in der Planungsphase gelegt. Die Aufgaben der Supply Chain Planung sind hier sehr vielfältig und müssen für jedes Liefernetzwerk individuell aufgestellt werden. Bild 2-9 illustriert grundsätzliche Ziele und Aufgaben der Supply Chain Planung.



**Bild 2-9:** Ziele und Aufgaben der Supply Chain Planung

Für die Planung und Gestaltung von Supply Chains steht generell eine Vielzahl an Verfahren zur Verfügung, die zwar ein Gesamtsystem nicht vollständig abbilden und

mittels eines bestimmten Algorithmus lösen können, aber jedoch wertvolle Hilfsmittel im Rahmen des Planungsprozesses darstellen. Welches Verfahren geeignet ist, hängt von der Planungsaufgabe, den Restriktionen und der Komplexität des Planungsproblems ab. Alle Verfahren haben jedoch gemeinsam, dass sie alle das zu gestaltende oder zu planende System mit einem abstrahierten Modell abbilden. [44]

Oft werden Produktions- und Logistikabläufe noch immer getrennt voneinander geplant [126]. Die Supply Chain Planung hat daher zusätzlich die Aufgabe diese Planungsprozesse zu integrieren. Beispielsweise gilt es, die Schnittstelle zwischen einem Montagearbeitsplatz und der Materialbelieferung zu betrachten. Die Problematik stellt sich in der Dynamik, die an dieser Schnittstelle bestehen kann. Werden beispielsweise bei einer Variantenfertigung nicht immer alle bereitgestellten Komponenten oder in unterschiedlicher Stückzahl verbaut, so unterliegen diese einem schwankenden Verbrauch. Auch wenn die Verbräuche der einzelnen Komponenten relativ gering um einen Mittelwert schwanken, können diese unter Umständen einen großen Einfluss auf den kumulierten Gesamtverbrauch haben. Dementsprechend muss der Bereitstellungsprozess für die Komponenten diesen Schwankungen gerecht werden, welche sich auf die Prozesse der Partner auswirkt, die sich in der Wertschöpfungskette weiter vorn befinden. Die Simulation stellt eine geeignete Methode dar, die Supply Chain Planung zu unterstützen [126]

### 2.3.5 Nachhaltige Logistikplanung durch *Supply Chain Simulation*

Die immer wichtiger werdende Verzahnung der unternehmens- oder werksübergreifenden Prozesse von der Rohmateriallieferung über die Produktion bis zur Kundenbelieferung nimmt immer mehr zu und führt zu immer neuen Aufgaben in der Planung und Optimierung von kompletten *Supply Chains*.

Die *Supply Chain Simulation* stellt eine innovative und effiziente Methode zur Unterstützung für die Planung und Gestaltung von Logistiknetzwerken dar. Sie bietet sich besonders bei zu analysierenden und zu bewertenden *Supply Chains* an, die einer hohen Dynamik unterliegen bzw. deren stochastisches Verhalten großen Einfluss auf das Systemverhalten haben. Der Einsatz der *Supply Chain Simulation* eignet sich insbesondere, wenn statische Berechnungen mit Verwendung von konstanten Durchschnittswerten an ihre Grenzen stoßen. Die mit analytischen Methoden im Vorfeld gewonnenen Erkenntnisse können, hinsichtlich des dynamischen Verhaltens der betrachteten Prozesse, verfeinert werden. Da die *Supply Chain Simulation* auf der Methode der Ablaufsimulation basiert, verfügt sie über eine große Modellierungsmächtigkeit und Flexibilität, gepaart mit einem starken Bezug zur systemtheoretischen Sichtweise. [44]

Aufgrund der positiven Erfahrungen, vor allem zur Analyse, Bewertung und Planung innerlogistischer Systeme, erhält die Simulation auch bei der Planung der immer komplexer werdenden standort- und unternehmensübergreifenden Logistiknetzwerke, den *Supply Chains*, Einzug. Simulationsmodelle bieten die Chance, logistische Planungsfragen realitätsnah zu lösen. Insbesondere bei der Integration der Planung von Produktion und Logistik steht die Simulation als Bindeglied zur Verfügung. So kann mit ihr beispielsweise ein benötigter Puffer vor einem Montageprozess ausgelegt werden, so dass ein potenzieller Engpass egalisiert wird. Zugleich ist dann auf die sich daraus entstehenden Auswirkungen auf die vorgelagerten Versorgungsprozesse zu schließen. Unter der Berücksichtigung der Randbedingungen, die aus der Betrachtung der gesamten Supply Chain entstehen, entsteht somit ein Simulationsmodell, das die Reibungsverluste an den Schnittstellen minimiert. [126]

Bei einer riesigen Anzahl denkbarer Szenarien kann die Simulation durch iterative und experimentelle Suche mögliche Systemalternativen bewerten und so schnell zum besten Ergebnis führen, bei gleichzeitiger Berücksichtigung konkurrierender Ziele. Der Planer erhält aus den durchgeführten Experimenten Lösungen, unter denen er den besten Kompromiss hinsichtlich der Planungsziele und Randbedingungen auswählt. So kann beispielsweise bereits während der Planung einer *Supply Chain* einem potentiellen Engpass, der durch unzureichend geplante oder koordinierte logistische Prozesse beim Lieferanten hervorgerufen wird, entgegengewirkt werden. Die Simulation hilft hier weiter, die Lieferqualität zu erhöhen, in dem mögliche Prognoseverfahren simulativ analysiert und bewertet werden, um so Asymmetrien im Informationsfluss zu egalisieren. Zur weiteren Ausführungen zur Durchführung von Simulationsstudien sei auf das Unterkapitel 4.3 verwiesen. Mit dem Einsatz der Simulation steht ein Planungswerkzeug zur Verfügung, mit dem unter den bestehenden Voraussetzungen die beste *Supply Chain* Struktur ermittelt werden kann. Einem Planer steht somit ein wertvolles Werkzeug zur Verfügung, um Veränderungen und mögliche Anpassungen bereits im Vorfeld bewerten zu können.

Weitere Gründe, die für den Einsatz der Simulationstechnik bei der Planung von Wertschöpfungsnetzwerken sprechen, sind:

- Erhöhung des Systemverständnisses bei komplexen Netzwerkstrukturen
- Berücksichtigung unerwarteter und zufälliger Ereignisse im abgebildeten Netzwerk durch die Verwendung von Wahrscheinlichkeitsfunktionen
- Untersuchung des Einflusses bestimmter Ereignisse einzelner Komponenten des Netzwerks auf das gesamte Wertschöpfungsnetzwerk
- Risikominimierung bei Planungs- und Konfigurationsänderungen des Wertschöpfungsnetzwerkes durch die Experimentierfähigkeit

### 3 Produktion und Logistik in der Kommunikations- und Konsumelektronik

Nach der letzten großen Finanz- und Wirtschaftskrise ist die Hightech-Industrie wieder zuversichtlich. Dies bestätigt das Stimmungsbarometer (BITKOM-Index) des *Bundesverbands Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V.*, das in den Folgejahren den höchsten Wert seit der Indexeinführung im Jahr 2001 erreicht hat. Auch bestehen demnach auch für die Zukunft gute Aussichten für die Hightech-Wirtschaft. Zudem soll der Aufschwung der Gesamtwirtschaft auch zu einer weiteren Belebung der Hightech-Märkte führen. Starke Impulse würden nicht nur von der öffentlichen Hand, dem Dienstleistungsgewerbe und der Industrie erwartet, sondern auch von den Privatverbrauchern. Indikator hierfür sei das Weihnachtsgeschäft, das mit hochwertigen Elektronikprodukten wie tragbaren Computern, Digitalkameras, Unterhaltungsmedien und vor allem mit Mobiltelefonen, traditionell hervorragend läuft. Auch laut dem amerikanischen Branchenverband CEA wird der Markt für Konsumelektronik in den kommenden Jahren weiter wachsen und sich noch einmal von anderen Branchen wie der Automobilindustrie absetzen können. Die positive Prognose ist vor allem den globalisierten Märkten zu verdanken. So zeigen sich besonders die sogenannten BRIC-Staaten für diesen positiven Trend verantwortlich. Die Abkürzung BRIC steht für die Staaten Brasilien, Russland, Indien und China und kann durchaus synonym für die aufstrebenden Nationen in Asien, Osteuropa und Südamerika stehen. [25] [101] [10] [79]

Signifikant für die Hightech-Elektronik-Industrie sind ein globales Produktionsnetz, ein wachsender Absatzmarkt und ein sehr hohes Innovationspotential. Gerade hier sind adaptive, agile und schlanke Produktions- und Logistiksysteme gefordert, um den Marktansprüchen gerecht zu werden. Die Simulation der Produktions- und Distributionsnetzwerke ist hierfür besonders geeignet, die dynamischen Effekte, die durch die Einflüsse entstehen, abzubilden.

Produkte, die der Hochtechnologie (abgeleitet vom angelsächsischen *high technology*) bzw. der *Hightech* zugeordnet werden, entsprechen nicht nur dem aktuellen Stand der Technik, sondern sind vielmehr Güter, die gemessen an ihrem Wert einen bestimmten Innovationsanteil beherbergen. Dies entspricht bei Produkten der sogenannten hochwertigen Technologie einem Anteil von ca. 3,5 bis 8 Prozent und bei der Spitzentechnologie über einem FuE (Forschung und Entwicklung) -Anteil von über 8 Prozent. Zum *Hightech*-Sektor zählen vor allem Produkte der Elektronikindustrie, inklusive der Konsum- und IuK- (Informations- und Kommunikations-) Elektronik sowie der Medizin-,

Bio- und Chemieindustrie. Hier stechen insbesondere Produkte der Nano-Technik heraus. Auch die Fahrzeugindustrie ist zu den Hightech-Branchen hinzuzuzählen. Dabei sei aber erwähnt, dass die im Fahrzeug verbauten Innovationen wiederum zum großen Teil der Elektronik zuzuordnen sind. Experten schätzen, dass 90% aller künftigen Neuerungen auf elektrische und elektronische Systeme entfallen. Der Wertschöpfungsanteil der Elektronik am Fahrzeug, der derzeit bei 20 Prozent liegt, soll sich in den nächsten zehn Jahren auf ca. 40 Prozent verdoppeln. [73]

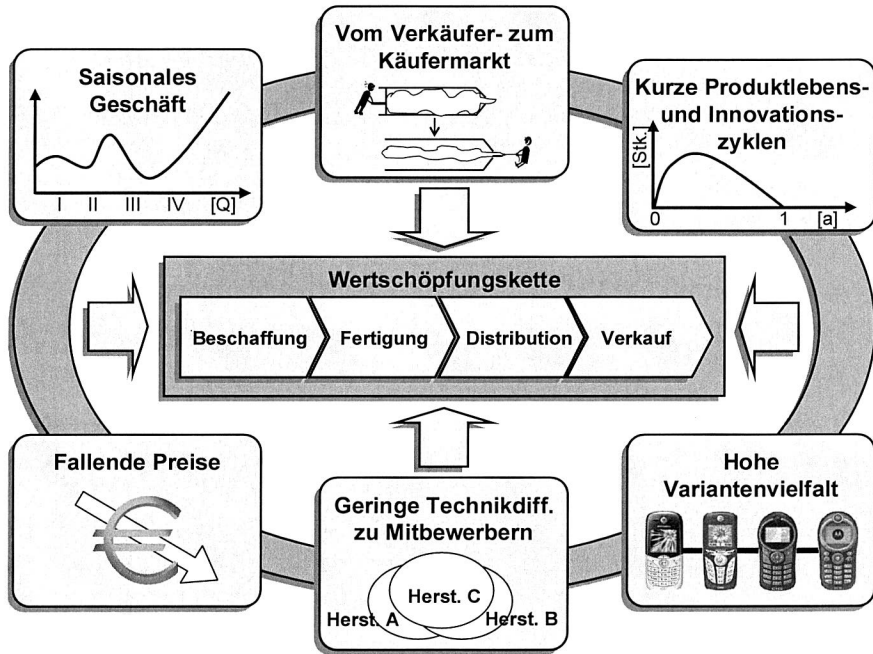
Zu den Konsumgütern zählen im Allgemein alle Sachgüter, die der direkten Bedürfnisbefriedigung im privaten Umfeld dienen. Hiervon unterscheiden sich Investitionsgüter, die vor allem für den Produktionsprozess vorgesehen sind. Konsumgüter können zudem Verbrauchsgüter sein (z. B. Lebensmittel), aber auch langlebige Gebrauchsgüter, die nicht im eigentlichen Sinne verbraucht werden, sondern die durch den wiederholten Gebrauch einer Abnutzung bzw. Wertminderung unterliegen (z. B. Kleidung). Konsumgüter und Hightech-Produkte schließen sich nicht aus. So zählen hochwertige elektronische Geräte, wie Geräte der Unterhaltungselektronik (z. B. Flachbildfernseher), Informationstechnologie (Computer) und der Kommunikation (hier insbesondere Mobiltelefone) zur Konsumelektronik. [78]

Im Zuge dieser Arbeit wird daher das Umfeld der Elektronikproduktion näher betrachtet. Hierzu erfolgt zunächst eine Einordnung der Begriffe *Hightech* und *Konsumelektronik*. Danach werden die Einflussfaktoren auf die Produktion elektronischer Hightech- und Konsumprodukte herausgearbeitet und ein Überblick über die Produktion elektronischer Geräte gegeben. Die Distribution hat sich bereits als ein Schlüsselprozess in der globalisierten Produktion herausgestellt (vgl. Kapitel 2). Am Beispiel mobiler Kommunikationselektronik werden die besonderen Herausforderungen an die Distribution erläutert. Das Kapitel schließt mit einer Prozessbeschreibung der Distribution von mobilen Kommunikationsgeräten.

### **3.1 Einflussfaktoren auf die Produktion elektronischer Kommunikations- und Konsumprodukte**

Der Hochtechnologie-Sektor und im Speziellen die Elektronikindustrie befinden sich in einem immerwährenden Wandel, der aber nicht nur Wachstums- und Innovationschancen, sondern auch Risiken in sich birgt. So werden durch bestimmte Markteinflüsse auch die entsprechenden Produktionssysteme beeinträchtigt. Um etwaigen Problemen entgegenzuwirken, gilt es, die Risiken frühzeitig zu erkennen und entsprechende Anpassungen in der Wertschöpfungskette durchzuführen. [73]

Bild 3-1 zeigt die Einflussfaktoren, die auf die Wertschöpfungskette, insbesondere bei der Produktion von hochwertiger Konsumelektronik, einwirken.



**Bild 3-1:** Einflussfaktoren auf die Produktion elektronischer Konsumprodukte

Das Marktsegment der hochwertigen Konsumelektronik ist im Hightech-Bereich wohl eines der schnelllebigsten. Einen der größten Einflussfaktoren für die Produktion stellt daher die hohe Innovationskraft dar, die sich sowohl direkt als auch indirekt auf andere Faktoren auswirkt. War beispielsweise noch vor wenigen Jahren die Kombination von digitaler Fotografie und mobiler Telefonie noch ausgeschlossen, so hat sich das Mobiltelefon in kürzester Zeit vom reinen sprachgebundenen Kommunikationsgerät zum mobilen internetfähigen Multimediagerät entwickelt (zur technologischen Entwicklung des Mobiltelefons vgl. Abschnitt 3.3.1). Die Innovation in der Halbleiterindustrie folgt immer noch dem Moorschen Gesetz, das besagt, dass alle 18 Monate mit einer Verdopplung der Bauelementleistung bei gleichzeitiger Halbierung der Herstellkosten zu rechnen ist. In Folge der Schnelligkeit der technologischen Entwicklung ist die Elektronikindustrie von sehr kurzen Produktlebenszyklen geprägt. Dabei ist es stellenweise nicht ungewöhnlich, dass ein Produkt einen Lebenszyklus von nur einem halben Jahr hat, dessen Entwicklung aber bis zu einem ganzen Jahr in Anspruch nehmen kann.

Kurze Produktlebenszyklen bedeuten, dass viele Produkte entweder am Anfang ihres Zyklus sind – an dem noch keine Nachfragehistorie besteht – oder am Ende – wo das Risiko des Nachfragerückgangs die Produktion teurer gestaltet. (Anm.: Die Bezeichnung „kurze Produktlebenszyklen“ ist hier nicht im technischen Sinne gemeint, da in der Regel Elektronikprodukte unbegrenzt haltbar sind, sondern im wirtschaftlichen Sinne). Aufgrund der rapiden technologischen Entwicklungen muss für eine zukünftige Wettbewerbsfähigkeit der Elektronikhersteller ein schnelles Reaktionsvermögen vorhanden sein. Um im Wettbewerbsumfeld flexibel und schnell agieren zu können, sind deshalb häufige Neu- und Umplanungen der Elektronikproduktionssysteme gefordert. [129].

Die Hersteller reagieren aber nicht nur auf den schnellen Technologiewandel, sondern wird auch von ihnen getrieben. Denn fehlende Innovationen bei neuen Produkten bieten gegenüber den Vorgängermodellen keinen Anreiz zum Kauf, wenn das alte Gerät noch funktioniert. Als Beispiel sei hier der Hang zum Zweit- oder Dritthandy angeführt. Auch zwingt die geringe Technologiedifferenzierung der Produkte der verschiedenen Hersteller diese zum schnellen Handeln. Denn wer als erstes mit einer neuen Produktgeneration auf dem Markt kommt, verschafft sich große Wettbewerbsvorteile. Wird zudem eine einstige innovative Technologie mit der Zeit zum Standard, kann diese von Wettbewerbern leicht imitiert und zu Niedrigstpreisen in den jeweiligen Markt gedrückt werden, da die Entwicklungskosten nicht auf das Produkt umgelegt werden müssen. Die Folge ist ein Strategiewandel der Hersteller von der Kostenführerschaft zu Technologieführerschaft. Dies ist aber nicht nur durch eine Verkürzung der Produktentwicklungszeit zu erreichen, sondern auch durch eine Verkürzung der Planungs- und Inbetriebnahmephase der Produktionseinrichtungen. [73]

Auch durch eine evtl. geringe Technologiedifferenzierung sind die Hersteller bestrebt, ein hohes Variantenspektrum ihrer einzelnen Produkte aufrecht zu erhalten. Denn die sich daraus ergebende schlechte Vergleichbarkeit der Varianten untereinander kann zu einer höheren Preisbildung führen. Einen Beweis liefern hierfür beispielsweise die Produktportfolios der Mobiltelefonhersteller. Hoher Variantenreichtum wirkt sich aber auch negativ auf die Produktion aus. Hierzu gilt es, einerseits den Kunden- oder Variantenspezifizierungspunkt so weit wie möglich in der Wertschöpfungskette nach hinten zu verschieben (vgl. Abschnitt 2.1.3) oder das Produktionssystem entsprechend anzupassen. Entsprechende Materialflusskonzepte für die Herstellung elektronischer Produkte sind in Abschnitt 3.2.2 beschrieben.

Ebenfalls beeinflusst der Übergang von einem Verkäufermarkt zu einem Käufermarkt Produktionssysteme und -systematik. Beispielsweise veränderte sich der Mobilfunk-



markt in Europa mit dem Ende des Internetbooms von einem *push*- zu einem *pull*-getriebenen Markt. Nicht mehr hohe Volumen, sondern Flexibilität war jetzt gefragt. Die Folge: Die Konsumelektronikhersteller ringen mit einer stark schwankenden Produktnachfrage, denn der Handel dieser Produkte hält meist nur geringe Bestände vor, so dass sich Veränderungen der Nachfrage schnell auf den Hersteller selbst auswirken. Dies fordert eine hohe Lieferbereitschaft der Hersteller, denn sie werden gezwungen, kleinere Bestellungen in kürzeren Intervallen zu akzeptieren - nicht nur, weil zudem einige Endabnehmer nicht rechtzeitig ankommende Lieferungen stornieren. Gerade die Branche der hochwertigen Konsumelektronik ist von starken saisonalen Schwankungen betroffen, hier sei als Beispiel das Weihnachtsgeschäft genannt, bei dem große Nachfragen z. B. an Flachbildfernsehern, Blue-Ray-Playern und auch Mobiltelefonen entstehen. [95]

Über alle Auswirkungen der hier beschriebenen Einflussfaktoren hinweg, ist es für die Herstellung von hochwertigen Konsumelektronikprodukten notwendig, die Produktions- und Logistiksysteme ständig anzupassen und zu verschlanken. Dies erfordert eine stetige Neu-, Um- und Anpassungsplanung. Die Integration der Simulation in diesen betrieblichen Planungsprozess gilt hier als geeignete Methode, die Planungszeiten zu verkürzen und die Planungsqualität zu erhöhen. Für tiefgreifende Ausführungen zur Simulation in Produktion und Logistik sei deshalb auf das Kapitel 4 verwiesen.

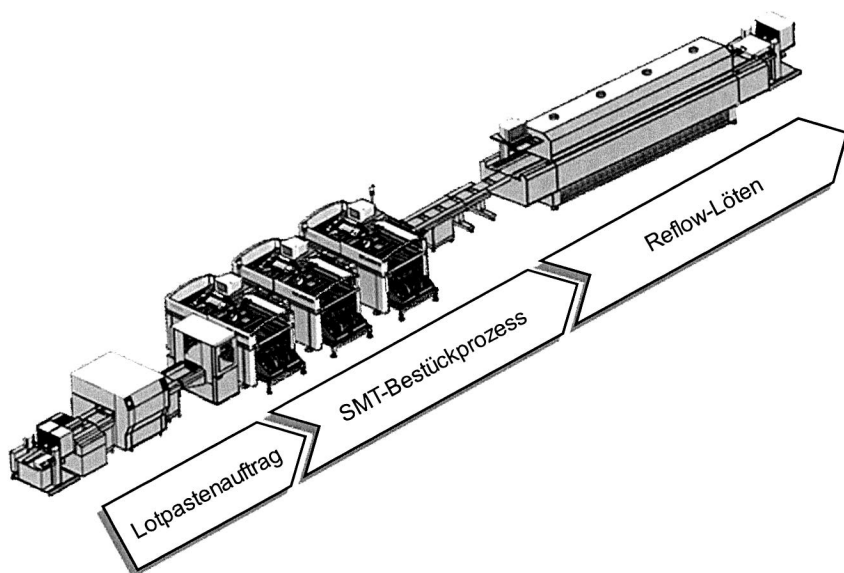
## 3.2 Herstellung elektronischer Baugruppen

Das Hauptaugenmerk bei der Herstellung von elektronischen Produkten konzentriert sich in dieser Arbeit auf die Bestückung elektronischer Schaltungsträger und deren weiterer Montage zu einem Endprodukt. Diese Bestückung der Leiterplatten basiert technologisch auf Systemen der allgemeinen Elektronikproduktion und wird ggfs. mit Beispielen aus der Fertigung und Montage von Mobiltelefonen unterstrichen. Der Fokus liegt dabei auf dem Verbau von unverdrahteten Oberflächenbauteilen (SMD - *Surface Mounted Devices*) mit der sogenannten *Surface Mounted Technology* (SMT).

Die Produktion in der Elektronik umfasst im Wesentlichen die Bestückung von Schaltungsträgern sowie deren weiteren Einbau in übergeordnete Baugruppen und ggfs. weiteren Test- und Kontrollarbeiten. Daher teilt sich die Produktion in zwei Teilbereiche. So findet die eigentliche Leiterplattenbestückung im sogenannten *Frontend*-Bereich mit hoch automatisierten Fertigungslinien statt und die anschließende Montage in übergeordnete Baugruppen im sogenannten *Backend*-Bereich. Dieser charakterisiert sich im Gegensatz zum automatisierten *Frontend* u. a. durch manuelle Arbeitsplätze.

### 3.2.1 Prozessfolge bei der Leiterplattenbestückung im *Frontend*-Bereich

Die klassische Prozessabfolge bei der Leiterplattenbestückung bei reiner Oberflächen-technologie – SMT dient der elektrischen und mechanischen Verbindung der zu verbauenden Elemente mit der Leiterplatte. Sie lässt sich in die drei Prozessschritte Lotpastenauftrag, Leiterplattenbestückung im engeren Sinne und das abschließende Weichlöten einteilen (vgl. Bild 3-2).



**Bild 3-2:** Prozessfolge bei der Leiterplattenbestückung bei reiner Oberflächen-technik - SMT

Der Lotpastenauftrag kann auf unterschiedliche Weise geschehen. So stehen grundsätzlich die drei Technologien Siebdruck, Schablonendruck und Dispensen zur Verfügung. In der Großserienfertigung, insbesondere bei der Herstellung von Mobiltelefonen, hat sich die Technologie des Schablonendrucks aufgrund der Genauigkeit speziell bei kleinen Rastern abgezeichnet. Die Lotpaste wird hierbei durch die Öffnungen in der Schablone mit Hilfe eines Rakels auf die Leiterplatte aufgetragen.

Anschließend werden mittels Bestückautomaten die zu verbauenden Bauelemente in die zuvor auf die Leiterplatte aufgetragenen Lotdepots gedrückt. Dabei werden die ein-

zelen Bauteile von einem Bestückkopf aufgenommen und dann auf die Leiterplatte in die Lotpaste gesetzt. Die elektronischen Bauteile werden je nach Ausführung über Gurte, Stangenmagazine oder Plister durch sogenannte *Feeder* zugeführt.

Nach der Bestückung der Leiterplatte wird diese zum Lötdurchlaufofen transportiert, in dem mit einem kontrollierten Temperaturprofil durch Aufschmelzen des Lotes die mechanische und elektrische Verbindung der Bauelemente mit der Leiterplatte hergestellt wird. Das vorherrschende Lötverfahren ist das *Reflow*-Löten.

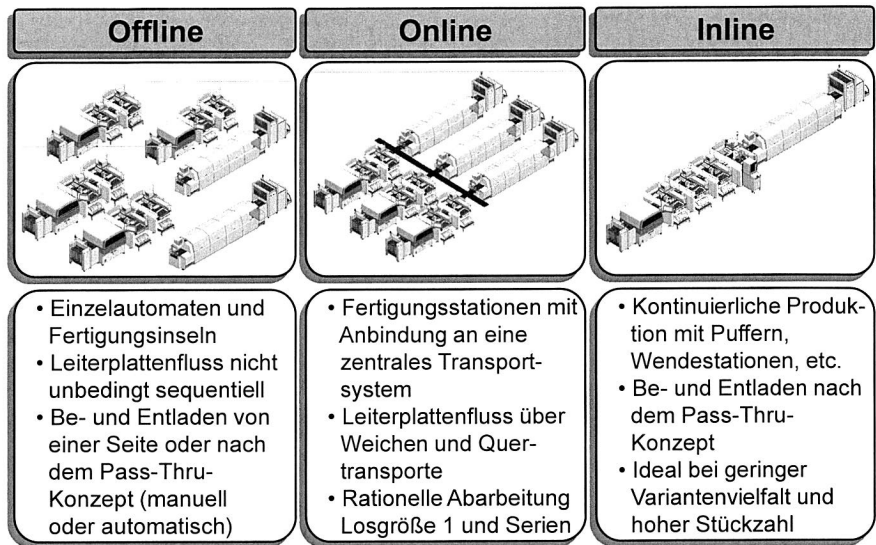
In eine Bestücklinie können je nach gefordertem Produktionsablauf und Produktdesign mehrere Arbeitsstationen integriert werden. So sind einerseits die herzustellenden Produkte, die eher im unteren Preissegment angesetzt sind, meist einseitig zu bestücken. Andererseits beinhalten höherwertige Produkte, wie beispielsweise multimedia-taugliche Mobiltelefone in der Regel eine beidseitig zu bestückende Leiterplatte.

Im zweiten Fall muss dann entschieden werden, ob die Leiterplatte die Bestücklinie ein zweites Mal durchläuft (halbe Bestücklinie) oder ob die Bestückerlinie gemäß der gesamten Prozessfolge erweitert aufgebaut ist. Dementsprechend können neben den bereits aufgezählten Hauptkomponenten weitere Linienkomponenten, wie z. B. Leiterplattenwender für beidseitige Bestückung, Fräsröbter zur Vereinzelung der Nutzen und optische Kontrollstationen zum Einsatz kommen.

Für die Planung, Auslegung und den Aufbau von Bestücklinien ist zudem das Verhältnis von passiven zu Halbleiterbauelementen zu berücksichtigen. Denn aus unterschiedlichen Attributen, wie beispielsweise Bauelementgröße, Bestückgenauigkeit oder Bestückkraft, resultieren auch unterschiedliche Anforderungen an den Bestückprozess. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, stehen hierzu unterschiedliche Bestückautomatentypen zur Verfügung. [92]

### **3.2.2 Materialflusskonzepte bei der Bestückung elektronischer Baugruppen**

Die Fertigung in der Elektronikproduktion kann je nach Produkt und Ausrichtung der Produktionssystematik unterschiedlich organisiert sein. Dementsprechend muss auch der Materialfluss angepasst sein. Daher ist beim Aufbau von Bestücksystemen prinzipiell zwischen drei Linienstrukturen zu unterscheiden. Vergleiche hierzu Bild 3-3.



**Bild 3-3:** Strukturen unterschiedlicher Linienkonzept in der Elektronikproduktion [92]

Die *Offline-Struktur* wird charakterisiert durch Einzelautomaten und Fertigungsinseln, wobei der Leiterplattenfluss zwischen den Bearbeitungsstationen nicht unbedingt sequentiell erfolgen muss. Das Be- und Entladen kann manuell oder automatisiert erfolgen.

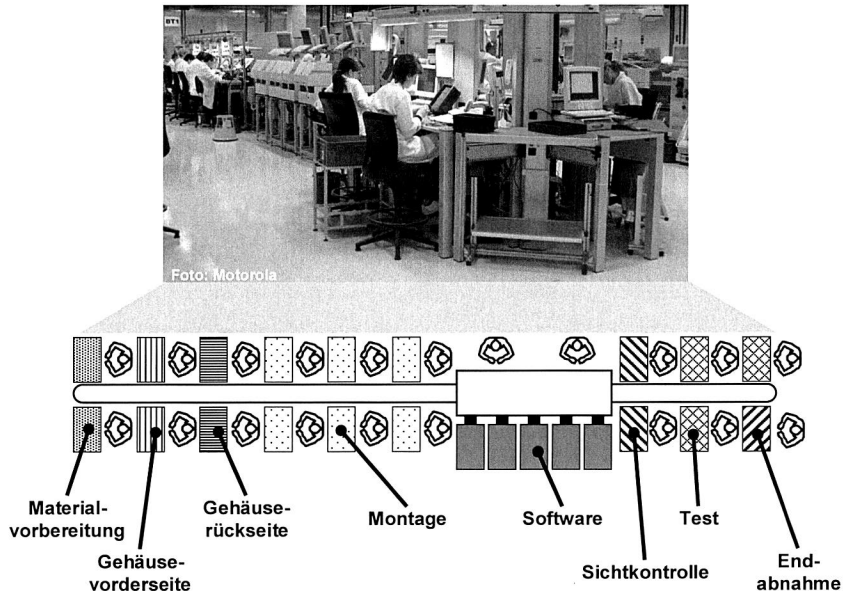
Das Wesentliche an einer *Online-Struktur* ist, dass die Fertigungsstationen mit einer zentralen Transporteinrichtung verbunden sind. Der Leiterplattenfluss erfolgt über Weichen und Quertransporte, und die Arbeitseinheiten sind einzeln ansteuerbar.

Die Fertigungsstruktur, die im Fall der SMD-Bestückung wohl am meisten eingesetzt wird, ist die *Inline-Struktur*. Bei dieser Struktur sind die Bearbeitungsstationen fest in der von der zu bestückenden Leiterplatte durchlaufenden Fertigungsreihenfolge angeordnet. Die hintereinander liegenden Fertigungsstationen sind unmittelbar durch ein internes Transportsystem miteinander verbunden, das Be- und Entladen geschieht automatisiert. Diese Linienstruktur ist ideal für hohe Stückzahlen und geringe Variantenvielfalt. [92]

### 3.2.3 Endmontage im Backend-Bereich

Kommen bei der Leiterplattenbestückung im *Frontend* hoch technologisierte und voll-automatisierte Fertigungsanlagen zum Einsatz, sind bei der Endmontage der elektro-

nischen Produkte im *Backend* manuelle Montagetätigkeiten den Maschinen deutlich überlegen. Eine starke Automatisierung hat sich trotz zahlreicher Initiativen nicht durchgesetzt. Bei den oft komplizierten Abläufen in der Endmontage erzielen Roboter keinen wirtschaftlichen Vorteil. So werden beispielsweise bei der Endmontage von Mobiltelefonen im *Backend* die Leiterplatte und weitere Baugruppen in das Telefongehäuse gebaut. Dieser Prozess startet mit der Materialvorbereitung und der Vorbereitung der Gehäusevorderseite und -rückseite. Weitere Prozessschritte sind beispielsweise das Einsetzen der meist flexiblen und biegeschlaffen Gummitastaturen und das Aufsetzen der Displayabdeckung, vor der zunächst diverse Linsen von Fremdkörpern mit ionisierter Luft befreit werden. Anschließend wird das Gerät komplettiert und zusammengesetzt. Je nach Anforderung und Produktionsstrategie kann die manuelle Montage im *Backend* in Gruppenarbeit oder in Fließfertigung durchgeführt werden. Bild 3-4 zeigt beispielhaft die Endmontage im *Backend* bei der Mobiltelefonproduktion im Fließfertigungsprinzip.



**Bild 3-4:** Montage elektronischer Baugruppen im Backend bei der Mobiltelefonproduktion

Auch für das anschließende Aufspielen vom Betriebssystem und die Installation weiterer Software kann die Mobiltelefonproduktion exemplarisch für die Fertigung höherwertiger elektronischer Produkte stehen. Speziell beim Aufspielen der Betriebssoftware,

dem sogenannten *Flexen*, hat sich eine Teilautomatisierung durchgesetzt. Eine anschließende visuelle Qualitätskontrolle, diverse elektrischer Gerätetests und einer weitere Qualitätsendabnahme schließen die Endmontage der elektronischen Produkte ab. Das fertige Mobiltelefon wird dann für die Distribution freigegeben. [89]

### **3.3 Herausforderungen bei der Distribution mobiler Kommunikationselektronik**

Globalisierung, zyklische Absatzmärkte, kurze Produktlebenszyklen sowie sich rasch wandelnde Technologien kennzeichnen die Wettbewerbssituation der Unternehmen der Konsumelektronik und stellen diese vor immer größere Herausforderungen (vgl. 3). Gerade die Branche rund um die mobile Kommunikationselektronik unterliegt dabei einem stetig stärker werdenden Preisdruck sowie dem Übergang vom kosten- zum zeitbezogenen Wettbewerb. Da sich die Fertigungstechnologien zur Herstellung elektronischer Produkte nicht maßgeblich ändern, reicht es nicht mehr aus, die bereits ausgereiften Produktionsprozesse zu verbessern. Die Optimierung muss vielmehr prozessübergreifend geschehen und vor allem die internen produktionslogistischen sowie die externen distributionslogistischen Abläufe inklusive ihrer Schnittstellen integrieren.

Dieser Integrationsansatz soll in diesem Unterkapitel näher erläutert werden. Hierzu wird hier am Beispiel der mobilen Kommunikationselektronik zunächst die rasante technologische Entwicklung des Mobiltelefons vom reinen Gerät zur Sprachübermittlung hin zum mobilen Multimedia- und Lifestyle-Produkt aufgezeigt. Danach wird der Wandel der Produktionssystematik für Mobiltelefone beschrieben, um anschließend die Notwendigkeit neuer Logistik- und Distributionsstrategien vom Hersteller bis zum Kunden herausgearbeitet, da vor allem die Distribution als Schlüssel zum Optimierungserfolg gilt. Eine Analyse der Distributionsprozesse legt daraufhin den Grundstein für die in Kapitel vier Beschreibung der Entwicklung eines Referenzmodells zur Simulation von logistischen Systemen.

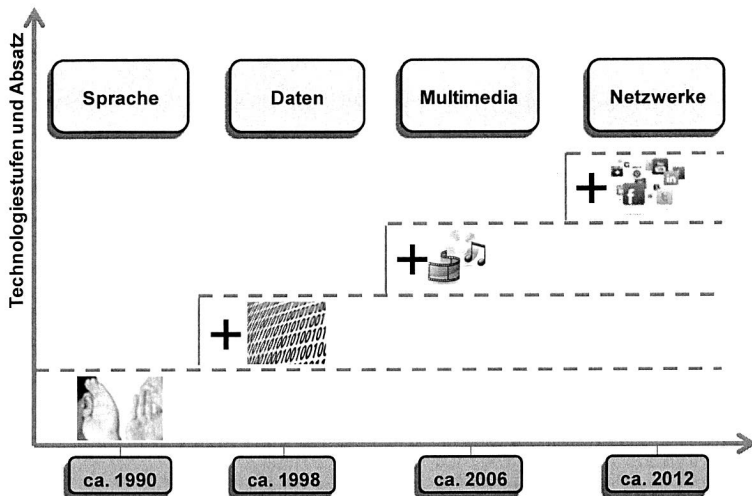
#### **3.3.1 Technologische Entwicklung mobiler Kommunikationselektronik**

Das Potenzial der mobilen Kommunikationstechnik ist sehr hoch. Schnelle kabellose Datenzugänge überall, multifunktionale mobile Endgeräte und internetbasierte Anwendungen, die einen schier unendlichen Bedarf abdecken, sind die Eckpfeiler der modernen Kommunikation. Insbesondere die neuen multimedialen Mobiltelefone bilden hierfür die technische Grundlage. Die Anzahl der Funktionalitäten hat sich seit der Einführung der mobilen Kommunikation vervielfacht. So wandelte sich das Mobiltelefon vom mehrere Kilo schweren Autotelefon zum modernen und handlichen Smartphone. Das erste Autotelefon wurde 1952 verbaut und wog damals ca. 16 kg. Aber nicht nur die

Größe und das Gewicht der Telefone, sondern auch die Kosten der mobilen Kommunikation waren in den Anfängen noch sehr hoch. So war das erste Autotelefon mit 15.000 DM rund dreimal teuer als ein VW Käfer. In der Folgezeit dauerte es sehr lange bis Größe, Gewicht und vor allem die Mobilität der Geräte ein erträgliches Maß erreichten. Erst 1982 gelang es, durch Integration der Empfangseinheit, des Akkus und des Telefons eine größere Mobilität zu erreichen. Mittels Tragegriff ließ sich das rund zehn Kilogramm schwere Gerät aus dem Auto herausnehmen. Allerdings musste es nach wenigen Stunden zum Aufladen.

Der eigentliche Aufschwung der Mobiltelefone setzte erst Anfang der 1990er Jahre mit der Einführung des europäischen Mobiltelefonstandards GSM (*Global System for Mobile Communications*) und der Fortschritte in der Mikroelektronik ein. Dabei wurde der anfänglich von Europa genutzte Standard GSM hauptsächlich zur Übermittlung von Sprachdiensten benutzt. Durch die steigende Nachfrage an mobilen Telefonen wurden schon bald mehrere Frequenzbänder zur Verfügung gestellt, die sich allerdings global unterschieden. Um dennoch eine weltweite Erreichbarkeit sicher zu stellen, folgten Multibandmobiltelefone für globale Sprachdienste.

Die globalen mobilen Sprachdienste wurden mit der Zeit um datenbasierte Dienste ergänzt. War es anfänglich noch das Übertragen alphanumerischer Zeichen über den *Short Message Service* (SMS), ermöglichten weitere Standards, wie z. B. der *General Packet Radio Service* (GPRS), die ersten Schritte für das mobile Internet. Die Forderung nach noch höheren Übertragungsraten führte zur Evolution des GSM-Standards zum *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS). Für die Weiterentwicklung des Mobiltelefons zum mobilen Multifunktions- und Multimediageräts tragen auch die Erfolge bei der Entwicklung der Display-Technologien bei. Durch den Übergang vom einfachen monochromen zum farbigen Display mit hoher Auflösung können somit internetbasierte Multimediaanwendungen genutzt werden. Zudem fördert auch die Integration und Miniaturisierung neuer Komponenten multimediale Anwendungen zu ermöglichen. Hier sind beispielsweise die digitale Foto- und Videografie, das Abspielen digitaler Audio- und Videoformate oder das digitale Fernsehen zu nennen. Neben der technologischen Entwicklung zeigt sich bei den Endgeräten der Trend zum Lifestyle-Produkt. [89]



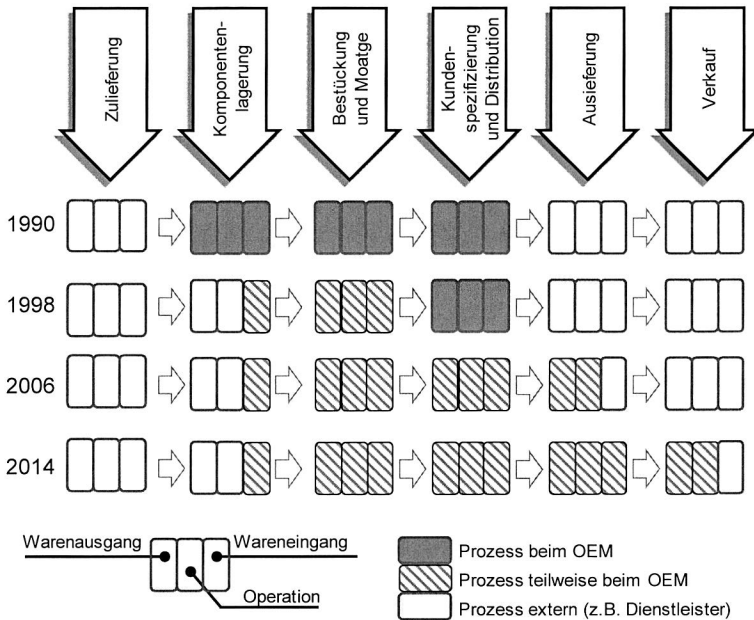
**Bild 3-5:** Entwicklung des Mobiltelefons von der reinen Sprachübertragung zum Life-style-Produkt [89]

### 3.3.2 Wandel der Produktionssystematik

Die Produktionssystematik mobiler Kommunikationselektronik ist seit den 1990er Jahren einer ununterbrochenen Dynamik unterworfen. Dies gilt sowohl für die Materialströme und die Prozesskette als auch für die am Prozess beteiligten Partner. Grundsätzlich lässt sich die Wertschöpfungskette in die Beschaffung, die Fertigung, die Distribution und den Verkauf unterteilen. Gerade zu Beginn des Mobiltelefon-Aufschwungs in Europa lag der Fokus der Hersteller auf der schnellen Beschaffung von Rohmaterialien sowie dem Auf- und Ausbau von Produktionskapazitäten. Dies führte zu einem hocheffizienten Fertigungskonzept, inklusive Produktionslinien, bei denen die Taktzeit auf die Sekunde genau optimiert wurde. Um dem stetigen Bedarf an immer neuen Fertigungskapazitäten gerecht zu werden, entstanden zudem ständig neue Fabriken auf dem europäischen Kontinent, deren Fertigung aufeinander abgestimmt werden musste.

Der daraus folgende hohe Kapitaleinsatz bewirkte dann Ende der 1990 Jahre den langsamen Einzug des *Outsourcings* und die Entstehung von EMS-Dienstleister (*Electronic Manufacturing Services*) zum Abfangen der Auftragsspitzen. Schnell entwickelte sich ein globales Netz an Firmen für das Bestücken von Leiterplatten. Die immer größere Nachfrage bei gleichzeitiger Verringerung der Produktlebenszeit beschleunigte das *Outsourcing*.





**Bild 3-6:** Verschiebung des Fokus in der Wertschöpfungskette der Mobiltelefonhersteller und der damit einhergehenden Wandel der Produktionssystematik [89]

Mit dem Ende des Internetbooms veränderte sich der Mobilfunkmarkt in Europa eben von einem *push*- zu einem *pull*-getriebenen Markt. Nicht mehr hohes Produktionsvolumen, sondern Flexibilität war gefragt. Diese neue Herausforderung forcierte die Verlagerung von Produktionskapazitäten an weltweit agierende EMS-Dienstleister mit gleichzeitiger Schließung europäischer Fertigungsstandorte. Die Hersteller von Mobiltelefonen änderten zudem die Produktionssystematik dahingehend, dass sie das Prinzip des *Postponements*, also die kundenspezifische Anpassung zum letztmöglichen Zeitpunkt, einführten. Dabei behielten sie allerdings den zentralen Materialeinkauf für alle ihre Produkte inklusive der der EMS-Dienstleister.

Die in der Wertschöpfungskette integrierten Distributionszentren wurden dadurch zu den „neuen“ Elektronikfabriken in Europa. Schnelle und reibungslose Logistikprozesse zwischen den globalen Fertigungsstätten und den lokalen Distributionszentren wurden dadurch zum Wettbewerbsvorteil. Stand also Mitte der 1990er Jahre die Optimierung der Taktzeit der Bestückprozesse bei der Fertigung im Vordergrund, entsteht jetzt die Herausforderung kundenspezifische Anpassungen zu installieren. Vor allem in Europa, mit seinen vielen unterschiedlichen Sprachen und Mobilfunk-*Providern*, entwickelte

sich aus einem reinen Distributionszentrum sehr schnell ein *Costumer Fullfillment Center* (CFC) mit zahlreichen kundenspezifischen Aufgaben und den damit verbundenen Fertigungsprozessen. Zu den Abläufen und detaillierten Erläuterungen der herstellerseitigen Distributionszentren sei auf das Unterkapitel 3.3.4 verwiesen.

Zusammenfassend können für den Wandel der Produktionssystematik bei der Herstellung und Distribution mobiler Kommunikationselektronik, insbesondere für den europäischen Markt, folgende Punkte stehen:

- Ausgliederung diverser Fertigungsschritten an Fertigungsdienstleistern
- Bestandsminimierung in Lagern und Puffern
- Zentralisierung des Einkaufs und Fokussierung auf Systemlieferanten
- Einführung einer nachfrageorientierten Massenfertigung

Für eine Optimierung der gesamten *Supply Chain* und einen nachhaltigen Systemaufbau sind jedoch ein Umdenken und die Anpassung der Logistik gefordert. Dies beinhaltet vor allem die Entwicklung und Verfolgung neuer Strategien. Der folgende Abschnitt geht auf diese Thematik näher ein. [89] [95]

### **3.3.3 Potentiale durch die Bildung neuer Distributionsstrategien**

Wie bereits in Abschnitt 3.3.2 näher erläutert, hat die Sättigungsrate mit Mobiltelefonen in den meisten europäischen Staaten mittlerweile die 100% Grenze erreicht oder bereits überschritten. Die Folge ist der Wandel zu einem reinen Austauschmarkt, u. a. getrieben von auslaufenden Mobilfunkverträgen. Insolvenzen oder Übernahmen von Unternehmen lassen zudem einige wenige große Gerätehersteller entstehen. Auch die Mobilfunkbetreiber werden durch stetig fallende Gesprächskosten mit einem langsamen Gewinnverlust konfrontiert, der durch das Anbieten neuer drahtloser und mobiler Kommunikations- und Multimedien Dienste egalisiert werden soll. Durch die notwendige Konzentration der Mobilfunkbetreiber auf ihr Kerngeschäft ergeben sich daher neue Konstellationen im Bereich der *Supply Chain* von Mobiltelefonen.

Für die sich auf den Service konzentrierenden Mobilfunkbetreiber ist der Handel mit dem Endgerät mehr ein Mittel zum Zweck als ein gewinnbringendes. Die Lagerhaltung und der rasante Wechsel der verschiedenen Modelle entwickeln sich zu einem der größten Kostenfaktoren außerhalb ihres Kerngeschäftes. Dieser neuen Situation muss auch ein neues *Supply Chain* Konzept Rechnung tragen.

Wegen der Reduzierung der möglichen Gerätehersteller als auch der Mobilfunkbetreiber selbst wird die Kollaboration zwischen den verbleibenden Partnern immer wichtiger. Diese Situation ermöglicht eine völlig neue Ausrichtung für die Hersteller von Mobilfunkgeräten, die durch Übernahme der kompletten Gerätedistribution, zum ersten

Mal die Möglichkeit sehen, die komplette Wertschöpfungskette derart zu optimieren, dass die bisher anfallenden Reibungsverluste vermieden werden. [89] [95] [23]

Die ereignisdiskrete Materialflusssimulation bietet die Möglichkeit, Auswirkungen zukünftiger Distributionsstrategien zu analysieren und das Verhalten dieser komplexen Systeme abzuschätzen.

### 3.3.4 Distribution mobiler Kommunikationselektronik

Die hier im Fokus stehende Distribution ist das Bindeglied zwischen Hersteller und Konsument. Sie umfasst somit alle Prozesse, die zur Verteilung der Waren an die Endverbraucher notwendig sind. Die Distribution mobiler Kommunikationselektronik weist eine hohe Komplexität auf, da bei elektronischen Konsumgütern meist ein Käufermarkt existiert. Das kann dazu führen, dass ein Endkunde bei Nichtverfügbarkeit eines Produktes gegebenenfalls auf ein Mitbewerberprodukt mit ähnlichen technischen Spezifikationen und Kosten ausweicht. Ein ausreichend hoher Lieferservice ist daher wesentlich. Zum Lieferservice gehören neben Lieferzeit und Lieferbereitschaft auch Flexibilität und Lieferzuverlässigkeit. Es ist daher erforderlich, dass ein geeigneter Kompromiss zwischen Kosten und Lieferservice gefunden wird. [125]

Das moderne Verständnis der Distribution beinhaltet aber auch alle Prozesse, die zur Kundenspezifizierung notwendig sind und die geforderte Verschiebung des Kundenentkopplungspunktes so weit wie möglich nach hinten in der Wertschöpfungskette zu realisieren. Moderne Distributionszentren wandeln sich somit von bestandsgeführten Lagern zu komplexen Umschlagsknotenpunkten. Dieser Wandel zeigt sich eben insbesondere bei der Distribution mobiler Kommunikationselektronik. Hier handelt es sich meist um Massenprodukte, die vorwiegend an regional konzentrierten Standorten hergestellt werden, aber von global verteilten Kunden bezogen werden. So werden elektronische Konsumartikel, allen voran Mobiltelefone, vorwiegend in Asien hergestellt aber weltweit abgesetzt. [3] [95]

Die Bedeutung der Distributionszentren innerhalb der *Supply Chain* hat bei der mobilen Kommunikationselektronik besonders aufgrund der herrschenden Marktsättigung zugenommen. So entstanden *Customer Fullfilment Center*, die Distributionszentren mit einem erweiterten Aufgabenbereich darstellen, zu dem die eigentliche Distribution, das kundenspezifische Verpacken und das *Postponement*, gehören. Unter *Postponement* ist dabei die späteste mögliche Kundenspezifizierung der Produkte innerhalb des Wertschöpfungsprozesses zu verstehen.

### Kundenspezifizierung bei mobiler Kommunikationselektronik

Die Bedeutung der Kundenspezifizierung ist besonders für den europäischen Markt von zentraler Bedeutung, da hier die Sprachvielfalt eine wichtige Rolle spielt und zudem alle führenden Mobilfunkprovider Netze in ganz Europa betreiben und je nach Bedarf, kurzfristig Endgeräte anfordern. Das heißt, dass erst kurz vor Auslieferung feststeht, welche Variante vom jeweiligen Kunden geordert wird. Diese hat Auswirkungen auf die kunden- und absatzspezifischen Verpackungsprozesse, zu denen beispielsweise die Zuordnung von Bedienungsanleitungen in der richtigen Sprache oder landestypische Netzstecker und -teile zählen. [89]

Die gerätebezogene Kundenspezifizierung, also das *Postponement*, wird dadurch unterstützt, dass das Aufspielen von *Software* bei elektronischen Erzeugnissen von der eigentlichen Produktion trennbar ist. Dies ermöglicht es, dass die Basisgeräte zusammen hergestellt, aber erst später im *Distribution Center* an käuferabhängige Wünsche angepasst werden können. [89]

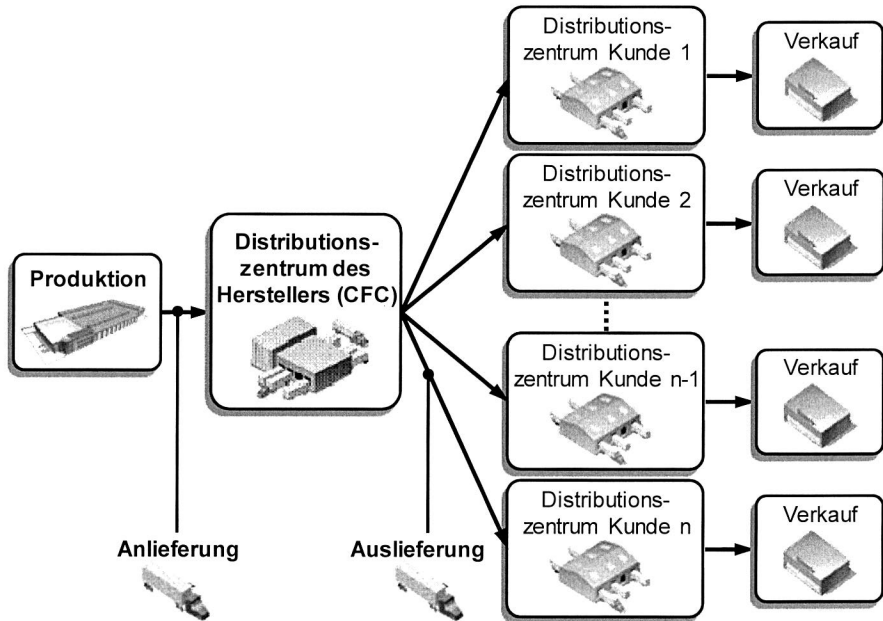
Die Software nimmt schon deshalb eine besondere Rolle ein, da sich die Mobiltelefonprovider durch eigene Benutzeroberflächen und Benutzerführungen von ihren Mitbewerbern durch Funktionalität und Design unterscheiden wollen (vgl. Unterkapitel 3.1. Die geringe Technologiedifferenz der einzelnen Mitbewerber). Gerade bei Multimediageräten ermöglichen *provider*-spezifische Softwareapplikationen, wie Spiele, Bilder, Logos und Klingeltöne, immer wichtigere Unterscheidungsmerkmale, die zum Kauf des Produktes und somit zum Abschluss eines Mobilfunkvertrags anreizen sollen. [89]

Zur Kundenspezifizierung zählen allerdings nicht nur softwareseitige Anpassungen eine Rolle, sondern auch so genannte *Brandings* der Geräte, was vor allem die Identität des Mobilfunkbetreibers nach außen hin deutlich machen soll. Dies geschieht in der Regel durch die Nennung des Mobilfunkbetreibernamens und der -logos sowie weitere Beschriftungen auf dem Gerät. Zu den hardwareseitigen Anpassungen zählen auch individuelle Gehäuseschalen, um der *Corporate Identity* des Mobilfunkbetreibers zu entsprechen oder das Gerät höherwertiger erscheinen zu lassen. [89]

### Distributionsabläufe

Die für den europäischen Markt benötigten Mobiltelefone werden hauptsächlich in Asien hergestellt und anschließend an ein zentrales Distributionszentrum des Mobiltelefonherstellers geliefert. Dort durchlaufen die Telefone verschiedene Prozesse bis sie bereit für den Versand an die jeweiligen Distributionszentren der Kunden, also der Mobilfunknetzbetreiber, sind. Nach bedarfsgerechter Anlieferung der Geräte im Distributi-

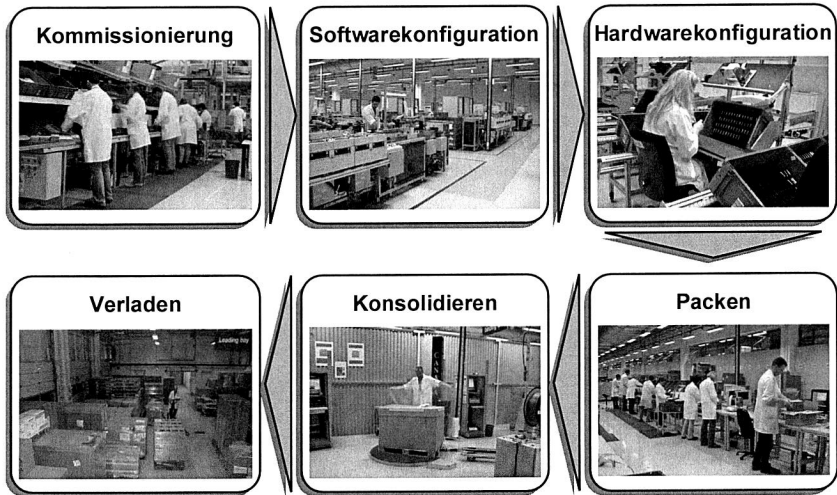
onszentrum des Kunden werden diese eingelagert, bei entstehender Nachfrage an den Verkaufsstellen aus den jeweiligen Lagern entnommen und an die Verkaufsstellen ausgeliefert. Die Distributionsstruktur ist in Bild 3-7 veranschaulicht. Die Arbeit ist dabei auf die Abläufe und Prozesse, die in einem Distributionszentrum eines Mobiltelefonherstellers stattfinden, fokussiert.



**Bild 3-7:** Aufbau der Distributionsstruktur bei mobiler Kommunikationselektronik

Geht eine Bestellung mit den entsprechenden Bestellinformationen (Typ/Variante, Menge, Liefertermin) im *Customer Fullfilment Center* (CFC) ein, werden die Bestelldaten mit dem Lagerbestand verglichen. Auf Basis der eingehenden Bestellungen wird der Bedarf für alle benötigten Einzelkomponenten ermittelt und die benötigte Menge kommissioniert sowie der *Postponement*-Prozess angestoßen. Dieser beginnt mit diversen manuellen Vorarbeiten am Gerät. Daraufhin erfolgen die softwareseitigen Konfigurationen (*Flashing*), die entsprechend der Automatisierung der Betriebssoftwareinstallation (*Flexen*) im Bereich der Montage stattfinden. Für eine Austaktung der Prozesse bei Softwareanteilen, die in großen Mengen nachgefragt werden, sind diese Softwarekomponenten beim *Preflashing* in einem vorgelagerten Prozess auf das Mobiltelefon zu übertragen. Individuelle Softwareanteile und die Konfigurationen werden dann in einem zweiten Schritt vorgenommen.

Im Anschluss daran bedarf es einer notwendigen Hardwareanpassung. Auch hier orientiert man sich an den Erfahrungen aus der Fabrikmontage. Je nach erforderlichem Umfang der Arbeiten wird dies in Gruppenarbeit oder Einzelfertigung erledigt.



**Bild 3-8:** Hauptprozesse des Ablaufs in einem Distributionszentrum eines Mobiltelefonherstellers (Fotos: Motorola)

Sobald der *Postponement*-Prozess für eine Kundenbestellung abgeschlossen ist, kommt es zur Verpackung und zur eigentlichen Distribution der Ware an den Kunden. Dazu wird die Bestellung einer Packlinie zugeteilt, an der mehrere Arbeiter das Mobiltelefon gemeinsam mit den Zubehörteilen in einen meist produkt- und kundenspezifischen Verkaufskarton verpacken. Anschließend erfolgt die Konsolidierung der Kundenaufträge. Dieser Prozess besteht, wie der des Packens, aus mehreren Stationen. In einem ersten Schritt werden die einzelnen Mobiltelefonkartons mit einem Label beklebt. Danach wird jeder Karton einzeln gewogen, um den korrekten Inhalt zu überprüfen. Entspricht das Gewicht den Vorgaben, werden jeweils zehn Kartons in ein sogenanntes *Overpack* gebündelt und anschließend auf einer Palette platziert.

Bevor die Paletten auf einen LKW verladen werden, werden die Paletten noch einzeln mit Folie überzogen und entsprechend der Frachtvorschriften beschriftet. Ist eine gesamte Bestellung komplett auf Paletten verpackt, wird mit der Beladung der LKWs begonnen.

## 4 Digitale Planungswelten in Produktion und Logistik

Unternehmen unterliegen im globalen Produktionsumfeld einem hohen Rationalisierungsdruck, um Marktanteile zu verteidigen oder sogar zu gewinnen. Um den dadurch gestiegenen Anforderungen bei der Planungsqualität von Produktions- und Logistiksystemen gerecht zu werden, ist der Einsatz digitaler Planungsmethoden unumgänglich geworden. Hieraus entstand die Methode der *Digitalen Fabrik*, die bestrebt ist, die so entstandenen Insellösungen zu integrieren. Eine Schlüsselrolle innerhalb der Digitalen Fabrik nimmt die Simulation ein. Wie diese Rolle zu sehen ist, erläutert das erste Unterkapitel. Daraufhin wird ein Vorgehensmodell zur methodischen Durchführung von Simulationsstudien vorgestellt. Das letzte Unterkapitel nimmt dann aktuelle Strömungen aus der Informations- und Kommunikationstechnologie auf und beschreibt eine Vision, wie zukünftig Planungen und Simulationen in der Produktion und Logistik digital unterstützt werden können.

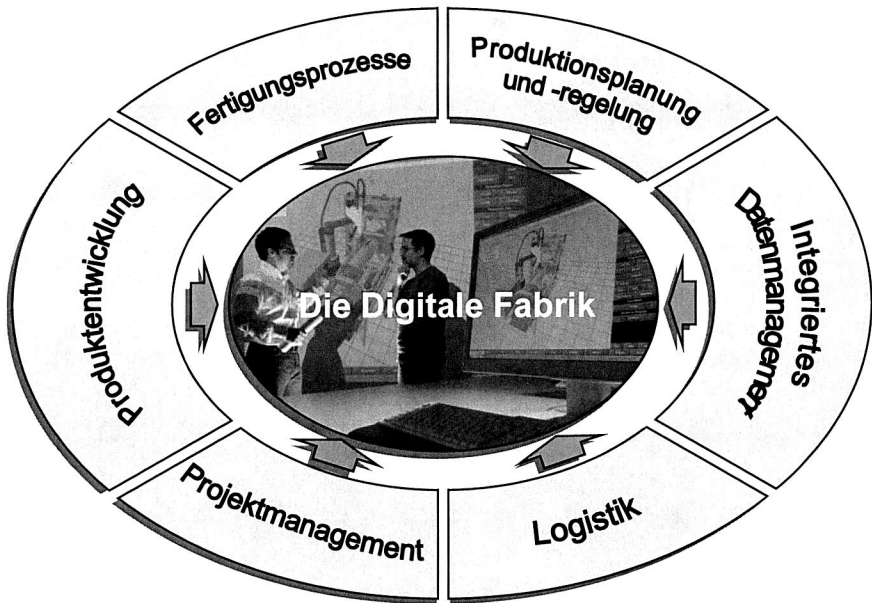
### 4.1 Simulation im Umfeld der Digitalen Fabrik

Bei der Planung von Produktions- und Logistiksystemen, werden bereits die Werkzeuge der *Digitalen Fabrik* im Einzelnen eingesetzt. Die weitere Einführung dieser Werkzeuge und die Ausweitung ihres Einsatzes im Produktionsumfeld werden mit Sicherheit intensiviert. Innerhalb der *Digitalen Fabrik* kommt neben der Visualisierung gerade der Simulation eine besondere Bedeutung zu. In der Naturwissenschaft und Technik ist unter Simulation das Nachahmen eines Systemverhaltens zu verstehen. So soll die Realität durch das Verwenden eines Modells, also dem Herstellen von Bedingungen und Verhältnissen, wiedergegeben werden. [15] [53] [114]

Das folgende Kapitel erläutert zunächst den Begriff der *Digitalen Fabrik* und beleuchtet danach ihr Umfeld bezüglich der Produktionstechnik. Darauf folgend arbeitet es die Rolle der Materialflusssimulation heraus.

#### 4.1.1 Digitale Fabrik

Die Methode der Digitalen Fabrik soll mit modernen Werkzeugen die immer komplexer werdenden Produktentwicklungs- und Produktionsplanungsprozesse unterstützen. Dabei hat sie die Aufgabe, bestehende Insellösungen der einzelnen Disziplinen mit ihren bestehenden Entwicklungs- und Planungsinstrumenten zu integrieren (vgl. Bild 4-1). [71] [18] [70]



**Bild 4-1:** Die Digitale Fabrik als Integrationsmethode unter Zuhilfenahme alternativer rechnergestützter Werkzeuge

Decken sich die in der Literatur zu findenden Ziele der Digitalen Fabrik, wie eine Verkürzung der Planungszeit und eine Erhöhung der Planungsqualität bei einer deutlichen Reduzierung der Planungskosten, fand der Begriff Digitale Fabrik selbst bisher keine eindeutige Übereinstimmung. Die Begriffsbestimmungen sind so vielfältig wie die Anzahl der Autoren, die sich mit der digitalen Fabrik näher beschäftigten. [123] [18] [16] [11] [52]

Eine einheitliche Bestimmung und Abgrenzung des Begriffs der Digitalen Fabrik erfolgt in der VDI-Richtlinie 4499:

*Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u. a. der Simulation und 3-D-Visualisierung –, die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden.*

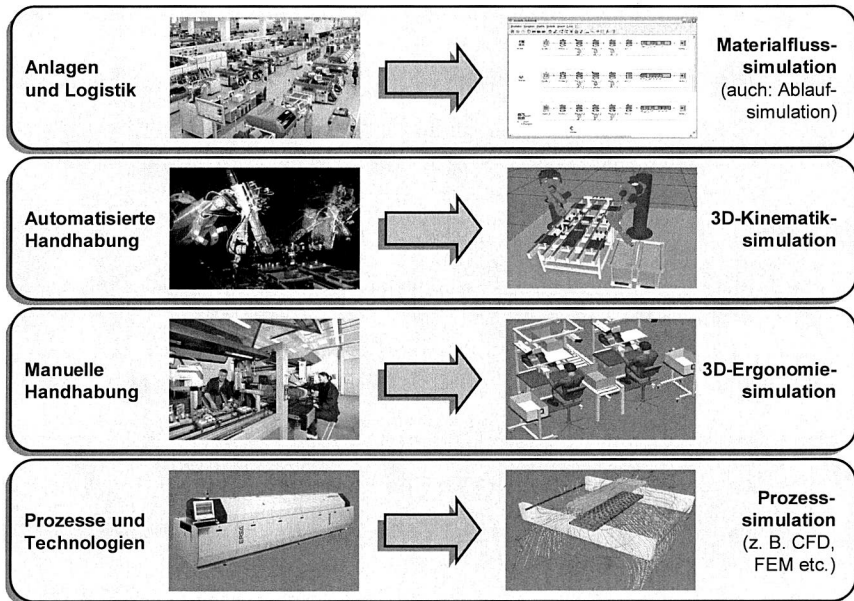
Des Weiteren erklärt die Richtlinie die umfassende *Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt* zum Ziel der Digitalen Fabrik.



Die Digitale Fabrik stellt also ein Konzept dar, das die Planung von Produkt, Prozessen und Systemen integrieren soll. Das betrifft sowohl frühe Entwicklungsphasen als auch die Unterstützung der Produktion bei Systemanläufen und während des Betriebs. Beispiele hierfür sind *CAD*-Anwendungen, das *Digital Mock-up* und die *Virtual Reality*. Ziel ist es im Sinne des *Cuncurent Engineerig*, Entwicklungs- und Planungsprozesse in Unternehmen zu parallelisieren. [114] [99] [17] [27] [120]

#### 4.1.2 Simulation in der Produktionstechnik

Im Bereich der Produktionstechnik hat sich die Simulation als eine besonders geeignete Methode zur Planung und zum Betrieb von immer komplexer werdenden Fertigungs- und Montageanlagen sowie Logistiksystemen entwickelt. Je nach Aufgabenstellung stehen hierfür prinzipiell die in Bild 4-2 dargestellten Simulationsmethoden zur Verfügung.



**Bild 4-2:** Unterschiedliche Simulationsmethoden in der Produktionstechnik

Die Prozesssimulation kommt immer dann zum Einsatz, wenn Fragestellungen bezüglich Fertigungsprozesse zu beantworten sind. Analysen können hier beispielsweise hinsichtlich der Füllvorgangsprozesse beim Spritzgießen, dem Schwingungsverhalten

von Werkzeugmaschinen oder dem thermischen Verhalten von elektronischen Baugruppen beim *Reflow*-Löten geschehen.

Grafische 3D-Simulationen kommen auf Zellenebene zum Einsatz. Planungsinhalte sind hierbei das Zellenlayout, Ablaufvorschriften, RC- und NC-Programmierung, Kollisionsvermeidung und Taktzeioptimierung. Die Auslegung und Planung der Komponenten erfolgt dabei mit der Kinematiksimulation. Eine Sonderstellung auf Zellenebene nimmt die Ergonomiesimulation ein, die eine rechnergestützte Planung manueller Arbeitsplätze unter ergonomischen Gesichtspunkten ermöglicht. Die grafische 3D-Simulation dient generell der Analyse und Optimierung der Bewegungsabläufe in Produktionssystemen.

Speziell zur Untersuchung und Bewertung von Materialflusssystemen in der Produktion und Logistik hat sich die ereignisdiskrete Simulation als geeignetes Werkzeug etabliert. Gerade bei der Analyse dynamischer Systeme wird sie zur Unterstützung der Entscheidungsfindung herangezogen, besonders wenn keine geeigneten analytischen Hilfsmittel zur Verfügung stehen.

Mit der Materialflusssimulation können Anlagenstrukturen, Materialfluss- und Logistikprozesse, Systemleistungen und Fertigungsabläufe analysiert sowie Steuer- und Entstörstrategien einer Anlage geplant werden. Weiterhin können klassische Fragestellungen hinsichtlich Engpassvermeidung, Puffer- und Lagerdimensionierung sowie benötigten Ressourcenbedarfs beantwortet werden.

Die VDI Richtlinie 3633 *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen* definiert die Simulation als *das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind*.

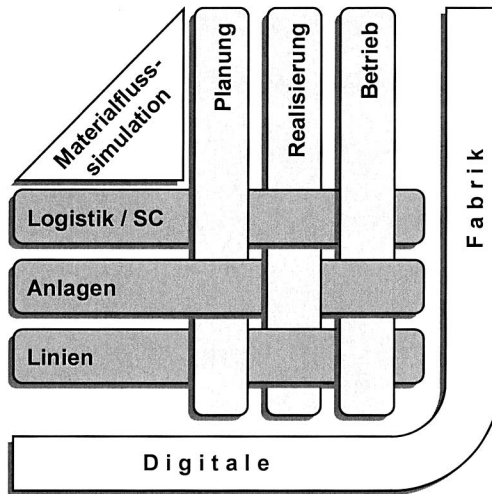
Mit Hilfe der Simulation können also „Was-Wäre-Wenn-Analysen“ durchgeführt werden, die durch Experimente am Realsystem aufgrund der entstehenden Kosten, des Aufwands oder der Inexistenz nicht durchführbar sind.

Die Herausforderungen, die an die Materialflusssimulation gestellt werden, betreffen stärker denn je, aufgrund der immer komplexeren Systeme, deren Integration in den betrieblichen Alltag. Das Konzept der Digitalen Fabrik bildet hierfür die Grundlage. [72] [13]

#### **4.1.3 Die Rolle der Materialflusssimulation**

Komplexe Produktionssysteme, weltumspannende Logistiknetzwerke und variantenreiche Produkte sind nur einige Gründe, die den Einsatz der Digitalen Fabrik auch in

der Produktionsentwicklung unentbehrlich machen. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Materialflusssimulation, da sie produktionsbezogene Systeme in ihrer Gesamtheit abbilden kann und dabei auch Informationsflüsse und Steuerungsstrategien berücksichtigt. Im Vergleich zu analytisch-mathematischen Methoden ist sie oft besser geeignet, die Fähigkeit der zu projektierenden Produktions- oder Logistiksysteme virtuell nachzuweisen sowie Planungen und deren Umsetzungen abzusichern. Sie ist zudem einerseits das Bindeglied zwischen Entwurfsphasen, wie beispielsweise die 2D-Layoutplanung und Entscheidungsphasen, andererseits ermöglicht sie es, Ergebnisse aus vorangehenden simulativen Untersuchungen, wie beispielsweise Taktzeituntersuchungen von Roboterzellen mittels Kinematiksimulation, zu einer kompletten Anlage zu verknüpfen. Die Materialflusssimulation stellt somit eine der Grundsäulen innerhalb der Digitalen Fabrik dar.



**Bild 4-3:** Einsatzpotential der Materialflusssimulation im Zuge der Digitalen Fabrik

Die Einsatzpotentiale der Materialflusssimulation innerhalb der Digitalen Fabrik sind wiederum sehr vielfältig. Die in Bild 4-3 dargestellte Matrix gibt einen Überblick der möglichen Konstellationen. So sind horizontal die möglichen physischen Umfänge und vertikal die sequentiellen Zustände der zu analysierenden Systeme dargestellt.

Der Begriff des Systemumfangs „Linien“ ist hier nicht mit der Produktionsstrategie der Linienfertigung zu verwechseln. Der Systemumfang beschreibt vielmehr die Fokussierung auf ein in sich abgeschlossenes System innerhalb eines gesamten Produktionssystems. Beispielsweise kann hier ein verkettetes Montagesystem angeführt werden,

dessen einzelne Montagezellen mit rundum laufenden Transferbändern verknüpft sind. Weisen die einzelnen Montagezellen ebenfalls komplexere Strukturen auf und bestehen sie wiederum aus verknüpften Materialflussobjekten, wie Transportbänder, Puffer oder Handhabungseinheiten, so können diese ebenfalls unter dem Systemumfang *Linien* eingeordnet werden. Das gesamte Montagesystem könnte dann als *Anlage* gesehen werden.

Denn *Anlagen* bestehen aus der Kombination mehrerer *Linien* und betrachten das Zusammenwirken einzelner in sich abgeschlossener Systeme. Hier können beispielsweise auch die Auswirkungen auf den Versand analysiert werden, dessen Aufgabe das Kommissionieren und Verpacken der Erzeugnisse mehrerer Fertigungs- bzw. Montagesysteme beinhaltet. Die Betrachtung kann sich hier beispielsweise auf die Gesamtausbringung der kompletten Anlage oder auch auf die Bereitstellung und Dimensionierung von Bereitstellungslagern fokussieren.

Unter den Begriffen *Logistik* bzw. *Supply Chain (SC)* ist eine weitere und auch höhere Betrachtungsebene zu sehen. Ziel ist es hier, logistische Prozesse in und zwischen in sich abgeschlossenen Anlagen abzubilden und zu analysieren. Der Fokus liegt hier auf den Materialfluss- aber auch Informationsflussprozessen wie sie beispielsweise zwischen *Beschaffung*, *Produktion* und *Distribution* herrschen. Bei dieser Systembetrachtung sind die Prozesse oder auch Bestell- und Anlieferstrategien der Zulieferer und der Kunden mit einbezogen. Für weiterführende Informationen zur *Supply Chain Simulation* sei auf den Abschnitt 2.3.5 verwiesen.

Unter *Planung* ist hier vor allem die Neuplanung zu verstehen. Diese kann sich laut der aufgestellten Matrix sowohl auf Linien, Anlagen als auch der Logistik / SC beziehen. Hier werden meist physisch noch nicht existierende Planungen bewertet. Beispielsweise kann dies die Planung neuer Montagesysteme, neuer Produktionshallen oder neuer Versandabläufe betreffen. Motivation für neue Planungen sind vor allem die Herstellung neuer Produkte, aber auch die Erweiterung oder Verlagerung bestehender Produktionen. Auch sind Umplanungen von Produktionssystemen hier mit einzuschließen.

Bei der *Realisierung* handelt es sich meist um die Absicherung eines Systems, das bereits in Betrieb ist, aber noch nicht seine geplante Ausbaustufe erreicht hat. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn Investitionen erst dann getätigt werden, wenn diese auch benötigt werden. So kann es möglich sein, dass der Materialtransport zwischen einzelnen Maschinen in der Endausbaustufe mit automatisierten Transporteinrichtungen vorgesehen ist, aber anfänglich aufgrund eines geringeren Transportvolumens manuell durchgeführt wird. Die Simulation kann die Auswirkung der sich daraus ergebenden Transportzeiten auf das Produktionssystem analysieren.

Die Simulation von Produktions- und Logistiksystemen kann allerdings nicht nur während der Planungs- und Realisierungsphase eingesetzt werden, sondern auch während des laufenden Betriebs. Bei der sogenannten betriebsbegleitenden bzw. Leitstandssimulation werden beim Auftreten einer Störung mit Hilfe der Simulation eingehende Systemanalysen durchgeführt, um aufgrund der daraus entstehenden Diagnosen und Symptome eine Ableitung notwendiger Maßnahmen zur Störungsbehebung zu ermöglichen. [124] [29]

## 4.2 Ein Vorgehensmodell zur Durchführung von Simulationsstudien

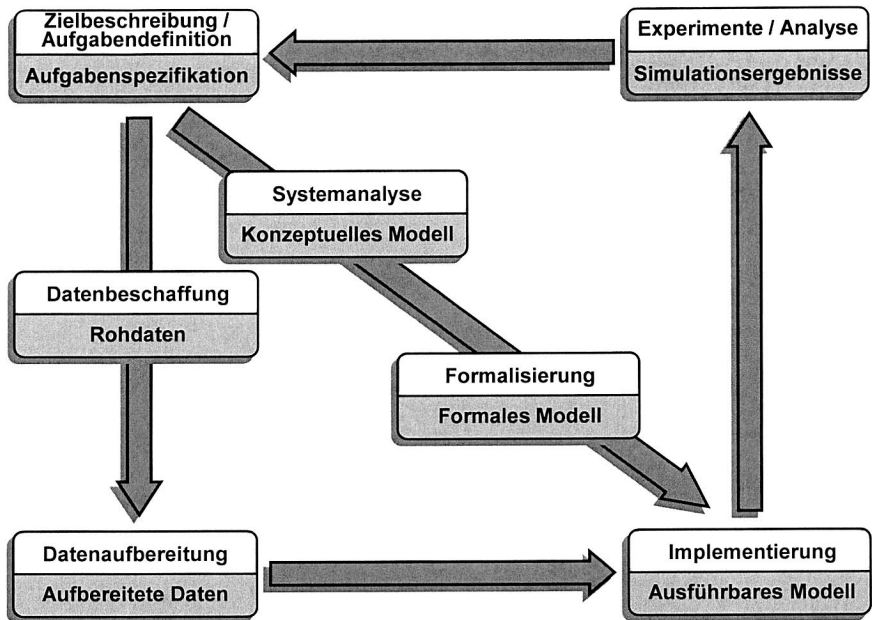
Simulationsstudien sind Projekte, die der Systemanalyse dienen. Sie sichern somit geplante oder existierende Produktions- und Logistiksysteme ab. Prinzipiell lassen sich Simulationsstudien in die drei Abschnitte *Vorbereitung*, *Durchführung* und *Auswertung* unterteilen, die bei der Modellierung und der Modellnutzung wiederholt durchlaufen werden können. Zudem umfasst eine Simulationsstudie mehrere Experimente, die ihrerseits aus mehreren Simulationsläufen bestehen können. [Banks]

Die VDI-Richtlinie 3633 definiert einen Simulationslauf als *die Nachbildung des Verhaltens eines Systems mit einem spezifizierten ablauffähigen Modell über einen bestimmten (Modell-) Zeitraum, auch Simulationszeit genannt, wobei gleichzeitig die Werte untersuchungsrelevanter Zustandsgrößen erfasst und ggf. statistisch ausgewertet werden*. [113]

Somit wird bei einem Simulationslauf das Modell genau einmal über einen bestimmten Zeitraum ausgeführt. Die Definition beinhaltet weiter, dass für Aussagen über die statistische Sicherheit von Simulationsergebnissen ein Simulationslauf mit den gleichen Daten und Parametern, aber mit unterschiedlichen Startwerten zur Zufallszahlenerzeugung mehrfach wiederholt werden muss. Diese mehrfache Wiederholung wird als *Replikation* verstanden. Gemäß der VDI-Richtlinie bildet somit eine Reihe von Läufen mit unterschiedlichen Parametern ein *Experiment*. [113]

Zur strukturierten Durchführung von Simulationsstudien bedarf es eines Vorgehensmodells. Das hier vorgestellte lehnt sich an grundsätzliche Elemente des Vorgehensmodells, das vom *Arbeitskreis Validierung von Simulationsmodellen* der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM) auf Basis der VDI-Richtlinie 3633 weiterentwickelt wurde, an.

Die Besonderheiten des vorgestellten Vorgehensmodells liegen einerseits in der Einführung von Phasenergebnissen und andererseits in der gesonderten Behandlung von Modell und Daten (vgl. Bild 4-4). [82]



**Bild 4-4:** Iterativer Prozess bei der Durchführung von Simulationsstudien

Ausgehend von einer Zielbeschreibung beinhaltet eine Simulationsdurchführung die Phasen Aufgabendefinition mit dem Phaseergebnis der Aufgabenspezifikation. Da das zu untersuchende System sowohl real existierend sein als auch sich erst in Planung befinden kann, wird dieses zunächst in eine Beschreibung transformiert, die Teil der Aufgabenspezifikation ist. Somit entsteht mit der Aufgabenspezifikation bereits ein erstes Modell. Die darauf folgenden Phasen sind die Systemanalyse mit dem konzeptuellen Modell als Phaseergebnis, die Formalisierung mit dem formalen Modell als Phaseergebnis, die Implementierung mit dem ausführbaren Modell als Phaseergebnis sowie die anschließende Experimentierung aus der die Simulationsergebnisse entstehen.

Die Phaseergebnisse können Modelle und Dokumente oder eine Kombination von beiden sein. Die Phasen „Datenbeschaffung“ und „Datenaufbereitung“ mit den Phaseergebnissen „Rohdaten“ und „Aufbereitete Daten“ sind inhaltlich und zeitlich prinzipiell unabhängig von der Modellierung und können somit separat erfolgen. Das Vorgehensmodell sagt allerdings aus, dass die Datenbeschaffung die Aufgabenspezifikation nutzt und die Datenaufbereitung Rohdaten voraussetzt. Weiterhin besagt das Vorge-

hensmodell, dass die aufgearbeiteten Daten zur Nutzung des ausführbaren Modells vorliegen müssen.

Im Folgenden soll ein Überblick gegeben werden, welches Ziel die einzelnen Phasen verfolgen und was die Phasenergebnisse prinzipiell beinhalten. Hierzu wird für ein einheitliches Begriffsverständnis zunächst auf die Begriffe *System* und *Modell* näher eingegangen. Für weiterführende Fragen zum Vorgehensmodell sei auf [82] und [121] verwiesen.

#### 4.2.1 Systembegriff

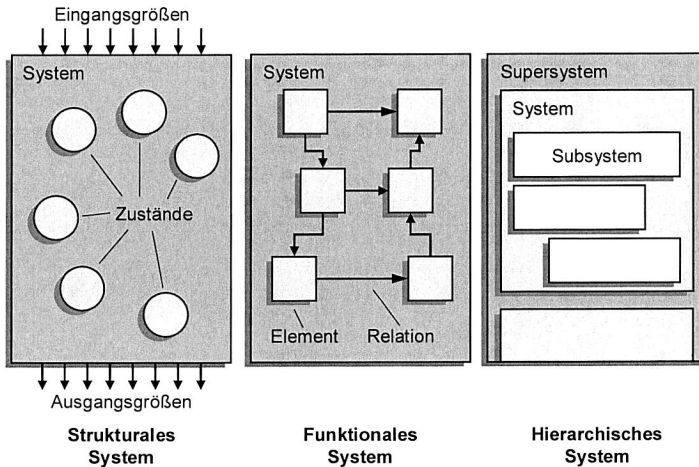
Nach der Definition des Begriffs „Simulation“ im vorhergehenden Abschnitt nimmt der Begriff des „Systems“ eine zentrale Rolle ein. Aus der allgemeinen Systemtheorie folgend umfasst der Systembegriff drei unterschiedliche Gesichtspunkte. Diese spiegeln sich in den drei Systemkonzepten der Strukturiertheit, der Funktionalität und der Hierarchisierung wider (vgl. Bild 4-5). [88]

Das *strukturelle Systemkonzept* betrachtet ein System als ein durch Zusammenstellung entstandenes Ganzes durch die Verknüpfung von Objekten. Das heißt, dass ein System aus einer Menge an Objekten besteht, die direkt oder über Drittobjekte in Relation stehen, so dass durch die hierdurch beschriebene Aufbaustruktur ein Prozess ablaufen kann. Im Fokus liegen hier unterschiedliche Systemeigenschaften, die aufgrund der potenziellen Vielzahl an Beziehungsgeflechten bei konstanter Anzahl an Elementen entstehen können. Die hierzu benötigte Ablaufstruktur kann durch spezifische Vorschriften und konstante oder variable Attribute beschrieben werden [60]. Weiterhin kommt auch die Beschaffenheit der Elemente zum Tragen, inwieweit sich diese in ein System einbinden lassen. Grundsätzlich verfolgt dieses Konzept den Ansatz, dass einzelne Systemteile nicht losgelöst, sondern immer in Relation zum Gesamtsystem zu betrachten sind, das gegenüber seiner Umwelt abgegrenzt ist. [88] [41] [113]

Das *Konzept der Funktionalität* stellt ein System mit Hilfe eines sogenannten Black-Box-Modells dar. Dies kommt dann zum Vorschein, wenn die innere Systemstruktur, etwa bei hochkomplexen Systemen, nur sehr schwierig oder gar nicht zu erkennen ist. Dies bedeutet, dass bestimmte Zusammenhänge innerhalb des Systems oder das Systemverhalten selbst nur von außen zu beobachten sind. Eine Systembeschreibung erfolgt durch die Zustände der Ausgangsgrößen in Abhängigkeit der Eingangsgrößen und kann durch eine Transformationsfunktion dargestellt werden. Die Systemgrenzen bilden die Schnittstellen des Systems zu seiner Umwelt und legen somit auch die Schnittstellen, über die die Ein- und Ausgangsgrößen ausgetauscht werden, fest. Eingangsgrößen stellen hierbei die Einwirkungen der Umwelt bzw. die eines anderen an-

gekoppelten Systems auf das betrachtete System dar. Umgekehrt wirkt das betrachtete System über seine Ausgangsgrößen auf seine Umwelt bzw. andere Systeme ein. Das funktionale Konzept beschränkt sich somit auf das Systemverhalten in seiner Umwelt. Fragen in Bezug auf das zu betrachtende System richten sich somit nicht nach der Systemtopologie, sondern nach der Verhaltensweise des Systems. [88] [60]

Das dritte Konzept beruht darauf, dass ein System hierarchischen Charakter besitzt. Das bedeutet, dass ein System in Subsysteme unterteilt werden kann und selbst Teil eines Supersystems ist. Als kleinste, nicht weiter zerlegbare Komponente wird das Systemelement angesehen. Hiermit ist es je nach Interesse möglich, eine detaillierte oder umfassende Systembetrachtung durchzuführen. Bewegt man sich in der Hierarchie abwärts, so erhält man eine genauere Systemerklärung, bewegt man sich hingegen innerhalb der Hierarchie aufwärts, so erlangt man eine tiefere Erkenntnis über die Systemgesamtheit. [88]



**Bild 4-5:** Konzepte der Systemtheorie

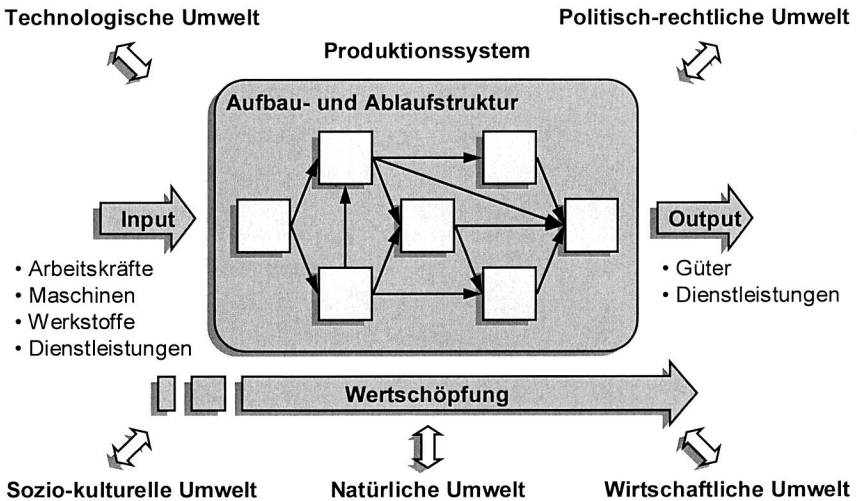
Hinzuzufügen ist, dass sich die drei Konzepte nicht gegenseitig ausschließen. Vielmehr ist für eine geeignete Systembetrachtung eine Kombination der drei Sichtweisen für sinnvoll zu erachten.

Einen spezifischen Systemtyp stellt ein Produktionssystem dar, das als sozio-technisches System definiert werden kann. Das Ziel eines Produktionssystems liegt in der wirtschaftlichen Herstellung von Produkten durch den Einsatz von Ressourcen, Material und Energie. Folglich ist die Produktion selbst ein Wertschöpfungsprozess, der aus Gütern höherwertigere erstellt. Das heißt, dass Ausbringungsgüter aus mate-



riellen und nichtmateriellen Einsatzgütern nach bestimmten technischen Verfahren erzeugt werden. Je nach Festlegung der Systemgrenzen kann sowohl die innerbetriebliche, also auch die standort- und unternehmensübergreifende Logistik Teil des betrachteten System sein.

Die Integration eines Produktionssystems in seine Umwelt verdeutlicht Bild 4-6. [40] [123]



**Bild 4-6:** Einbettung eines Produktionssystems in seine Umwelt

Die Logistik als solches kann wiederum in makro-, meta- und mikrologistische Systeme unterteilt werden. Makrologistischen Systeme sind beispielsweise Verkehrsnetze, wie Straßen-, Schienen- oder Wasserverkehrsnetze, auf die in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen werden soll.

Meta- und mikrologistische Systeme stellen unternehmensübergreifende und innerbetriebliche (Sub-)Systeme dar. Dabei fokussieren sich die unternehmensübergreifenden auf Prozesse, die beispielsweise zwischen einem Lieferanten und seinen Kunden durch Verbindung weiterer logistischer Dienstleister stattfinden. Zu den unternehmens-internen Prozessen zählen alle Transport-, Lager- und Umschlagprozesse beispielsweise innerhalb der Bereiche Beschaffung, Produktion und Distribution stattfinden. Für weitere Ausführungen zu logistischen Systemen und Netzwerken sei auf das Kapitel 2 verwiesen.

Eine andere, hier nicht weiterverfolgte Betrachtungsweise logistischer Systeme klassifizieren diese in die Bereiche des Personenverkehrs, der Güterlogistik und der Übermittlung von Informationen bzw. der Kommunikation (IuK). [32]

Ein Produktions- oder auch Logistiksystem stellt ein dynamisches System dar, das nicht nur einem permanenten Änderungsprozess unterliegt, sondern auf unterschiedliche Einwirkungen unterschiedlich reagiert. Folgewidrige Systemzustände und ein unvorhersehbares Systemverhalten können die Folge sein. Der Gesamtzustand eines dynamischen Systems ist durch die Summe aller Zustandsgrößen definiert, die benötigt werden, eine vollständige Systembeschreibung zu jeder Zeit durchzuführen. Der große Vorteil der Simulation ist es, dass bei der Nachbildung eines Produktions- oder Logistiksystems diese unvorhersehbaren bzw. zufälligen Ereignisse mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsfunktionen integriert werden können. [98] [82] [60]

#### **4.2.2 Modellierung und Abstraktion**

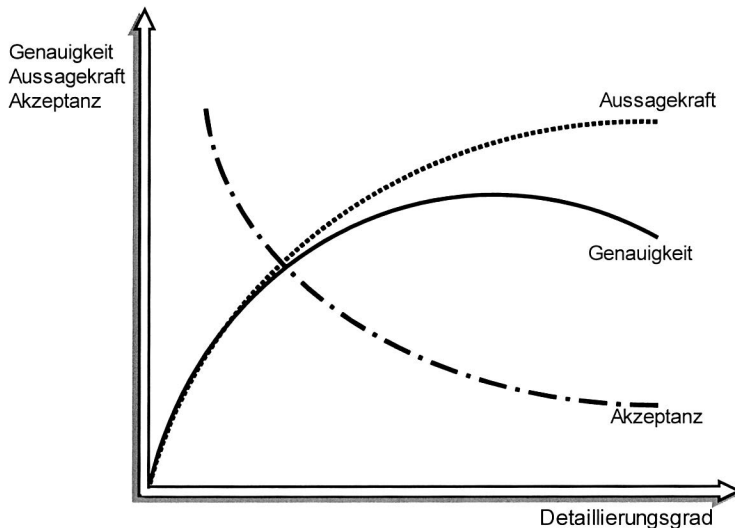
Einen weiteren zentralen Begriff in der Simulation stellt der Modellbegriff dar. Prinzipiell wird ein Modell immer dann benötigt, wenn zur Lösung eines definierten Problems die Experimentphase aus technischen und / oder organisatorischen Gründen am Original nicht durchführbar ist. Modelle lassen sich je nach Einsatzart, nach den zur Verfügung stehenden Informationen und nach dem Grad der Abstraktion unterscheiden. [97]

In Bezug auf die Simulation in Produktion und Logistik definiert die VDI-Richtlinie 3633 den Modellbegriff wie folgt:

*Ein Modell ist eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System. Es unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens vom Vorbild.* [113]

Im Rahmen der Planung bzw. Simulation von Produktions- und Logistiksystemen ist ein Modell also ein auf das wesentliche reduzierte Abbild eines Betrachtungsgegenstandes. Dies kann beispielsweise die modellhafte Darstellung einer bereits existierenden Montageanlage sein oder auch ein geplantes, noch nicht existierendes Distributionslager. Die Definition lässt weiterhin eine Ähnlichkeit des Modells zum abgebildeten System zu, solange der Grad der Vereinfachung nicht die Untersuchungsergebnisse in negativer Art und Weise beeinflusst.

Das heißt, die Kunst der Modellbildung liegt im Erreichen des richtigen Detaillierungsgrades. Bei der Modellierung ist ein abzubildendes System derart zu reduzieren, so dass auf Systemeigenschaften und -elemente verzichtet wird, deren Beachtung zur Lösung des Problems keine Rolle spielen. Bei der Abstraktion sind zudem unspezifische Systemkennzeichen zu verallgemeinern und nur das Wesentliche abzubilden. Wie bereits ausgeführt, kann eine unvollständige oder ungenaue Abbildung zu falschen Simulationsergebnissen führen. Im Genaueren heißt das, dass durch die Vernachlässigung von Zusammenhängen, die für den Untersuchungszweck eine wesentliche Rolle spielen, ein für die Aufgabenstellung nicht geeignetes Modell entsteht. Aus einem subjektiven Sicherheitsempfinden vermag es allerdings, dass detailreicher modelliert wird, als es zur Problemlösung notwendig ist [121]. Werden irrelevante Aspekte berücksichtigt oder unter Umständen zu detailliert abgebildet, so kann bei der Simulation der Nutzen durch eine Verminderung der Effizienz sowohl bei der Modellbildung als auch der Modellausführung sinken. Eine zu detaillierte Modellierung kann allerdings auch die Aussagekraft des Modellverhaltens vermindern und somit zwangsläufig zu einer möglichen Senkung der Akzeptanz führen. In beiden Fällen besteht die Gefahr, dass mit dem Simulationsmodell die Aufgabe nicht gelöst werden kann oder dass unzulässige Schlussfolgerungen abgeleitet werden (vgl. Bild 4-7). [65]



**Bild 4-7:** Beurteilungskriterien für die Modellqualität [65]

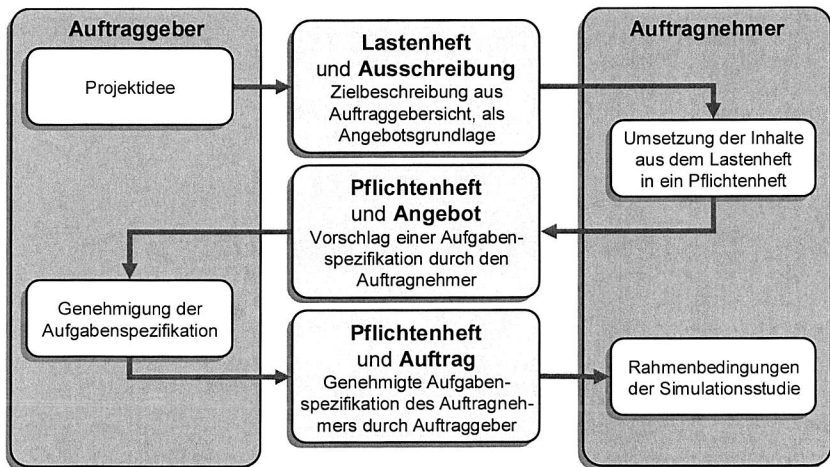
Zum generellen Prozess der Modellbildung bei der Simulation in Produktion und Logistik sei auf das Unterkapitel 4.2 verwiesen.

### 4.2.3 Phasenbeschreibung

#### Die Aufgabenspezifikation als Ergebnis der Zielbeschreibung und Aufgabendefinition

Ausgangspunkt einer jeden Simulationsstudie ist die Zielbeschreibung. Sie stellt je nach Untersuchungsumfang eine dementsprechend detaillierte Beschreibung des Untersuchungsgegenstandes und der zu beantwortenden Fragenstellungen dar. Ob die Zielbeschreibung bereits Teil einer Studie ist oder nicht, hängt davon ab, ob auf ihrer Basis erst entschieden wird, ob die Simulation das geeignete Werkzeug zur Lösungsfindung ist. Aus der Zielbeschreibung entsteht durch den Prozess der Aufgabendefinition, die Aufgabenspezifikation. Das Vorgehen kann analog zur allgemeinen Auftragsvergabeprozedur (Erstellung von Lasten- und Pflichtenheft) betrachtet werden.

Ausgehend von der Projektidee entspricht die Zielbeschreibung somit dem vom Produktionssystemverantwortlichen (im Folgenden auch Auftraggeber genannt) erzeugten Lastenheft. Der Simulationsexperte (im Folgenden auch Auftragnehmer genannt) präzisiert und vervollständigt innerhalb der Aufgabendefinition die entwickelte Zielbeschreibung derart, sodass ein Pflichtenheft bzw. die Aufgabenspezifikation entsteht. Eine Prüfung dieses Pflichtenheftes durch den Auftraggeber stellt dann sicher, dass eine von Auftraggeber und Auftragnehmer gemeinsam verstandene und getragene detaillierte Beschreibung der Aufgabe vorliegt (vgl. Bild 4-8). Somit liegt das Phasenergebnis der Aufgabenspezifikation vor.



**Bild 4-8:** Prozess zur Erstellung von Lasten- und Pflichtenheft als Grundlage zur Durchführung einer Simulationsstudie

Die Aufgabenspezifikation beschreibt demnach die nach Meinung aller an der Studie beteiligten Personen die zu lösende Aufgabe und klärt, ob diese Aufgabe zugleich mit den vorgesehenen Mitteln und im vorgesehenen Zeit- und Kostenrahmen umsetzbar ist. Sie sollte inhaltlich die Zielbeschreibung und Aufgabenstellung, die Beschreibung des zu untersuchenden Systems, notwendige Informationen und Daten, die geplante Modellnutzung, den Lösungsweg und die –methode sowie die Anforderungen an Modell und Modellbildung beinhalten. [82]

### **Das konzeptuelle Modell als Ergebnis der Systemanalyse**

Das konzeptuelle Modell (auch Konzeptmodell, konzeptionelles Modell oder gedachtes Modell) dient der Beschreibung des abzubildenden Systems und ist das Ergebnis der Systemanalyse. Ihr übergeordnetes Ziel ist die Überprüfung und Entscheidung darüber, welche Elemente und Einflüsse des abzubildenden Systems für das Untersuchungsziel relevant sind und mit welchem Detaillierungsgrad und welchen Abläufen diese zu modellieren sind. Das konzeptuelle Modell konkretisiert die in der Aufgabenspezifikation aufgestellten Systemzusammenhänge, legt den Grundstock für die weiteren Modellierungsschritte und bildet die Voraussetzungen für eine an den definierten Zielen orientierte Studie. Die Beschreibung des konzeptuellen Modells ist nicht zwingend formal. Typische Darstellungen sind semiformal oder deskriptiv, wie Blockschaltbilder, Flussdiagramme oder Netzpläne, die mit einer textuellen Beschreibung ergänzt sind. Da die Systemanalyse ebenfalls eine gemeinsame Aufgabe von Auftraggeber und Simulationsexperten ist, muss auch das konzeptuelle Modell als Ergebnis das gemeinsame Verständnis aller am Projekt beteiligten Partner widerspiegeln. Das konzeptuelle Modell muss alle Informationen, Erkenntnisse und Modellierungen der Aufgabenspezifikation beinhalten und die Modellstrukturen erläutern bzw. graphisch darstellen. Das konzeptuelle Modell beinhaltet aber keine Informationen, wie es als ausführbares Modell in einem *Softwaretool* oder einer spezifischen Simulationssprache umzusetzen ist. Es wird hier von einer simulatorunabhängigen Modellbeschreibung gesprochen, auch wenn dies wohl in der Praxis nicht immer eingehalten wird. Insbesondere beinhaltet das konzeptuelle Modell die Struktur- und Funktionsbeschreibung, die Festlegung der zu modellierenden Systemvarianten sowie die Festlegung der zu variierenden Parameter. Die Struktur- und Funktionsbeschreibung beinhaltet wiederum die festgelegten Systemgrenzen und Schnittstellen zur Umwelt, die Identifizierung von Teilsystemen und Systemkomponenten, die Beschreibung der Relationen zwischen den Komponenten, die Abbildung interner Systemzustände, die Definition der Systemgrößen, wie Ein- und Ausgabegrößen sowie die Aufstellung zu erfassender Informationen und Daten. Das konzeptuelle Modell bildet den Übergang von der Aufgaben- hin zur Lösungsbeschreibung. Es beschreibt also sowohl den Modellumfang als auch die

zur Aufgabenlösung erforderlichen Detaillierung bzw. Abstraktion. [82] [86] [87] [118] [121]

### **Das formale Modell als Ergebnis der Formalisierung**

Durch den Prozess der Formalisierung entsteht aus dem konzeptuellen das formale Modell. Die wichtigste Aufgabe dabei ist die Gewährleistung der Implementierfähigkeit der Abläufe, die bei der Systemanalyse eher aus fachlicher Sicht ermittelt wurden. Des Weiteren gilt es, bei der Formalisierung die stochastischen Komponenten und Größen sicherzustellen und zu identifizieren. [77] [121]

Die Formalisierung ist daher mit eine der schwierigsten Phasen innerhalb des gesamten Modellierungsprozesses, da das formale Modell alle für die anschließende Implementierung notwendigen Informationen, wie Aufbau- und Ablaufstrukturen sowie die Datenspezifikationen enthalten muss. Diese müssen nicht nur vollständig, sondern auch präzise und eindeutig formuliert sein. Genauso wie beim konzeptuellen Modell ist auch beim formalen Modell grundsätzlich die Simulatorunabhängigkeit gefordert. Allerdings muss sichergestellt werden, dass eine Implementierung auf Basis des formalen Modells durch einen Simulationsexperten, der im Extremfall bei der bisherigen Modellierung nicht integriert war, ohne Einbeziehung eines System- oder Fachexperten möglich ist. [121].

Auch wenn oftmals in der Literatur beim Modellentstehungsprozess die Formalisierung nicht als eigener Schritt vorgesehen ist [5] [86], und in der Praxis, je nach Umfang des abzubildenden Systems eine Formalisierung bereits im konzeptuellen Modell berücksichtigt wird, darf die nicht immer eindeutige Abgrenzung zwischen konzeptuellen, formalem und ausführbarem Modell zum Anlass dienen, auf den Formalisierungsschritt zu verzichten. Liegen bereits bestimmte Teile des konzeptuellen Modells semiformal vor, ist dann der Formalisierungsgrad beim formalen Modell für die anschließende Implementierung zu erhöhen. [82]

Beschreibungsmittel dienen der Abbildung nichttrivialer Verhaltensmuster. Dies können etwa zu erstellende komplexe Algorithmen oder umfangreiche Datenstrukturen sein. Zu den gängigen Beschreibungsmitteln zählen u. a. Pseudo-Codes, Struktogramme, *Entity-Relationship-Diagramme* (ER) oder auch die *Unified Modeling Language* (UML). [47]

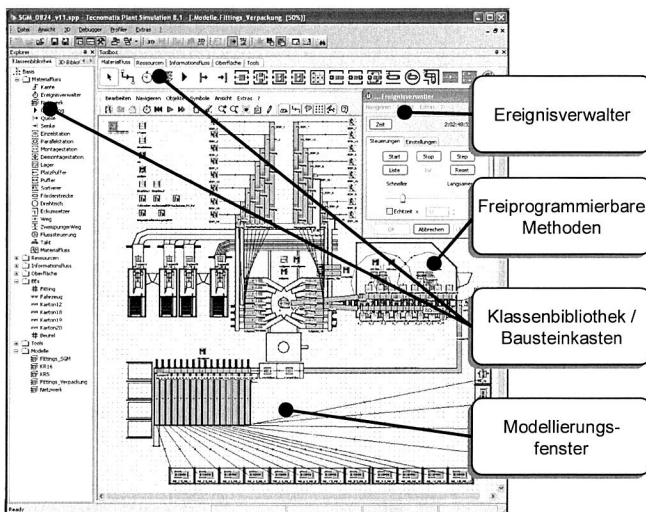
### **Das ausführbare Modell als Ergebnis der Implementierung**

Das primäre Ziel der gesamten Modellierungsphase innerhalb einer Simulationsstudie ist die Erstellung eines lauffähigen und experimentierfähigen Simulationsmodells, also das ausführbare Modell als Ergebnis der Implementierung. Das Phasenergebnis um-

fasst somit alle während der Implementierung erzeugten Teilergebnisse, Simulationsmodelle und verwendeten Daten. Synonym werden hierfür auch die Bezeichnungen Simulationsmodell oder auch Computermmodell verwendet. [121] [82]

Die Implementierung erfolgt auf Basis des formalen Modells. Es handelt sich bei ihr meist nicht um eine Softwareentwicklung in einer höheren Programmiersprache, vielmehr erfolgt die Modellierung in einer Simulationsumgebung. Durch die Simulatorunabhängigkeit des formalen Modells, ist dieses in der Implementierungsphase zunächst so anzupassen, dass eine Abbildung in der gewählten Simulationsumgebung möglich ist. Daraufhin erfolgt die eigentliche Umsetzung. [86] [82]

Um die Simulation einen weiten Anwenderkreis zugänglich zu machen, sind kommerzielle Simulationsumgebungen oft um eine hohe Anwender- bzw. Benutzerfreundlichkeit bestrebt. So können je nach Simulationsumgebung und das damit verbundene Modellierungskonzept, Bausteinkästen mit vordefinierten Objekten zum Einsatz kommen (vgl. Bild 4-9).



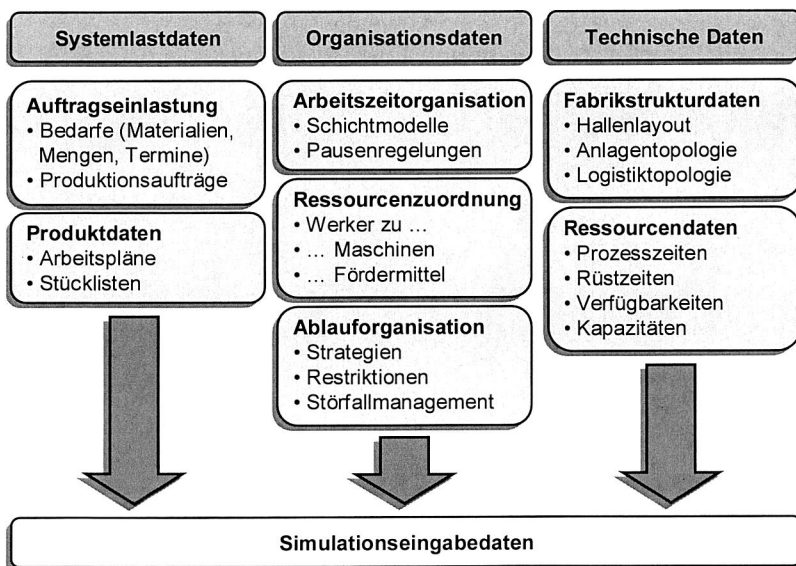
**Bild 4-9:** Modellierung in einer kommerziellen Simulationsumgebung. Realisiert mit Tecnomatix Plant Simulation 8.1 der Siemens AG

Durch das Verwenden der bereitgestellten Basisbausteine können durch deren Kombination komplexe Sachverhalte abgebildet werden. Oft sind die Simulationswerkzeuge zusätzlich mit einer meist simulatorspezifischen Skriptsprache ausgerüstet, so dass eine bis zu einem bestimmten Grad erforderliche Flexibilität bei der Modellierung gewahrt bleibt.

## Die Eingabedaten als Ergebnis der Datenbeschaffung und –aufbereitung

Im hier vorgestellten Vorgehensmodell zur Durchführung von Simulationsstudien und -projekten erfolgen bezüglich der Daten zwei Phasen, nämlich die Phase der Datenbeschaffung und die der Datenaufbereitung. Dies entsteht dadurch, dass für die Datenbeschaffung in aller Regel die Fachexperten des geplanten oder realen System und für die Datenaufbereitung die Simulationsfachleute sich verantwortlich zeigen. Durch die Datenbeschaffung werden Daten zur Verwendung in der Simulation bereitgestellt. Die Art und der Umfang der durch die Datenbeschaffung zu erzeugenden Rohdaten sind aus der Aufgabenspezifikation oder auch dem konzeptuellen Modell zu entnehmen. Datenquellen sind hier beispielsweise protokollierte Produktionsdaten aus der Betriebsdatenerfassung oder auch Planungsdaten [82].

Bild 4-10 zeigt einen Überblick simulationsrelevanter Daten. Dabei sind Daten grundsätzlich in die drei Kategorien *Systemlastdaten*, *Organisationsdaten* und *Technische Daten* aufteilbar. Daten zur Beschreibung der Systemlast sind beispielsweise die Auftragseinlastung oder der prognostizierte Jahresbedarf an herzustellenden Produkten. Technische Daten, wie Ressourcendaten dienen der Beschreibung der Zustandsänderungen des Systems. Fabrikstrukturdaten dienen hingegen zur Beschreibung der Topologie und der Aufbaustruktur des Systems.



**Bild 4-10:** Relevante Systemdaten zur Durchführung von Simulationsstudien



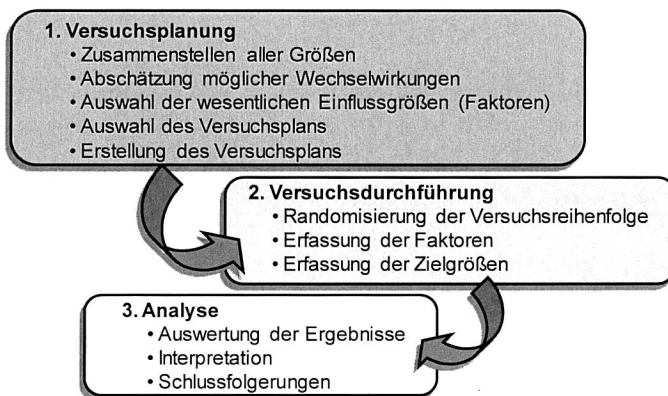
Die durch die Datenbeschaffung erfassten Daten sind meist noch einmal auf Vollständigkeit und Konsistenz zu überprüfen und unter Umständen mit einer zusätzlichen Erhebung zu ergänzen und zu korrigieren [113].

Ist die spätere Datenverwendung im Simulationsmodell für die Datenbeschaffung noch von geringer Bedeutung, ist es Ziel der Datenaufbereitung die bereitstehenden Rohdaten so aufzubereiten, dass diese für das ausführbare Modell und für die Experimentierung nutzbar sind.

Dies kann beispielsweise durch Extrahierung, Transformation oder durch Erzeugung statistischer Verteilungen geschehen. Bei der Extrahierung werden aus den meist umfangreichen Rohdaten die herausgefiltert, die für die Simulation letztendlich relevant sind. Bei der Transformation sind bestehende Datenstrukturen der Rohdaten so zu wandeln, dass diese den modellierten Strukturen entsprechen. Bei der Erzeugung statistischer Verteilungen werden aus den aufgezeichneten Daten, wie zum Beispiel protokollierte Maschinenausfälle, statistische Verteilung abgeleitet, so dass auf dieser Grundlage in der Simulation Störungen zufällig generiert werden können.

### Die Simulationsergebnisse als Ergebnis der Experimentierung

Der Nutzen, der aus der Simulation gezogen werden kann, entsteht aus den Simulationsergebnissen, die bei der Durchführung von Simulationsexperimenten entstehen. Voraussetzung hierfür ist, dass sowohl die erhobenen und aufbereiteten Simulationseingabedaten als auch das ausführbare Modell zur Verfügung stehen. Die Durchführung der Experimente umfasst mehrere iterative Schritte. Bild 4-11 zeigt die einzelnen Phasen einer allgemeingültigen, aber simulationsexperimentrelevanten Versuchsdurchführung auf.



**Bild 4-11:** Dreiphasiges Vorgehensmodell in der Versuchsmethodik

Zunächst gilt es, die Experimentpläne festzulegen. Hierfür sind eine Zusammenstellung aller relevanten Größen und eine Auswahl wesentlicher Einflussgrößen zu treffen. Ebenso sind innerhalb dieses Schrittes bereits Hypothesen über das Verhalten des zu untersuchenden Systems aufzustellen und mögliche Wechselwirkungen der Einflussgrößen abzuschätzen. Hiernach kann eine gerichtete Auswahl des Versuchsplans stattfinden und ein konkreter Plan erstellt werden. Der Versuchsplan ist gemeinsam durch die Simulationsexperten und Systemspezialisten zu erstellen.

In einen zweiten Schritt erfolgt die Experimentierung. Die Ergebnisse sind hierbei geordnet und in Zusammenhang mit der Experimentbeschreibung abzulegen. Meist erfolgen die Experimentdurchführung und auch die entsprechende Dokumentation durch die Simulationsexperten.

Der dritten Schritt - Die Analyse der Ergebnisse - erfolgt unter Berücksichtigung der erwarteten Abhängigkeiten der Ergebnisse von den Parametern und der getätigten Hypothesen. Die Analyse wird ebenfalls meist von den Simulationsfachleuten vorgenommen.

Die Einbindung der Systemexperten respektive Auftraggeber erfolgt dann bei der Ableitung von Schlussfolgerungen für das reale System. Hier werden dann Empfehlungen zur Verbesserung des Systems im Sinne der Zielbeschreibung erarbeitet. Erkenntnisse aus den Simulationsergebnissen können zu weiteren Fragestellungen führen, was entweder zu einer Erweiterung des Experimentplans führt oder aber auch zu einer veränderten Zielbeschreibung und damit zu einer gravierenden Modelländerung, was im Extremfall wiederum zu einer erneuten Durchführung der gesamten Simulationsstudie führen kann.

### 4.3 Vision neuer digitaler Planungswelten

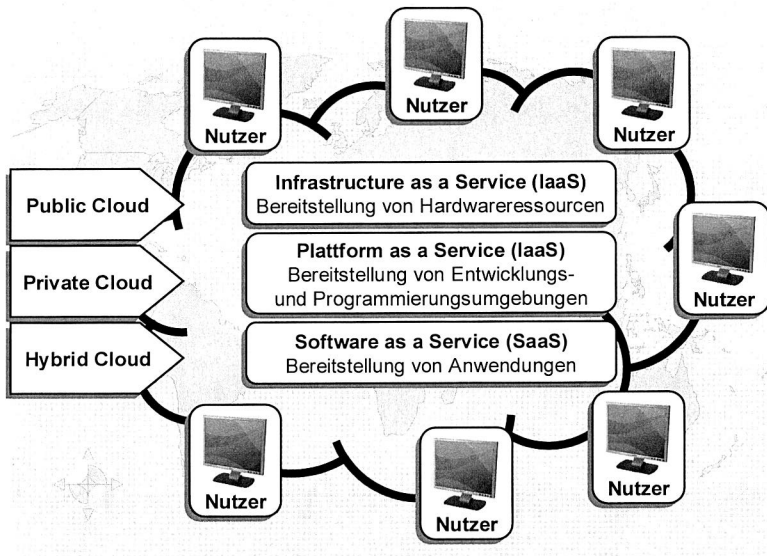
Die Planung moderner Produktions- und Logistiksysteme bedarf neuer Planungsmethoden wie die beispielsweise die der *Digitale Fabrik*. Neue Methoden bringen aber meist auch neue Herausforderungen mit sich. So sind digitale Hilfsmittel sehr effizient bei der Findung von Lösungen, im Gegenzug sind aber meist komplex und auf Anhieb nicht leicht zu bedienen. Außerdem entstehen ebenso immer höhere Anforderungen an die benötigten Hardwareressourcen durch eine temporär benötigte hohe Rechenleistung. Die Kombination moderner Strategien der Informationstechnologie (IT), wie das Cloud Computing und web 2.0-Technologien, können hier eine weitere Effizienzsteigerung bei der Verwendung digitaler Werkzeuge bei der Planung in der Produktion und der Logistik bringen. Es kann dadurch ein offenes und selbstwachsendes web-Portal zur Planung und Simulation von Produktions- und Logistiknetzwerken entste-

hen. Speziell die Anwendung der Materialflusssimulation ist prädestiniert für eine web-basierte Anwendung, da hier nicht nur Kostenpotenziale gehoben sondern auch ein effizientes kollaboratives und im Sinne der Digitalen Fabrik paralleles Arbeiten ermöglicht wird. Dies führt unter anderem auch dazu, dass die Simulation in Unternehmen weiter verbreitet und die Hemmschwelle ihres Einsatzes gesenkt wird. Im Folgenden wird deshalb eine Vision skizziert, wie mit Hilfe dieser modernen IT-Technologien die zukünftige Planungswelt aussehen kann.

#### **4.3.1 Planen und Simulieren in der Cloud**

Cloud Computing wird sowohl in der wissenschaftlichen als auch praxisorientierten Informations- und Kommunikationswelt als neuartige Technologie gesehen, die die bisherige IT-Landschaft grundlegend und nachhaltig verändern wird. Sie ist mit hohem Potential behaftet und birgt vielversprechende Ideen in der Geschäftswelt. Laut der BITKOM, erhöht Cloud Computing die Effizienz der IT-Anwender und steigert somit in Folge ihre internationale Wettbewerbsfähigkeit. Cloud Computing zählt als der wichtigste Trend in der IT-Branche, was sich schon dadurch zeigt, dass es das Leitthema der CeBit 2011 ist. [21]

Auch wenn sich die Wissenschaft und die Forschungs- und Entwicklungsbereiche der IT-Konzerne stark damit auseinandersetzen, ist aus der Literatur, aufgrund der noch jungen Technologie, bisher keine einheitliche und standardisierte Definition ersichtlich. Einigkeit besteht darin, dass es sich beim Cloud Computing um die Virtualisierung physischer IT-Strukturen und der Bereitstellung von Dienstleistungen mit Hilfe von Internettechnologien handelt. Weiterhin sollen die so verfügbaren Dienste dynamisch, skalierbar und multi-mandantenfähig sein. Sie sollen also auf Abruf und je nach Bedarf verfügbar sein. Skalierbar bedeutet insbesondere, dass bei Bedarf zusätzliche Ressourcen zugeschaltet werden können, wenn eine Anwendung dies augenblicklich benötigt. Andererseits werden aber auch immer nur die aktuell benötigten Ressourcen zur Verfügung gestellt und somit auch verrechnet. Wenn also nichts gerechnet wird, entstehen auch keine Kosten.



**Bild 4-12:** Cloud Computing und die entsprechenden Anwendungsschichten

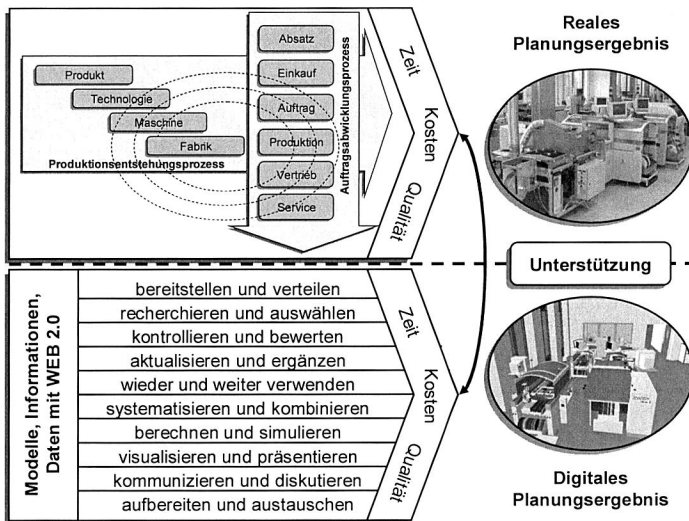
Die Literatur ist sich zudem einig, dass es sich beim Cloud Computing um die Bereitstellung und Nutzung von IT-Infrastruktur (*Infrastructure as a Service – IaaS*), IT-Entwicklungsumgebungen (*Platform as a Service – PaaS*) und Software-Anwendungen handelt (*Software as a Service – SaaS*), die über das Internet bzw. Intranet bereitgestellt werden (vgl. Bild 4-12). Die so virtualisierten Dienste werden dabei von einem unternehmensinternen oder -externen Anbieter einem Kunden bereitgestellt, der dann nur für den tatsächlich durch die Zeit der Nutzung entstandenen Aufwand aufkommt. Aber es können auch Nutzer von Diensten und Angeboten aus der Cloud wiederum ihre eigenen Dienste oder Entwicklungsergebnisse im Internet oder Intranet zur Verfügung stellen. Bezogen auf die Simulation können dies beispielsweise vordefinierte Modelle bzw. Modellierungsbausteine sein. [7] [9] [35]

#### 4.3.2 Social Media in Organisationen - Potenziale bei Planung und Simulation in Produktion und Logistik

Eng verbunden mit dem Cloud Computing ist der Begriff des Web 2.0. Diese stellt zunächst den aktuellen Evolutionsstand des Internets dar, das sich von einem reinen Informationsnetz zu einem Netzwerk der Partizipation und Kommunikation gewandelt hat. Partizipation bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der einzelne Internetnut-

zer nicht mehr nur Informationskonsument ist, sondern auch gleichzeitig über soziale Anwendungen Informationen produziert bzw. zur Verfügung stellt. In den so entstehenden sozialen Netzwerken und Online-Communities wächst eine kollektive Intelligenz ungeahnten Ausmaßes heran. Gefördert wird dies unter anderem durch das Anbieten webbasierter Anwendungen, die Bündelung von Daten oder auch offenen Schnittstellen, die von den Internetnutzern dazu verwendet werden können, aktiv Inhalte beizusteuern. Hierdurch wird die Interoperabilität sichergestellt, die ein kollaboratives Arbeiten räumlich und zeitlich verteilter Nutzers erst ermöglicht.

Ist die Nutzung einschlägiger Web 2.0-Portale und -Anwendungen, wie wikis, Blogs oder auch soziale Netzwerke, für den privaten oder einzelnen Internetnutzer bereits alltäglich, birgt der Ansatz des Web 2.0 gerade im geschäftlichen Umfeld viel Potenzial. Denn vor allem im wirtschaftlich genutzten Bereich des Webs, dem *Net Economy*, kann das soziale Kapital wettbewerbsentscheidend sein. Denn eine Person oder ein Unternehmen besitzt umso mehr soziales Kapital, je mehr aktiv genutzte Beziehungen aufrecht erhalten werden, die untereinander wiederum vernetzt sind. Dies führt zu einer schnelleren und qualitativ hochwertigen Informationsgewinnung durch kollektive Intelligenz und kollaborative Arbeit. [4] [116]



**Bild 4-13:** Effizienzsteigerung bei der Planung in Produktion und Logistik mit Methoden des Web 2.0

Gerade bei der Planung moderner Systeme in Produktion und Logistik, mit den geforderten Eigenschaften Adaptabilität, Schlankeit und Agilität (vgl. Kap. 1), kommt es

durch enge Terminschienen sowie durch global verteilte und interdisziplinäre Planungsteams immer mehr auf die elektronische und der digitale Unterstützung des kollaborativen Arbeitens, schnellen Informationsaustausches und leichten Kommunikation an. Die Eigenschaften und Technologien der Web 2.0-Bewegung bilden hier die Grundlage, dass auch die Planung den Anforderungen gerecht wird (vgl. Bild 4-13).

### 4.3.3 Simulation als eine *Software-as-a-Service*-Dienstleistung

Da für die Integration der Simulation in den Planungsprozess neben der Notwendigkeit, einen Experten mit in die Projekte einzubeziehen auch noch eine Simulationsumgebung erworben werden muss, scheuen viele Unternehmen den Aufwand und die Investitionskosten, die Simulation einzuführen. Da sich nun das Internet zu einer weltumspannenden und leistungsstarken Kommunikationsebene entwickelt hat, sind Modellierungsbausteine so bereitzustellen, dass ein Anwender über das Inter- oder Intranet auf die Referenzbausteine zugreifen und somit ein Simulationsmodell nach eigenen Bedürfnissen zusammenstellen kann. Das könnte die Investitionseinsparungen der Unternehmen unterstützen, da die Anzahl der benötigten Lizenzen erheblich gesenkt werden könnte oder als Dienstleistung über das Internet bezogen werden kann.

Anbieter kommerzieller Simulationsumgebungen sind bestrebt, Bausteine zur graphischen Modellierung zur Verfügung zu stellen. Diese beschränken sich im Allgemeinen aber auf Grundprozesse, wie beispielsweise Transport, Puffern und Bearbeiten. Die Anwendung dieser modernen Simulationsumgebungen benötigt aber immer noch überdurchschnittliche Fachkenntnisse, das Wissen um Simulationsmethoden und -werkzeuge sowie deren Einsatzmöglichkeiten. Um die Integration in den betrieblichen Planungsprozess noch stärker voran zu treiben, muss es das Ziel deshalb sein, anwenderfreundliche, branchenspezifische und vordefinierte Bausteine zur Verfügung zu stellen, mit denen typische Szenarien ohne großer Simulationserfahrung abbildbar sind. Mit der Bereitstellung solcher Bausteinboxen oder Referenzmodelle, soll ein Planer in der Lage sein, mit möglichst unaufwändiger Einarbeitung anhand von eingegebenen Informationen ein branchenspezifisches Simulationsmodell zu erstellen. Im Genaue soll das heißen, dass er die Struktur des zu simulierenden Systems beschreibt und die zur Simulation notwendigen Parameter im Dialog mit den Bausteinen oder Referenzmodellen eingibt. Die Entwicklung eines Referenzmodells zur Abbildung und Simulation von Supply Chains wird in Kapitel 5 vorgestellt.

Kapitel 6 widmet sich deshalb der Konzeption und Kapitel 7 der exemplarischen Umsetzung eines webbasierten Simulationsansatzes.

## 5 Ein Referenzmodell zur Modellierung und Simulation von Logistik- und Supply Chain Netzwerken

Die Wirksamkeit und Akzeptanz der Simulation in Produktion und Logistik wächst umso stärker, je besser sie in den alltäglichen Planungsprozess integriert werden kann. Der Integrationsprozess kann vor allem durch die Bereitstellung anwenderfreundlicher und vordefinierter Referenzmodelle erfolgen und für eine weitere Akzeptanzsteigerung der Simulation sorgen. Denn mit der Verwendung von Referenzmodellen wird nicht nur eine relativ schnelle und kostengünstige Modellierung ermöglicht, sondern insbesondere einem Nicht-Simulationsexperten der Zugang zur Methode erleichtert. So können Referenzmodelle eine hohe Wirksamkeit der Simulation durch rechtzeitigen Einsatz im Planungsprozess gewährleisten.

Gerade für Supply Chains im globalen Umfeld ist der Einsatz der Simulationstechnik für eine effiziente Planung und eine schnelle Analyse alternativer Szenarien gefordert. Das folgende Kapitel beschreibt daher die Entwicklung eines Referenzmodells zur Simulation von Supply Chain Netzwerken. Dieses umfasst insbesondere eine Bibliothek logistischer Grundbausteine und Module, die im Modellierungsprozess ausgewählt und parametrisiert werden können, um so spezifische Simulationsmodelle zu erstellen.

Dazu ist es hier zunächst nötig, den allgemeingültigen Begriff des Referenzmodells zu bestimmen, um dann auf die Rolle der Referenzmodellierung in der Simulation zu schließen. Daraufhin wird näher auf das SCOR-Modell (*Supply Chain Operations Reference*) eingegangen, das als Basis der Entwicklung dient. Dem folgt anschließend die Beschreibung der entwickelten Bausteine und Module. Ein exemplarischer Modell-aufbau und eine -initialisierung schließen das Kapitel ab.

### 5.1 Einordnung des Begriffes „Referenzmodell“

Obwohl der Begriff „Referenzmodell“ in der Literatur häufig Verwendung findet, hat sich bisher keine allgemeingültige Definition des Begriffes herausgestellt. So hat der Begriff in den unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen auch dementsprechend unterschiedliche Bedeutungen.

Bei den meisten in der Literatur beschriebenen Referenzmodellen handelt es sich um grundlegende Modelle, die der Ausgangspunkt für die Ableitung und Erstellung unterschiedlicher spezifischer Modelle sind. Dabei sind sie umfassender und allgemeiner aufgebaut als die spezifischen und müssen sich daher an die jeweiligen spezifische Gegebenheiten anpassen lassen. Bei Referenzmodellen lassen sich grundlegende

Eigenschaften erkennen. Hierzu gehört die Allgemeingültigkeit, bezogen auf einen definierten Anwendungsbereich sowie eine Wieder- und Weiterverwendungsorientierung. Unklar ist in diesem Zusammenhang allerdings, ob aus einer entsprechenden Allgemeingültigkeit auch eine gestiegene Wieder- und Weiterverwendbarkeit des Referenzmodells entsteht. [53] [31] [22] [119]

Innerhalb der Produktionssystematik, Logistik und Betriebswissenschaft stellen insbesondere die Softwareentwicklung und die Abbildung betrieblicher Strukturen und Abläufe Einsatzschwerpunkte von Referenzmodellen dar. Bei der Softwareentwicklung dienen sie vor allem dazu, ein allgemeingültiges und von der Implementierungssprache unabhängiges Modell zu erstellen, das durch eine Schnittstellebeschreibung die möglichen Kopplungen mit anderen Softwaresystemen ermöglicht. Exemplarische Vertreter sind hier Analyse- und Entwurfsmuster sowie Frameworks. Letztere bestehen aus einem wieder- und weiterverwendbaren Programmcode, der durch Modifikation angepasste Softwareblöcke entstehen lässt. Im betriebswissenschaftlichen Bereich beschreiben Referenzmodellen häufig Ablauf- und Aufbauorganisationsstrukturen oder auch Datenmodelle. Hier können beispielsweise aus allgemeinen und unternehmensunabhängigen Referenzmodelle durch Anpassung und Erweiterung spezifische Unternehmensmodelle abgeleitet werden. Hier ist zum Beispiel das R/3 Referenzmodell der SAP AG einzuordnen, das weitestgehend „Informationsflüsse, Daten- und Organisationsstrukturen, die zeitliche Reihenfolge der durchzuführenden Aufgaben und die entsprechende Realisierung“ beschreibt. [119] [31]

### **5.1.1 Referenzmodelle für die Simulation von Produktions- und Logistiksystemen**

Im Produktions- und Logistikbereich wird der Begriff des Referenzmodells seit einigen Jahren immer häufiger in Zusammenhang mit der Bildung von Simulationsmodellen genannt. Im übertragenen Sinn würde der Begriff „Referenzmodell“ in der Simulation daher eine systematische Beschreibung eines Sachverhaltes mit bestimmten bzw. relevanten Eigenschaften darstellen, um Systeme mit einer vorgegebenen Aufgabenstellung zu modellieren. Basierend auf einem Referenzmodell können dann spezifische Modelle erstellt bzw. abgeleitet werden. Sie dienen somit als Konstruktionsschemata für den Entwurf konkreter Simulationsmodelle. Dabei kommt dem Referenzmodell die Aufgabe zu, eine einfache Modellbildung und somit eine schnelle Simulation zu ermöglichen, was die Integration der Simulation in den betrieblichen Planungsprozess vorantreibt. Denn spezifische Modelle können so effizienter erstellt werden, was sich auch direkt auf die entstehenden Kosten bei der Modellerstellung auswirkt. Die zunächst



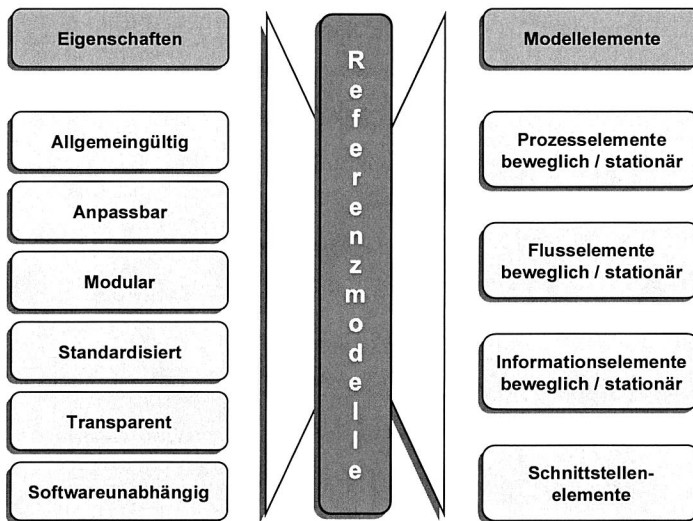
aufwändige Referenzmodellerstellung oder die kostenintensive Beschaffung von Referenzmodellen werden über die Projektzeit durch einen geringeren Aufwand bei der Modellierung wieder eingespart und verringern sich bei wiederholtem Einsatz.

Der *Arbeitskreis Referenzmodelle* der Fachgruppe *Simulation in Produktion und Logistik* in der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM) definiert den Begriff Referenzmodell wie folgt:

*"Ein Referenzmodell umfaßt eine systematische und allgemeingültige Beschreibung eines definierten Bereichs der Realität mit den für eine vorgegebene Aufgabenstellung relevanten charakteristischen Eigenschaften und legt das zugehörige Modellierungskonzept fest.*

*Im Bereich der Simulation dienen Referenzmodelle als Konstruktionsschemata für den Entwurf von aufgabenbezogenen Simulationsmodellen."* [119]

Aus Sicht der Ablaufsimulation werden die in Bild 5-1 dargestellten Eigenschaften von Referenzmodellen hervorgehoben:



**Bild 5-1:** Eigenschaften und spezifische Elemente von Referenzmodellen in der Simulation

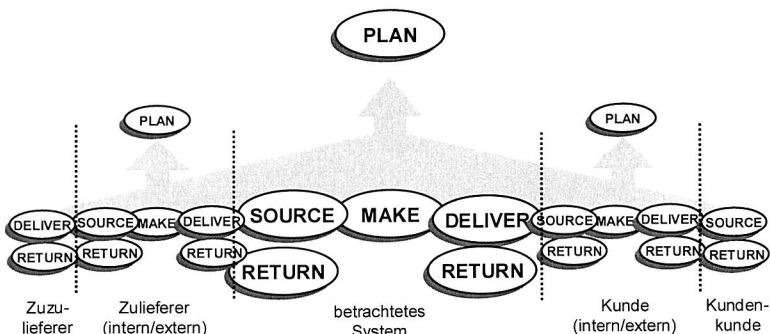
Ein Referenzmodell dient als Vorlage für die Erstellung eines Modells. Es ist dabei im Rahmen der Aufgabenstellung allgemeingültig. Das Referenzmodell muss die Übertragbarkeit und Anpassbarkeit an die jeweiligen spezifischen Anforderungen gewährleisten. Darüber hinaus wird von Referenzmodellen ein modularer Aufbau gefordert,

der eine einfachere Anwendung und Erweiterbarkeit sowie eine verständliche und einheitliche Begriffsverwendung ermöglichen soll. Erfahrungswissen bildet im Allgemeinen die Basis eines Referenzmodells und reduziert den Aufwand für die Erstellung von spezifischen Modellen. [92] [22]

Bei produktionslogistischen Systemen spielen die Teilbereiche Prozesse, Materialflüsse und Informationen eine wichtige Rolle. Ebenso gibt es Objekte, die sich durch das logistische System bewegen. Gemäß objektorientierter Modellierung ist es daher sinnvoll, dass Referenzmodelle in der Simulation ebenfalls diese Struktur aufweisen. Dies bedeutet, dass Referenzmodelle aus stationären und beweglichen Elementen bestehen, aber auch Schnittstellenelemente vorweisen können, um die geforderte Modularität aufrecht zu erhalten. Die stationären und beweglichen Elemente sind nochmals in Bearbeitungselemente, Materialelemente und Informationselemente zu untergliedern. Schnittstellenelemente bestehen aus Eintrittspunkten/Quellen und Austrittspunkten/Senken. [65].

### 5.1.2 Das SCOR-Modell als logistisches Referenzmodell

Ein vielversprechender Ansatz zur Beschreibung und Abbildung von Supply Chains findet sich im vom *Supply Chain Council* entwickelten SCOR-Modell (*Supply Chain Operations Reference Model*). Es dient der Definition eines Lieferkettenverbundes, bei dem die Supply Chain als Wertschöpfungsprozess betrachtet wird und dessen oft nicht transparent erscheinende Einzelprozesse auf wenige allgemeine, generische Teilprozesse zurückzuführen bzw. zu abstrahieren sind. Das heißt, dass variantenreiche und vielfältige Realprozesse mittels wenig und einfach zu handhabender Grundmuster modelliert werden können. Bild 5-2 stellt schematisch ein solches generisches Modell dar. [2] [Bolstroff] [117]



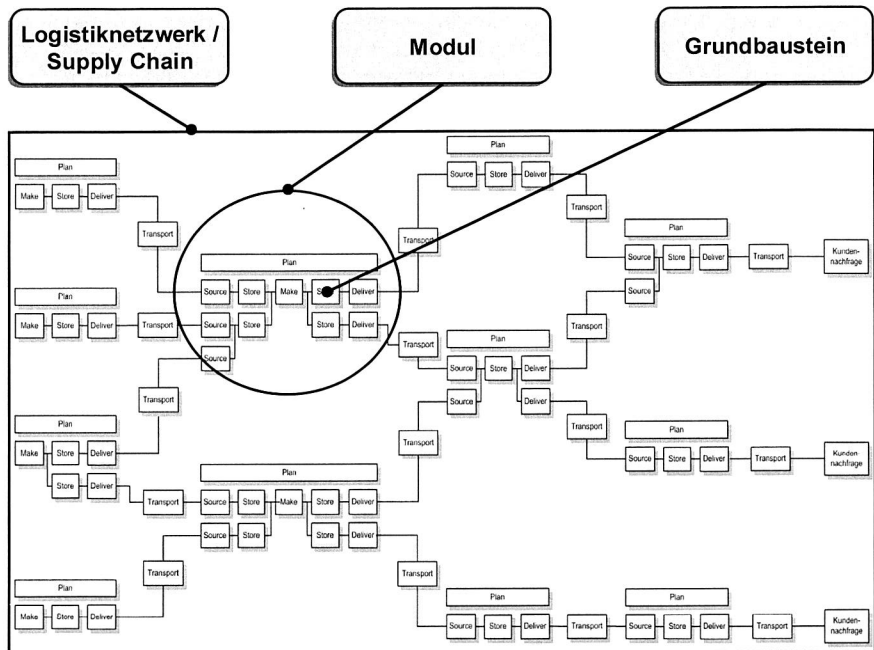
**Bild 5-2:** Der SCOR Management-Prozess [103]

Der Ansatz bedeutet, dass das SCOR-Modell zunächst der reinen Lieferkettenbeschreibung und nicht der Lieferkettengestaltung dient. Die Anwendung des Modells eignet sich jedoch sehr gut für eine darauf aufbauende oder für eine nachfolgende Optimierung der Lieferkette, zum Beispiel mit Hilfe der Ablaufsimulation.

Ziel des SCOR-Modells ist die Beschreibung von sich gegenseitig beeinflussenden Supply Chain Prozessen, die in weiteren Schritten zur Analyse, Verbesserung und Umsetzung von Gestaltungsalternativen genutzt werden kann. Dies basiert auf der Annahme, dass sich alle wertschöpfenden Prozesse einer Supply Chain mit den fünf grundlegenden Prozesselementen abbilden lassen. Sie lassen sich nach Ausführungs- und Planungsprozessen unterscheiden. Zu den Ausführungsprozessen gehören die Elemente SOURCE (Beschaffen), MAKE (Herstellen), DELIVER (Liefern) und RETURN (Rückliefern / Entsorgen). Diese beschreiben alle Aktivitäten des Informationsflusses und des physischen Materialflusses. Das Prozesselement PLAN (Planen) besitzt die Aufgabe, zukünftige Bedarfe zu befriedigen. Hierzu zählen beispielsweise die Bündelung und die Priorisierung eines bestehenden Bedarfs oder auch die Lagerbestandsplanung zur Befriedigung von Absatz-, Produktions- und Materialbedarfe sowie ebenfalls eine grobe Kapazitätsplanung. [2][Bolstroff]

### **5.1.3 Modularer Grundaufbau des entwickelten Referenzmodells**

Das entwickelte Referenzmodell umfasst eine Bibliothek logistischer Grundbausteine, die im Rahmen der Konfiguration ausgewählt und parametrisiert werden können. Jeder Grundbaustein weist spezifische Eigenschaften auf und ermöglicht so eine genaue Differenzierung innerhalb des Logistiknetzwerkes. Im Rahmen der Konfiguration wird die Anzahl und Art der Grundbausteine, deren Struktur zueinander und die Parameter jedes Grundbausteins festgelegt. Die Prozessabläufe der einzelnen Grundbausteine sind dabei aufeinander abgestimmt. Die Grundbausteine des Referenzmodells können miteinander nach vorgeschriebenen Regeln verknüpft werden. Es ergeben sich grundsätzliche Kombinationen an Grundbausteinen, welche zu Modulen zusammengefasst werden. Durch das Verbinden der Module entsteht ein abstraktes Modell eines zu simulierenden Logistiknetzwerkes. Mit den vorgegebenen Grundbausteinen und den daraus abgeleiteten Modulen lassen sich umfangreiche Logistikmethoden und -maßnahmen und deren Auswirkung auf das gesamte Logistiknetzwerk simulieren. Bild 5-3 verdeutlicht dies. Der Vorteil eines solchen Bausteinkonzeptes liegt u. a. in der Festlegung grundsätzlicher Funktionalitäten, die seitens des Anwenders nicht mehr hinterfragt werden müssen.



**Bild 5-3:** Modellierung eines Logistiknetzwerkes durch Verwendung von Modulen und Grundbausteinen des Logistik-Referenzmodells

Eine detaillierte Aufbaustruktur und Funktionsbeschreibung der Grundbausteine und Module wird in den folgenden zwei Kapiteln erläutert.

## 5.2 Grundbausteine für die Modellbildung

In Anlehnung an das SCOR-Modell besteht das entwickelte Simulations-Referenzmodell ebenfalls aus Basisprozessen, die die spezifischen Teilprozesse eines Wertschöpfungsprozesses innerhalb eines Logistiknetzwerkes abbilden. Um die geforderte Allgemeingültigkeit und Wieder- bzw. Weiterverwendung des Referenzmodells zu gewährleisten, wird von einem generischen Wertschöpfungsprozess ausgegangen. Im Genaueren beinhaltet somit die Bausteinbibliothek des Referenzmodells die Grundbausteine DEMAND, PLAN, SOURCE, STORE, MAKE, DELIVER und TRANSPORT (vgl. Bild 5-4). Dem Grundbaustein PLAN sind rein planerische Aufgaben zugeordnet und der Grundbaustein DEMAND erzeugt die Nachfrage der Endkunden. Die restlichen Grundbausteine übernehmen sowohl planerische, dispositive als auch physische Teilfunktionen der Logistik.

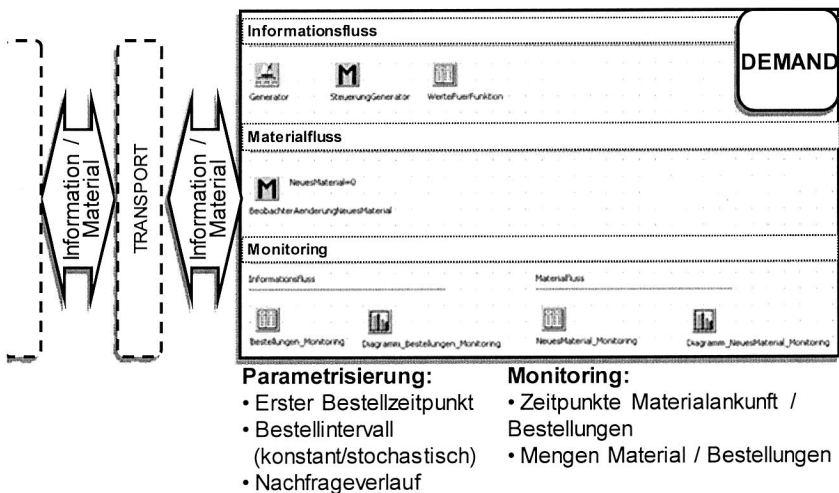
Das Konzept sieht es vor, dass jeder eingesetzte Grundbaustein unabhängig von den anderen parametrisiert werden kann. Womit er die ihm zur Verfügung stehenden Daten unter Berücksichtigung der Parameterkonfiguration individuell verarbeiten kann. Zur Kommunikation bestehen zwischen den sieben Grundbausteinen Eingangs- und Ausgangsbeziehungen, die einerseits den Materialfluss vom Zulieferer über die Hersteller und Distributoren bis hin zum Kunden und andererseits den Informationsfluss in entgegengesetzter Richtung verknüpfen. So werden beispielsweise die ausgegebenen Materialflussdaten dem darauffolgenden Baustein als Eingangsdaten zur Verfügung gestellt, der diese wiederum verarbeitet. Veränderungen der Zustände innerhalb eines Grundbausteins werden im Rahmen eines Monitorings aufgezeichnet und für die Ermittlung von Logistikkennzahlen bereit gestellt. Die möglichen Konstellationen der einzelnen Grundbausteine zueinander sind ebenfalls in Bild 5-4 dargestellt. Neben der Art des Vorgängers und Nachfolgers wird zudem die mögliche Anzahl vorangestellter und nachfolgender Grundbausteine dargestellt.

Anzahl	Vorgänger	Grundbaustein		Nachfolger	Anzahl
0	-	MAKE	<div>Information Material</div>	STORE	1...n
1...n	STORE	<div>Information Material</div> MAKE	<div>Information Material</div>	STORE	1...n
1...n	SOURCE	<div>Information Material</div> STORE	<div>Information Material</div>	DELIVER	1...n
1...n	SOURCE	<div>Information Material</div> STORE	<div>Information Material</div>	MAKE	1
1	MAKE	<div>Information Material</div> STORE	<div>Information Material</div>	DELIVER	1
1	STORE	<div>Information Material</div> DELIVER	<div>Information Material</div>	TRANSPORT	1
1	STORE	<div>Information Material</div> DELIVER	<div>Information Material</div>	DEMAND	1
1	TRANSPORT	<div>Information Material</div> SOURCE	<div>Information Material</div>	STORE	1
1	DELIVER	<div>Information Material</div> TRANSPORT	<div>Information Material</div>	SOURCE	1
1	DELIVER	<div>Information Material</div> DEMAND		-	0
1	TRANSPORT	<div>Information Material</div> DEMAND		-	0

**Bild 5-4:** Grundbausteine des Referenzmodells und das bestehende Beziehungsgeflecht

### 5.2.1 Der Grundbaustein DEMAND

Am Ende der logistischen Kette steht der Kunde, der einerseits die Bedarfe an Produkten oder Materialien erzeugt und andererseits die physischen Materialien abnimmt. Im entwickelten Referenzmodell bildet der Grundbaustein DEMAND die Kundennachfrage ab und dient somit als Quelle des Informationsflusses, das heißt er erzeugt die konkreten Zeitpunkte, zu denen bestimmte Mengen eines bestimmten Materials bestellt werden. Aus der Eigenschaft heraus, dass der Grundbaustein DEMAND zudem als Senke für den Materialfluss fungiert, folgen diesem keine weiteren Grundbausteine. Gemäß der in Bild 5-5 dargestellten Konstellationen werden also im Grundbaustein DEMAND die Kundenbestellungen generiert und an den vorangestellten Grundbaustein TRANSPORT oder DELIVER übergeben. Im Gegenzug werden dem Grundbaustein DEMAND die zu liefernden Materialien zur Befriedigung der Kundennachfrage übergeben.



**Bild 5-5:** Aufbau- und Ablaufstruktur des Grundbausteins DEMAND

Ausgehend vom Grundbaustein DEMAND werden somit die Aktivitäten der anderen Grundbausteine im Modell bestimmt bzw. beeinflusst. Entsprechend der Anzahl der abzubildenden Kundennachfrageverläufe sind auch dementsprechend viele Grundbausteine DEMAND einzusetzen.

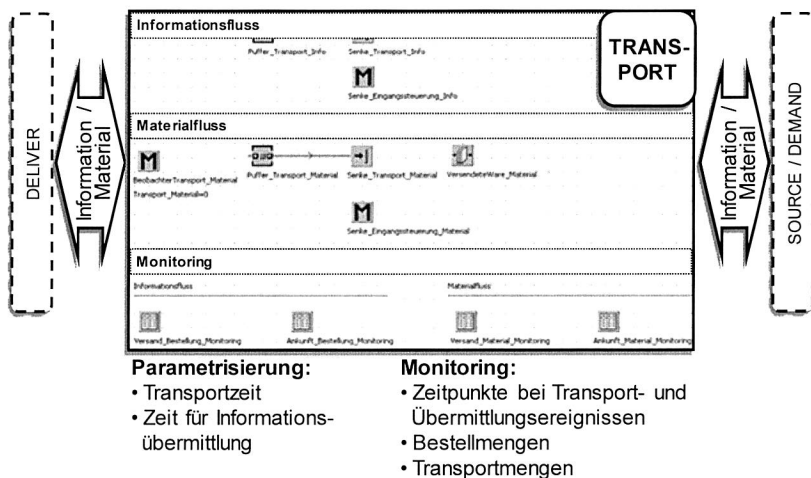
Zur Generierung der Kundennachfrage kommt die im Abschnitt 2.3.2 beschriebene quadratische Gleichung zweiter Ordnung zur Abbildung charakteristischer Nachfrageverläufe zum Einsatz. Durch die bei der Parametrisierung vom Anwender angegebenen Werte wird der konkrete Funktionsverlauf beschrieben.

Ebenfalls kann durch Angabe einer Standardabweichung, in Kombination mit einer erzeugten normalverteilten Zufallszahl und der Basisbestellmenge, die tatsächliche Bestellmenge gesetzt werden. So kann je nach angegebener Standardabweichung ein stärker oder minder ausgeprägter schwankender Nachfrageverlauf simuliert werden.

Zur Messung der Leistung des abgebildeten Logistiknetzwerkes werden im Grundbaustein DEMAND während der Simulation die Zeitpunkte der Bestellauslösung und die dazugehörigen Bestellmengen protokolliert. Hieraus lässt sich beispielsweise die Kennzahl der durchschnittlichen Lieferzeit ableiten.

## 5.2.2 Der Grundbaustein TRANSPORT

So wie der Transportprozess der räumlichen Überbrückung und Materialverteilung über örtlich verteilte Knoten in einem Logistiksystem (vgl. Abschnitt 2.2.4) dient, hat auch der Grundbaustein TRANSPORT des entwickelten Referenzmodells die Aufgabe, Informationen und Materialien zwischen den Modulen zu übermitteln bzw. zu transportieren. Um die Aufgabe wahrnehmen zu können, ist er bei Bedarf wahlweise zwischen den Grundbausteinen DELIVER und DEMAND oder auch zwischen den Grundbausteinen DELIVER und SOURCE einsetzbar. Die Parametrisierung erfolgt dabei sowohl über die Transportzeit als auch über die benötigte Zeit, um Informationen zu übermitteln. Die Zeiten des Transports und der Informationsübermittlung werden meist stochastisch beeinflusst, daher kann die Parametrisierung des Grundbausteins nicht nur über konstante Zeiten, sondern auch über Wahrscheinlichkeitsfunktionen erfolgen.



**Bild 5-6:** Attribute und Kommunikation des Grundbausteins TRANSPORT

Das *Monitoring* des Grundbausteins TRANSPORT zeichnet die Zeitpunkte auf, zu denen eine Transport bzw. die Informationsübermittlung eines Auftrages beginnt und endet. Zudem werden die Transportmengen bzw. die Bestellmengen mit aufgenommen. Aus diesen Werten kann beispielsweise die Logistikkennzahl *Transportzeit je Transportauftrag* ermittelt werden.

5.2.3 Der Grundbaustein DELIVER

Die grundlegenden Funktionalitäten des Grundbausteins DELIVER sind die Verarbeitung von Bestelleingängen, die Prozesse des Materialflusses und die Erstellung von Bestellprognosen. Bei der Verarbeitung von Bestelleingängen nimmt der Grundbaustein DELIVER Materialbestellungen entgegen, verarbeitet diese und reicht die Bestellanforderung an das Lager, d. h. an den vorgelagerten Grundbaustein STORE, weiter. Bei den Materialflussprozessen nimmt der Grundbaustein DELIVER zunächst die auszuliefernden Materialien vom Lager auf, verarbeitet diese und gibt sie an den nachfolgenden Grundbaustein TRANSPORT weiter. Bei der Verarbeitung der Materialien können dem Grundbaustein DELIVER so die Aufgaben des Warenausgangs zugeordnet werden. Das sind insbesondere operative Tätigkeiten, wie Umschlag, Mengen- und Qualitätskontrollen oder Verpackungsprozesse. Die hierfür anfallenden Prozesszeiten sind bei der Parametrisierung anzugeben, inklusive der Wahrscheinlichkeiten zur Abbildung stochastischer Einflüsse.

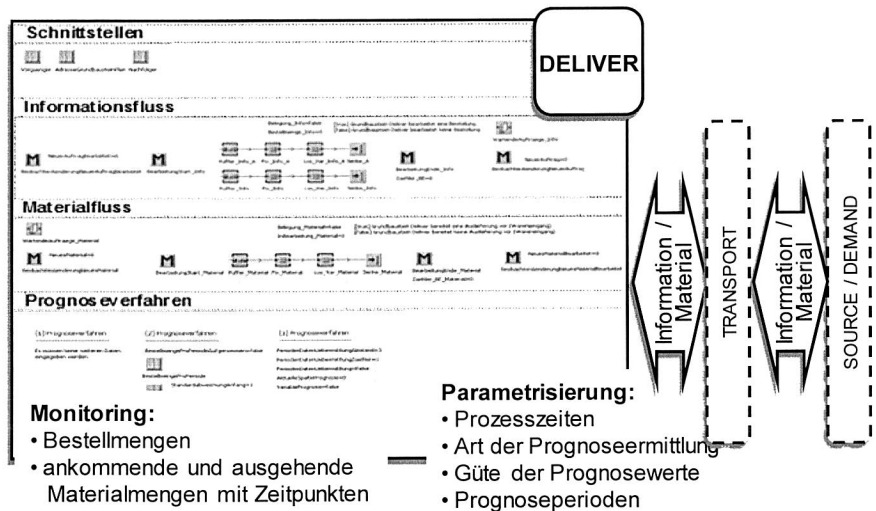


Bild 5-7: Attribute und Kommunikation des Grundbausteins DELIVER



Eine weitere Aufgabe des Grundbausteins DELIVER liegt darin, bei entsprechender Parametrisierung die zukünftigen Bestelleingänge zu prognostizieren. Bei der Parametrisierung des Bausteins kann der Anwender festlegen, ob mit einer Prognosefunktion in der Simulation gearbeitet werden soll. Wird diese Option ausgewählt, werden Prognosewerte vom Grundbaustein DELIVER ermittelt, auf die der vorgelagerte Grundbaustein STORE zurückgreifen kann, um seinen Lagerbestand zu verwalten.

Grundsätzlich lässt sich im entwickelten Referenzmodell zwischen der stochastischen und der quasideterministischen Prognoseermittlung von Bedarfen unterscheiden. Die auszuwählende Art der Prognoseermittlung hängt davon ab, ob dem Grundbaustein DELIVER nach dem Grundbaustein TRANSPORT ein Grundbaustein DEMAND oder ein Grundbaustein SOURCE folgt. Die beiden Fälle werden nachfolgend beschrieben.

### Stochastische Ermittlung

Ist im Modell der Grundbaustein DELIVER über den Grundbaustein TRANSPORT mit einem Grundbaustein DEMAND verknüpft, besteht die Möglichkeit, Prognosewerte stochastisch ermitteln zu lassen.

Im Allgemeinen werden Bedarfe bei der stochastischen Bedarfsermittlung mit Hilfe analytischer Prognoseverfahren ermittelt, deren Beschreibung in algorithmischer Form vielfach recht komplex und rechenintensiv ist. Auch werden im unternehmerischen Alltag unterschiedliche Prognoseverfahren kombiniert und zudem oftmals durch Erfahrungswerte ergänzt. Ziel der Simulation kann es daher nicht sein, diese Prognoseverfahren abzubilden. Sinnvoll erscheint es vielmehr, die Güte der Prognosewerte zu hinterlegen, die beim entwickelten Referenzmodell in Form einer Standardabweichung angegeben werden kann. Die tatsächlich eintretenden Nachfragewerte werden als Erwartungswerte einer Normalverteilung eingesetzt. Dieser Erwartungswert wird anschließend unter Berücksichtigung der bei der Parametrisierung des Grundbausteins eingegebenen Standardabweichungen verfälscht, woraus sich der Prognosewert ergibt.

Im Referenzmodell wird angenommen, dass die Güte eines Prognoseverfahrens aufgrund der höheren Informationsgüte für die zeitnahen Perioden höher ist als für spätere Perioden. Die Standardabweichung der Normalverteilung wird daher dynamisch angepasst. Für die Modellierung des Prognosefehlers sind der Wert für die Standardabweichung in der ersten Planungsperiode sowie der Wert in der letzten Planungsperiode anzugeben. Im Modell wird angenommen, dass die Standardabweichung von der

ersten bis zur letzten Periode linear ansteigt. Die zu ermittelnden Standardabweichungen der Normalverteilung ergeben sich für jede Periode  $i$  des Planungshorizonts der Länge  $n$  (mit  $n > 1$ ) aus der folgenden Gleichung. [43]

$$\sigma_i = \sigma^{\min} + \frac{\sigma^{\max} - \sigma^{\min}}{n - 1} \cdot (i - 1)$$

#### Quasideterministische Bedarfsermittlung

Ist der Grundbaustein DELIVER über den nachfolgenden Grundbaustein TRANSPORT mit einem Grundbaustein SOURCE verknüpft, so kann bei der Bausteinparametrisierung anstelle der stochastischen Ermittlung von Prognosewerten auch die quasideterministische Bedarfsermittlung ausgewählt werden. Dabei werden die Nachfrageinformationen des folgenden Grundbausteins STORE über den Grundbaustein SOURCE und TRANSPORT an den Grundbaustein DELIVER übermittelt. Dabei ist im Modell anzugeben, in welchen Abständen die Prognosen der nachgelagerten Grundbausteine dem Grundbaustein DELIVER übermittelt werden sollen. Die Angabe über diese Abstände erfolgt in Perioden. Die Prognosedaten des folgenden Grundbausteins STORE werden dann als deterministisch angenommen. Daraus abgeleitet ergeben sich quasideterministisch die Prognosewerte für den Grundbaustein DELIVER.

Das Monitoring des Grundbausteins DELIVER zeichnet die ein- und ausgehenden Bestellmengen sowie die ankommenden und ausgehenden Materialmengen mit den jeweiligen Zeitpunkten auf. Aus diesen Werten lassen sich die Logistikkennzahlen „Lieferbereitschaft“ und „Zahl der Auslieferungen pro Periode“ ermitteln.

### **5.2.4 Der Grundbaustein STORE**

Die zentrale Aufgabe des Grundbausteins STORE ist die Abbildung der physischen Lagerung der Materialien und der Überwachung des Lagerbestandes. Im Modell werden ihm die Materialien von den vorangestellten Grundbausteinen übergeben, die den aktuellen Lagerbestand erhöhen. Die Materialien werden dann bei einer vorliegenden Bestellung an den nachfolgenden Grundbaustein übergeben und sorgen somit für einen Abfluss bzw. eine Verringerung des aktuellen Lagerbestandes.

Zur Parametrisierung kann beim Grundbaustein STORE zwischen unterschiedlichen Dispositionsverfahren gewählt werden. Der Anwender entscheidet sich zwischen

- einer kontinuierlichen und rhythmischen Bestandsüberwachung,
- einem fixen und reichweitenorientierten Meldebestand und

- zwischen einer fixen, einer reichweitenorientierten und einer auf den Lagerbestand  $S$  aufzufüllenden Bestellmenge.

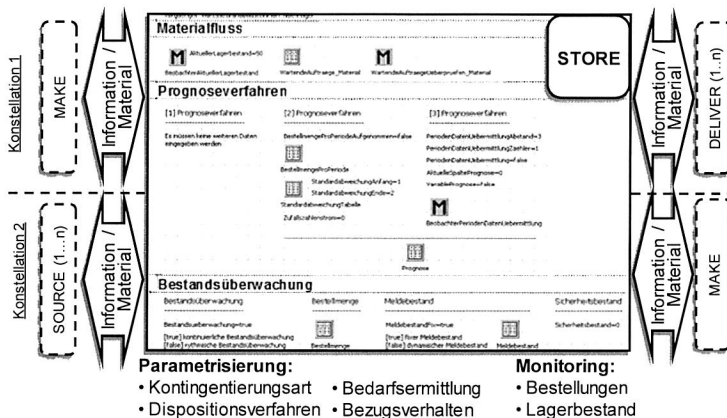
Mittels dieser Einstellungen lassen sich verbrauchsgesteuerte Dispositionsverfahren, der reichweitenorientierte Zielbestand und die reichweitenorientierte Losgrößenbildung umsetzen.

Die Verwaltung des Lagerbestandes erfolgt im Grundbaustein STORE durch den Vergleich des disponiblen Lagerbestandes mit dem Meldebestand. Der disponible Lagerbestand ergibt sich dabei aus dem physischen Lagerbestand abzüglich der reservierten Menge und zuzüglich der bestellten Menge (vgl. Abschnitt 2.2.5).

Für den Meldebestand können bei der Konfiguration des Bausteins folgende Alternativen ausgewählt werden:

- Ein konstanter Meldebestand über die gesamte Simulationslaufzeit durch Eingabe eines fixen Wertes
- eine reichweitenorientierte Berechnung des Meldebestands durch Angabe der Zeitspanne, für die der Bestand ausreichen soll (Periodenanzahl), und des Sicherheitsbestandes, der dem reichweitenorientierten Meldebestand hinzu addiert wird und somit den tatsächlichen Meldebestand ergibt
- und eine rhythmische Bestandsüberwachung bei der unabhängig vom Meldebestand bei jeder Bestandsüberwachung eine Bestellung ausgelöst wird.

Bei der Verwendung des Bausteins in einem Modell können sich zwei alternative Vorgänger-Nachfolger-Konstellationen ergeben.



**Bild 5-8:** Grundbaustein STORE mit den jeweiligen Attributen und Konstellationen

### Konstellation 1

Bei der ersten Konstellation (vgl. Bild 5-8) sind dem Grundbaustein STORE ein Grundbaustein MAKE vor- und quasi beliebig viele Grundbausteine DELIVER nachgelagert.

Der Baustein STORE verhält sich entsprechend der Bestellungen der ihm folgenden DELIVER-Bausteine. Die Bestellungen werden dabei vom disponiblen Lagerbestand abgezogen, und je nach eingegebenen Dispositionsverfahren wird dieser mit dem Meldebestand verglichen. Wurde der Baustein gemäß einer reichweitenorientierten Ermittlung des Zielbestands konfiguriert, müssen dem Grundbaustein STORE zusätzlich Prognosedaten zur Verfügung stehen, die sich aus den Prognosen der nachgelagerten Bausteine ergeben. Ergibt sich aus der Summe aller Prognosedaten, dass der Meldebestand unterschritten ist, so wird beim vorangestellten Grundbaustein MAKE nachbestellt. Die Bestellmenge ergibt sich aus den ermittelten Prognosewerten und dem Lagerbestand.

Ist der Lagerbestand ausreichend, erfüllt der Grundbaustein STORE die Bestellaufträge, indem er die Materialien aus seinem Lagerbestand an die nachgelagerten Grundbausteine DELIVER weitergibt. Ist es für den Grundbaustein STORE jedoch nicht möglich, die eingegangenen Bestellungen in der kompletten Auftragsgröße zu erfüllen, so müssen die Auslieferungsmengen kontingentiert werden. Hierfür stehen dem Anwender bei der Bausteinkonfiguration verschiedene Kontingentierungsarten zur Verfügung:

- Priorisierung: Die Grundbausteine DELIVER werden priorisiert und nach ihrer Priorität beliefert. Die Prioritäten sind zusätzlich anzugeben.
- Statische Kontingentierung: Jeder Grundbaustein DELIVER erhält den gleichen Anteil an der vorhandenen Gesamtauslieferungsmenge.
- Dynamische Kontingentierung: Jeder Grundbaustein DELIVER erhält den gleichen prozentualen Anteil an seiner Gesamtbestellmenge.

### Konstellation 2

Bei dieser Konstellation können dem Grundbaustein STORE quasi beliebig viele Grundbausteine SOURCE vorgelagert, aber nur ein einziger Grundbaustein MAKE nachgelagert sein. Die Bestellaufträge erhält er vom nachgelagerten Grundbaustein MAKE (vgl. Bild 5-8).

Wird das Material im Grundbaustein STORE mittels bestandsgesteuerter Dispositionsverfahren nachbestellt, so müssen für diesen Grundbaustein keine Prognosewerte ermittelt werden. Auch bei einer rein deterministischen Bedarfsermittlung bedarf es kei-

ner Prognose, da erst nach Eingang einer Kundenbestellung die Stückliste aufgelöst und die Sekundärbedarfe ermittelt werden.

Anders ist dies, wenn der Meldebestand auf Basis eines reichweitenorientierten Zielbestandes berechnet oder einer reichweitenorientierten Bestellmenge eingesetzt wird. In diesem Fall müssen Prognosen für den zukünftigen Materialverbrauch erstellt werden, die allerdings nicht von den nachfolgenden Bausteinen übernommen werden können, sondern vom Grundbaustein STORE eigenständig ermittelt werden.

Dabei kann der Anwender zwischen der stochastischen oder der quasideterministischen Bedarfsermittlung für den zukünftigen Materialverbrauch wählen.

Bei der stochastischen Bedarfsermittlung gibt der Anwender in Form einer Standardabweichung an, welche Güte die Prognosewerte besitzen sollen. Diese Vorgehensweise zur Ermittlung von Bedarfen entspricht der Vorgehensweise im Grundbaustein DELIVER.

Bei der quasideterministischen Bedarfsermittlung werden die Prognosewerte der nächsten nachgelagerten Grundbausteine STORE über eine Stückliste, die im nachfolgenden Grundbaustein MAKE hinterlegt ist, aufgelöst. Daraus leiten sich die Prognosewerte für den Bedarf des Grundbausteins STORE ab. Dabei ist im Grundbaustein STORE anzugeben, in welchen Abständen die Prognosen der nachgelagerten Grundbausteine dem Grundbaustein STORE übermittelt werden sollen. Die Angabe über diese Abstände erfolgt in Perioden.

Bei einer Bestellauslösung ist es möglich, über mehrere Grundbausteine SOURCE Materialien zu bestellen. Im Grundbaustein STORE ist daher die Information zu hinterlegen, bei welchem vorgelagerten Grundbaustein welche Bestellmenge zu bestellen ist. Die Angabe kann entweder relativ zur Gesamtbestellmenge erfolgen: Dabei wird für jede Bestellung, die vom Grundbaustein STORE ausgeführt wird, die jeweilige Bestellmenge, die an die Grundbaustein SOURCE übergeben wird, anhand der angegebenen Prozentsätze errechnet.

Oder es kann Material fix bis zu einer bestimmten Bestellmenge immer bei einem bestimmten Grundbaustein SOURCE bestellt werden. Bei einer höheren Bestellmenge ist auf andere Grundbausteine SOURCE auszuweichen. So kann zum Beispiel im Grundbaustein STORE eingestellt werden, dass von der gesamten Bestellmenge immer bis zu 30 Einheiten bei einem Grundbaustein SOURCE, die nächsten 30 Einheiten bei einem weiteren Grundbaustein SOURCE und bei einer größeren Bestellmenge die restlichen Einheiten bei einem dritten Grundbaustein SOURCE bestellt werden.

Das Monitoring des Grundbausteins STORE zeichnet während des Simulationsdurchlaufes die Mengen und Zeitpunkte neu eintreffender Bestellungen auf. Zudem werden Veränderungen des disponiblen und des physischen Lagerbestandes festgehalten. Aus den erhaltenen Werten lassen sich Logistikkennzahlen wie der durchschnittliche Lagerbestand, die Umschlagshäufigkeit und die Lagerdauer ableiten.

5.2.5 Der Grundbaustein MAKE

Zur Abbildung von Netzwerken in Produktion und Logistik bedarf es nicht nur einer Möglichkeit, Transferprozesse zu betrachten, sondern auch Transformationsprozesse in das Modell zu integrieren. Diese Aufgabe kommt beim entwickelten Referenzmodell dem Grundbaustein MAKE zu. Dies betrifft sowohl Produktions- als auch Kommissionierprozesse. Der Grundablauf ist derart gestaltet, dass Produkte aus dem Lager entnommen und in ein oder mehrere neue Produkte transformiert bzw. zu einem kommissionierten Los zusammengefasst werden.

Für den Grundbaustein MAKE ergeben sich zwei mögliche Konstellationen. Bei der ersten Konstellation können ihm beliebig viele STORE-Grundbausteine vorgelagert sein und auch beliebig viel STORE-Grundbausteine folgen. Oder aber es ist ihm kein Grundbaustein vorgelagert und es folgen ihm beliebig viele STORE-Grundbausteine. Das Grundverhalten und die Eigenschaften der beiden Konstellationen werden nachfolgend erläutert:

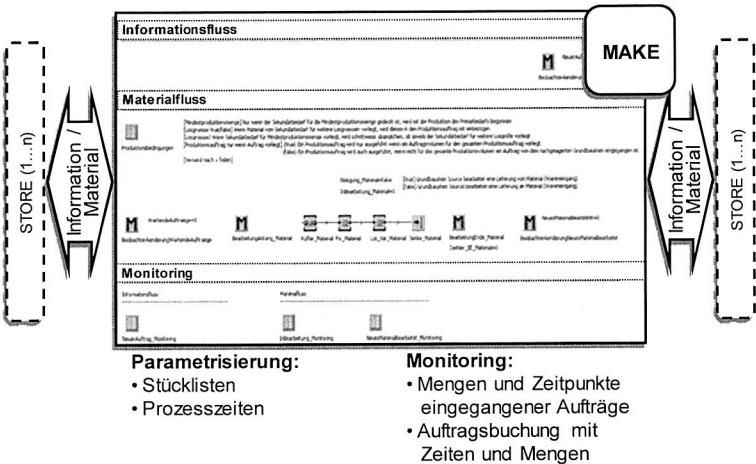


Bild 5-9: Der Grundbaustein MAKE mit den alternativ möglichen Verknüpfungskonstellationen

### Konstellation 1

In diesem Fall entnimmt der Grundbaustein MAKE die Sekundärbedarfe für die Produktion oder Kommissionierung aus den vorgelagerten Grundbausteinen STORE. Nach den durchgeführten Produktions- bzw. Kommissionierungsprozessen werden die Produkte bzw. die kommissionierten Lose an die nachgelagerten Grundbausteine STORE übergeben.

Der Grundbaustein MAKE erhält von den nachgelagerten Grundbausteinen STORE den Produktions- bzw. den Kommissionierauftrag mit der Information, wie viele Produkte zu fertigen bzw. wie viele Lose zu kommissionieren sind. Der Grundbaustein MAKE ermittelt aus der Höhe der Bestellung die benötigten Sekundärbedarfe. Dafür ist im Grundbaustein MAKE eine entsprechende Stückliste zu hinterlegen, die Informationen zur Anzahl an Vorprodukten zur Fertigung des Produktes bzw. zur Kommissionierung eines Loses, um die Sekundärbedarfe zu ermitteln, enthält.

Die Bedarfe werden mit dem physischen Lagerbestand der einzelnen vorgelagerten Grundbausteinen STORE verglichen. Liegen die Bedarfe in den Grundbausteinen STORE als physischer Bestand vor, so werden diese aus dem Lager entnommen. Liegen die Bedarfe nicht als physischer Bestand vor, so wird die Bedarfsmenge reserviert. Tritt die Menge dann zu einem späteren Zeitpunkt im Lager ein, entnimmt der Grundbaustein MAKE die reservierte Bedarfsmenge aus dem Lager, d. h. aus dem vorgelagerten Grundbaustein STORE und beginnt mit der Produktion bzw. mit der Kommissionierung.

Die Zeiten, welche für die Produktion bzw. Kommissionierung benötigt werden, sind dem Grundbaustein MAKE bei der Parametrisierung vorzugeben. Nach Abschluss der Fertigung bzw. der Kommissionierung werden die entstandenen Produkte bzw. kommissionierten Lose an nachgelagerte Grundbausteine STORE übergeben.

Mit dem entwickelten Grundbaustein des Referenzmodells können bei mehreren nachgelagerten Grundbausteinen STORE auch Kuppelproduktionen abgebildet werden. Im Grundbaustein MAKE ist dafür die Information, wie viele Produkte bei der Fertigung eines Auftrages entstehen, in einer weiteren Stückliste zu hinterlegen. Zudem ist anzugeben, in welchem Grundbaustein STORE welche Art von entstandenem Produkt gelagert wird.

## Konstellation 2

Im Falle dessen, dass dem Grundbaustein MAKE kein Grundbaustein vorgelagert ist, agiert er als Quelle für Materialien. Auf Basis von Bestellungen fertigt er Produkte, ohne dafür Sekundärbedarfe bereit gestellt zu bekommen, jedoch nur, wenn eine konkrete Bestellung vorliegt. Über die Parametrisierung im nachgelagerten Grundbaustein STORE lässt sich die Produktionsmenge beeinflussen. Zudem wird die Menge an Produkten, die während einer Periode gefertigt werden kann, über die angegebene Produktionszeit pro Bestellung, pro Los und pro Bearbeitungszeit je bestellter Einheit begrenzt werden.

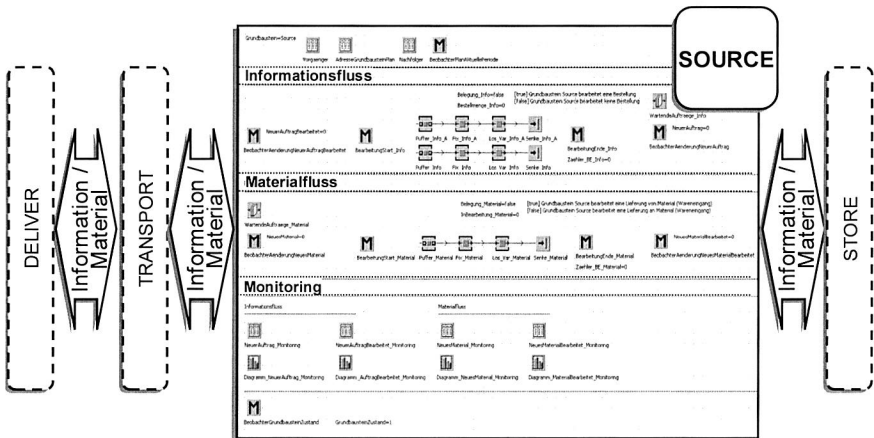
Das Monitoring des Grundbausteins MAKE nimmt die Mengen und Zeitpunkte eingegangener Bestellungen auf. Zudem wird der Beginn und der Endzeitpunkt eines Produktionsauftrages und die dabei entstandene produzierte bzw. kommissionierte Menge aufgezeichnet. Auf Basis der ermittelten Werte können je nach Funktion des Grundbausteins MAKE die in Kapitel 2.4 beschriebenen Logistikkennzahlen Kommissionierzeit je Auftrag bzw. Produktionszeit je Auftrag berechnet werden.

### **5.2.6 Der Grundbaustein SOURCE**

Der Fokus des Grundbausteins SOURCE liegt in der Abbildung der Prozesse eines Wareneingangs, die im Wesentlichen aus der Entgegennahme der gelieferten Waren als auch deren Mengen- und Qualitätskontrolle bestehen.

Das Referenzmodell ist derart gestaltet, dass einem Grundbaustein SOURCE nur ein Grundbaustein STORE folgen kann. Das Ablaufverhalten ist er derart konzipiert, dass der SOURCE-Baustein Bestellungen vom STORE-Baustein entgegennimmt, verarbeitet und sie anschließend über den vorangestellten TRANSPORT-Baustein an den Grundbaustein DELIVER weiterreicht. Der Informationsfluss erfolgt äquivalent zu dem des DELIVER-Bausteins (vgl. Abschnitt 5.2.3). Im Gegenzug wird die bestellte Ware vom vorgelagerten Grundbaustein DELIVER über den Grundbaustein TRANSPORT an den Grundbaustein SOURCE gesendet. Der Grundbaustein SOURCE nimmt die Ware entgegen und stellt sie für die Lagerung bereit, d. h. der Grundbaustein übergibt die Ware an den nachgelagerten Grundbaustein STORE. Die schematische Darstellung in Bild 5-10 verdeutlicht dies noch einmal.





#### Parametrisierung:

- Zeiten zur Informationsübertragung für Materialannahme und -bereitstellung

#### Monitoring:

- Eintrittszeiten / -austrittszeiten für Materialien / Bestellungen
- Material- / Bestellmengen

**Bild 5-10:** Schematische Darstellung des Grundbausteins SOURCE

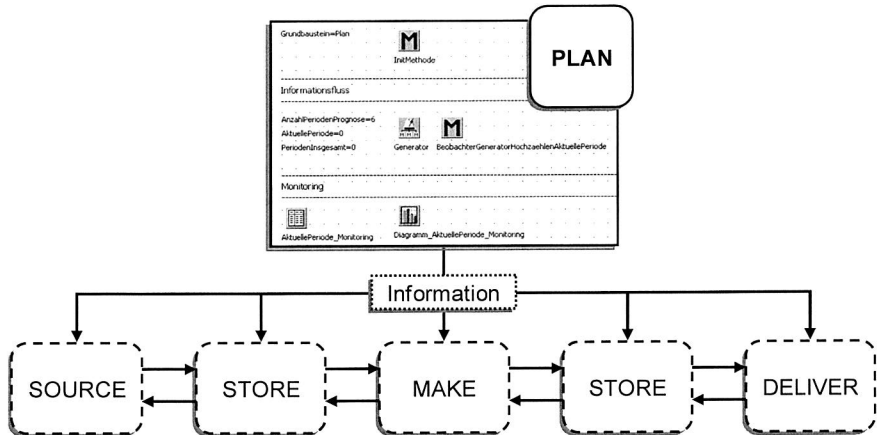
Die Parametrisierung des Bausteins erfolgt jeweils über die Prozesszeiten der Informationsübertragung, der Materialannahme und der Materialbereitstellung. Durch Hinterlegung von Wahrscheinlichkeitsfunktionen kann auch hier, wie bei allen anderen Grundbausteinen, ein stochastisches Modellverhalten abgebildet werden. Zudem werden im Grundbaustein SOURCE über die Schnittstellenspezifizierung sowohl die vor- und nachgelagerten Grundbausteine als auch der zugeordnete Grundbaustein PLAN hinterlegt.

Im Rahmen des Monitorings werden die Ereigniszeitpunkte und auch die Mengen aufgezeichnet, zu denen die Bestellungen eintreffen. Weiterhin werden die Zeiten und die Mengen der Bestellungen aufgezeichnet, die nach der Bearbeitung an den vorgelegerten Grundbaustein übergeben werden. Zudem werden die Zeitpunkte der Materialeingänge und -ausgänge mit den entsprechenden Materialmengen protokolliert. Aus den gewonnenen Informationen lässt sich die Kennzahl „Anlieferungen pro Periode“ bestimmen.

### 5.2.7 Der Grundbaustein PLAN

Die zentrale Aufgabe des Grundbausteins PLAN liegt in der Aufteilung des betrachteten Simulationszeitraumes in Intervalle. Die Intervalle werden als Perioden bezeichnet. Bei der Bausteinkonfiguration sind dabei die Periodenlänge als fester Parameter und auch die Periodenanzahl, für die eine Bedarfsprognose zu ermitteln ist, vorzugeben. Im Simulationslauf überwacht der Baustein die aktuelle Periode und gibt vor, für wie viele zukünftige Perioden Prognosewerte ermittelt werden sollen.

Der Baustein ist während eines Simulationslaufs von den Zuständen anderer Bausteine unabhängig. Ihm werden allerdings die Grundbausteine SOURCE, STORE, MAKE und DELIVER über einen eindirektionalen Informationsfluss zugeordnet. Dadurch können diesen zugeordneten Bausteinen die Informationen über die aktuelle Periode und die Anzahl der zu prognostizierenden Perioden übergeben werden. Bild 5-11 verdeutlicht dies. Das Monitoring nimmt die Zeitpunkte der Periodenübergänge auf.



**Bild 5-11:** Grundlegender Informationsfluss des Grundbausteins PLAN

### 5.3 Modulbildung für eine differenzierte Modellgestaltung

Durch die Verknüpfung der im Unterkapitel 5.2 beschriebenen Grundbausteine entstehen Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen, die sich für eine differenzierte Betrachtung der einzelnen Kettenglieder eines abzubildenden Logistiknetzwerkes zu einzelnen Modulen zusammenfassen lassen. So ergeben sich die drei grundsätzliche Modultypen LIEFERMODUL, PRODUKTIONSMODUL und LAGERMODUL, die sich wiederum auf vielfältige Weise kombinieren lassen. Je nach gewünschtem Detailgrad des zu simulie-

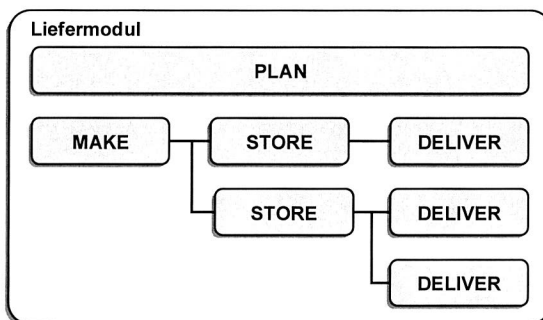
renden Logistiknetzwerkes können die einzelnen Module entweder als ein Unternehmen im Logistiknetzwerk als auch als ein Teilbereich eines Unternehmens gesehen werden. So ist beispielsweise durch Einsetzen mehrerer Produktionsmodule eine mehrstufige Produktion innerhalb eines Unternehmens abbildbar. Je nach Bedarf oder Abbildungsziel können die Module zudem über einen Grundbaustein TRANSPORT verknüpft werden.

Auch lassen sich mit der Modularisierung der Grundbausteine Sourcing-Strategien, wie beispielsweise das *Modular Sourcing* über die Kombination entsprechender Module abbilden. Hier bezieht ein Produzent seine Waren von einigen wenigen Lieferanten, die wiederum Komponenten von Lieferanten beziehen. Mit Hilfe der Module können somit komplexe logistische Systeme zusammengestellt und anschließend mit der Methode der Simulation bewertet werden.

### 5.3.1 Das Liefermodul

Im hier entwickelten Referenzmodell dienen Liefermodule als Quellen für Materialien, die sie an nachfolgende Module weiterreichen. So bilden die Liefermodule die Grenze des betrachteten Systems. Die Liefermodule erzeugen so Materialien, ohne Sekundärbedarfe von vorangestellten Prozessen beziehen zu müssen, dementsprechend ist einem Liefermodul auch kein weiteres Modul vorgelagert.

Ein Liefermodul ist grundsätzlich aus einem Grundbaustein MAKE, je nach Modellierungsbedarf mehreren Grundbausteinen STORE und DELIVER sowie dem Grundbaustein PLAN aufgebaut. In Bild 5-12 ist beispielhaft der Aufbau eines Liefermoduls dargestellt.



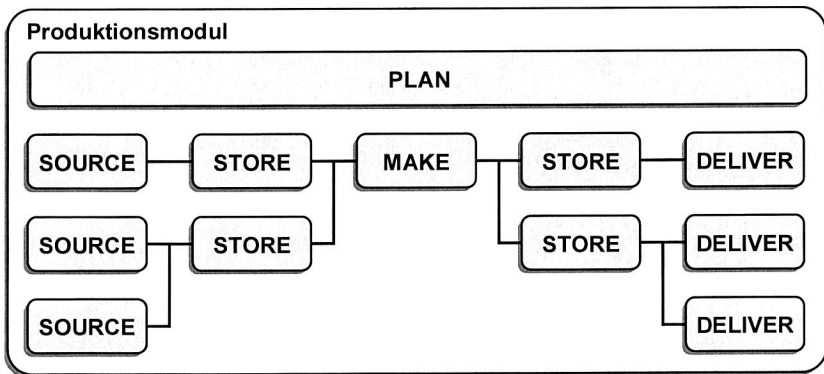
**Bild 5-12:** Beispielhafte Darstellung der Aufbaustruktur eines Liefermoduls

Bei der Modellierung sind so viele STORE-Bausteine zu spezifizieren wie es aus dem Produktionsprozess entstehende Produktarten geben soll, denn die im Liefermodul

erzeugten Materialien werden dort gelagert und bei einer Bestellung an das nachfolgende Modul weitergereicht. Wird ein Liefermodul als eigenständiges Unternehmen im Logistiknetzwerk betrachtet, so kann mit eingesetzten Grundbausteinen DELIVER jeweils der Warenausgang des Unternehmens für ein Produkt dargestellt werden.

### 5.3.2 Das Produktionsmodul

Das Produktionsmodul übernimmt mittels des eingesetzten Grundbausteins MAKE die Fertigung und Kommissionierung von Produkten. Die Materialien werden über die Grundbausteine SOURCE beschafft und in den Grundbausteinen STORE zwischengelagert, bevor sie für die Produktion bzw. zur Kommissionierung vom Grundbaustein MAKE weiterverarbeitet werden. Der Grundbaustein MAKE übergibt die gefertigten Produkte an die nachgelagerten Grundbausteine STORE, von denen aus bei einer vorliegenden Bestellung die Produkte über die Grundbausteine DELIVER zu den nachgelagerten Modulen transportiert werden. In Bild 5-13 wird beispielhaft der Aufbau eines Produktionsmoduls gezeigt. Der Grundbaustein PLAN übernimmt hier die Koordination der einzelnen Grundbausteine SOURCE, STORE, DELIVER und MAKE.

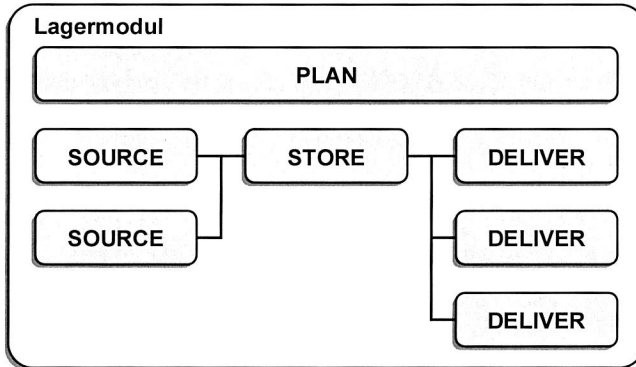


**Bild 5-13:** Beispielhafte Darstellung der Aufbaustruktur eines Produktionsmoduls

### 5.3.3 Das Lagermodul

Die Aufgabe des Lagermoduls liegt, wie der Name bereits vermuten lässt, in der Lagerung von Materialien innerhalb eines abzubildenden logistischen Netzwerkes. Der Ablauf ist derart gestaltet, dass eine Materialart über einen oder mehrere Grundbausteine SOURCE beschafft werden. Die beschafften Materialien werden dann in einem Grundbaustein STORE zwischengelagert und über Grundbausteine DELIVER an die

nachgelagerten Module weitergereicht. Dabei sind die Grundbausteine SOURCE, STORE und DELIVER, wie auch bei den vorherig beschriebenen Modulen, einem Grundbaustein PLAN zugeordnet und werden von diesem koordiniert. In **Bild 5-14** wird dieser Sachverhalt beispielhaft dargestellt.



**Bild 5-14:** Beispielhafte Darstellung der Aufbaustruktur eines Lagermoduls

Das Lagermodul gibt dem Anwender die Möglichkeit, die im Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Sourcing-Konzepte umzusetzen. Beim Single Sourcing erfolgt die Beschaffung von Materialarten bei einem einzigen Lieferanten. Abgebildet werden kann diese Beschaffungsstrategie darüber, dass dem Grundbaustein STORE nur ein Grundbaustein SOURCE vorgelagert ist. Beim Dual Sourcing beispielsweise sind dem Grundbaustein zwei Grundbausteine vom Typ SOURCE vorgelagert. Diese sind mit zwei unterschiedlichen Liefermodulen zu verknüpfen. Dementsprechend ist auch das Multiple Sourcing abbildbar. Für das Abbilden der Global Sourcing bzw. Local Sourcing ist den Modulen ein Grundbaustein TRANSPORT zwischen zu schalten. Über die Konfiguration des Bausteins können dann die unterschiedlichen Werte der Transportzeiten für das Global oder Local Sourcing angegeben werden.

## 5.4 Modellierung und Anwendung

Aufgrund der modularen Gestaltung des entwickelten Referenzmodells kann ein zu analysierendes oder zu gestaltendes Logistiknetzwerk differenziert betrachtet werden. Es ist somit möglich, unterschiedlicher Netzwerkkonfigurationen, sowohl einfache Lieferketten als auch komplexe Netzwerkstrukturen, abzubilden. Zur Veranschaulichung stellt Bild 5-3 die Abbildung eines exemplarischen Logistiknetzwerks mit dem entwickelten Referenzmodells dar.

#### **5.4.1 Modellierung und Parametrisierung grundlegender Systemkonfigurationen**

Das entwickelte Referenzmodell ermöglicht es, alternative Produktionstypologien abzubilden. Unter der Annahme, dass es im abzubildenden System gilt, Produkte für den anonymen Markt zu produzieren, basiert das Logistiknetzwerk auf Prognosedaten. Dies kann durch entsprechende Konfiguration der Grundbausteine STORE, beispielsweise durch Anwendung des reichweitenorientierten Zielbestandes und der reichweitenorientierten Losgrößenbildung, abgebildet werden. Zudem lässt sich in jedem Grundbaustein SOURCE die auftragsbezogene Beschaffung simulieren, indem erst dann eine Bestellung bei den vorgelagerten Grundbausteinen ausgelöst wird, wenn ein konkreter Auftrag des nachgelagerten Grundbausteins vorliegt. So kann je nach Konfiguration der Bausteine der Order Penetration Point verschoben und darüber die Struktur des Logistiknetzwerkes bestimmt werden.

Auch ermöglicht es die freie Kombination der Grundbausteine, dass ein im Grundbaustein STORE lagerndes Material über mehrere Grundbausteine SOURCE beschafft werden kann. Ein Anwender kann somit die unterschiedlichsten Sourcing-Konzepte umsetzen. Beispielsweise sind beim Single Sourcing dem Grundbaustein STORE eben nur ein Grundbaustein SOURCE vorgelagert und beim Dual Sourcing dementsprechend zwei.

Ein weiteres Beispiel der flexiblen Modellierungsmöglichkeit stellt die Kombination bzw. Verknüpfung mehrerer Produktionsmodule im Logistiknetzwerk dar, um eine mehrstufige Produktion innerhalb eines Unternehmens aufzuzeigen. Die Abbildung alternativer Kommissioniervorgänge wie die sequentielle oder parallele Kommissionierung ist möglich. Hierzu können vom Anwender Einstellungen getätigt werden ob die Kommissionieraufträge nacheinander bearbeitet oder zu Losen zusammengefasst werden sollen. Werden die Aufträge nacheinander bearbeitet, so lässt sich die auftragsorientierte bzw. einstufige Kommissionierung darstellen. Dabei werden die Positionen für die Erfüllung eines Auftrages zusammengestellt, ehe sie zur Erfüllung eines weiteren Auftrages aus dem Lager zusammengeführt werden. Werden die einzelnen Aufträge zu einem Sammelauftrag zusammengefasst und die Positionen der einzelnen Aufträge als Sammellos aus dem Lager beschafft, dann handelt es sich um die artikelorientierte bzw. mehrstufige Kommissionierung.

#### **5.4.2 Modellinitialisierung**

Nach der Modellierung der Aufbaustruktur des abzubildenden Logistiknetzwerks und der Parametrisierung der einzelnen Bausteine und Module erfolgt mit dem Simulationsstart die Initialisierung des Modells. Hierbei werden mehrere Initialisierungsschlei-

fen durchlaufen, um vor allem die Prognosewerte sämtlicher Grundbausteine DELIVER und STORE zu ermitteln, auf deren Basis Bestellmengen und -zeitpunkte in den Grundbausteinen bestimmt werden. Prinzipiell erfolgt ausgehend vom Grundbaustein DEMAND bei jeder Initialisierungsschleife die Ermittlung der Prognosewerte des nächsten vorgelagerten Grundbausteins DELIVER bzw. STORE. Dies wiederholt sich so oft, bis alle benötigten Prognosewerte ermittelt wurden.

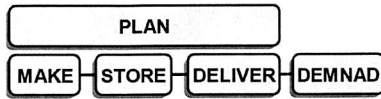
Zur deren Ermittlung im Referenzmodell ist jedem Grundbaustein ein Zustand zugeordnet, der die Werte 1, 2 oder 3 annehmen kann. Dabei gibt der Zustand 1 an, dass der betrachtete Grundbaustein noch nicht geprüft worden ist. Ist der betrachtete Grundbaustein vom Typ STORE oder DELIVER, so sind im Zustand 1 noch keine Prognosewerte für diese Grundbausteine ermittelt worden. Wird der Zustand des betrachteten Grundbausteins auf den Wert 2 gesetzt, dann gibt der Grundbaustein Bestellungen auf Basis von ermittelten Prognosewerten an vorgelagerte Grundbausteine weiter. Diese können dann bei einer quasideterministischen Bedarfsermittlung anhand der eingehenden Bestellungen Prognosewerte für ihre Bedarfe ermitteln. Sind alle prognostizierten Bedarfe an die vorgelagerten Grundbausteine übergeben, so erhält der Grundbaustein den Zustand 3. Der betrachtete Grundbaustein ist damit vollständig geprüft und kann auf Basis seiner ermittelten Prognosewerte Bestellungen ausführen.

#### 5.4.3 Simulation verbrauchsgesteuerter Dispositionsverfahren

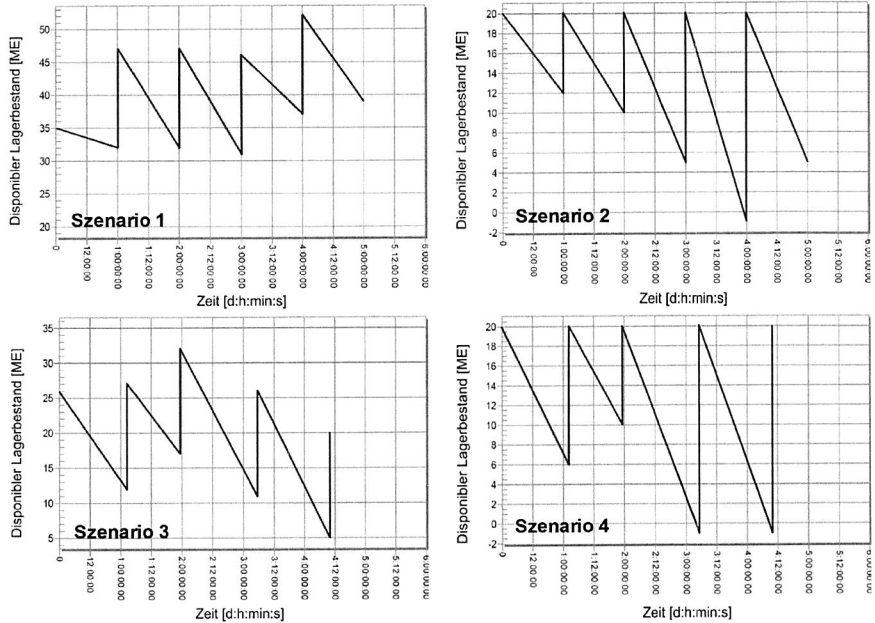
Eine zentrale Frage bei der Gestaltung einer Supply Chain ist oftmals die Suche nach dem geeigneten Dispositionsverfahrens. Mit Hilfe des entwickelten Referenzmodells und seinen integrierten Modellierungsbausteinen ist es möglich, die gewünschten Szenarien zu modellieren und die offenen Fragen effizient zu beantworten.

Exemplarisch soll dies im Folgenden näher erläutert werden. Zur Abbildung der verbrauchsgesteuerter Dispositionsverfahren genügt es, auf ein Simulationsmodell mit relativ geringer Komplexität zurückzugreifen. Hierzu wurde das Liefermodul über einen Grundbaustein TRANSPORT mit einem Baustein DEMAND verknüpft. Das Liefermodul besteht in diesem Fall aus einem Grundbaustein MAKE, einem Grundbaustein STORE und einem Grundbaustein DELIVER.

In Bild 5-15 ist der Aufbau des Modells zur Simulation des verbrauchsgesteuerten Dispositionsverfahrens schematisch dargestellt. Zudem sind die getroffenen Szenarienauswahl aufgelistet und die dazu ermittelten Ergebnisse graphisch aufgezeigt. Letztere zeigt den disponiblen Lagerbestand wie er sich bei den unterschiedlichen Dispositionsverfahren über die Zeit entwickelt.



**Szenario 1: Bestellrhythmus-Losgrößen-Politik**  
**Szenario 2: Bestellrhythmus-Lagerniveau-Politik**  
**Szenario 3: Bestellpunkt-Losgrößen-Politik**  
**Szenario 4: Bestellpunkt-Lagerniveau-Politik**



**Bild 5-15:** Verlauf der disponiblen Lagerbestandes bei der Simulation alternativen Dispositionsverfahren

Im ersten Szenario ist zur Abbildung der Bestellrhythmus-Losgrößen-Politik der Grundbaustein STORE so konfiguriert, dass die Bestandsüberwachung rhythmisch erfolgt und nach jeder Periode eine fixe Menge nachbestellt wird. Die Periodenlänge ist im Grundbaustein PLAN einen Tag gesetzt. Jede Periode, also jeden Tag, wird eine Bestellmenge von 15 Einheiten nachbestellt.

In einem zweiten Szenario wird die Veränderung des disponiblen Lagerbestands bei Anwendung der Bestellrhythmus-Lagerniveau-Politik untersucht. Dabei wird nach jeder Periode das Lager auf den Bestand von 20 Einheiten aufgefüllt. Die Periodenlänge beträgt wieder einen Tag.

Im Rahmen des dritten Szenarios wird die Bestellpunkt-Losgrößen-Politik nachgebildet. Zur Konfiguration des Grundbausteins STORE wird dazu ein fixer Meldebestand von 18 Einheiten eingetragen. Bei Erreichung oder Unterschreitung des Meldebestands wird jeweils eine fixe Bestellmenge von 15 Einheiten nachbestellt. Anders als



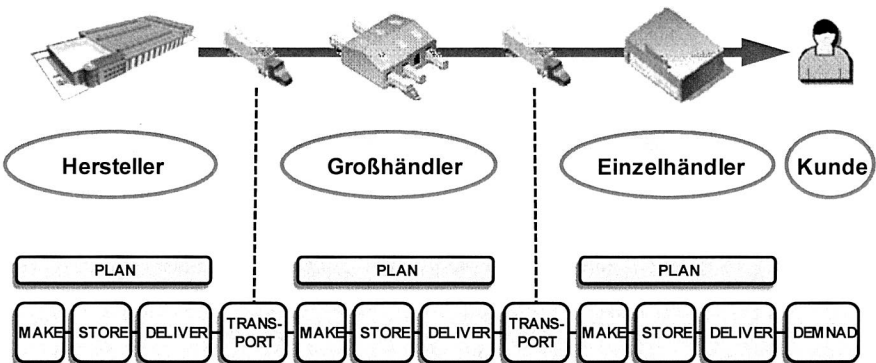
bei den Bestellrhythmus-Verfahren werden die Materialien nicht in gleichbleibenden Intervallen bestellt. Vielmehr ergeben sich bei dieser kontinuierlichen Bestandsüberwachung variable Intervalle.

In einem vierten Szenario wird eine Bestellpunkt-Lagerniveau-Politik simuliert. Das Lagerniveau liegt in diesem Fall bei 20 Einheiten. Auf dieses Niveau wird der Lagerbestand aufgefüllt, sobald der Meldebestand erreicht oder unterschritten wurde. Der Meldebestand liegt bei 18 Einheiten.

Durch die Abbildung der unterschiedlichen verbrauchsgesteuerten Bestellpolitiken und die damit erzielten Ergebnisse kann durch eine Plausibilitätsprüfung auch die Validität des entwickelten Referenzmodell festgehalten werden.

#### 5.4.4 Simulation des Bullwhip-Effekts

Im Abschnitt 2.3.3 wird der Bullwhip-Effekt als ein zentrales Phänomen in Liefer- und Logistiknetzwerken inklusive seiner Entstehung und Auswirkung diskutiert. Zu Demonstrationszwecken erfolgt die Nachbildung des Effekts mit dem entwickelten Referenzmodell und es werden die Auswirkungen etwaiger Lösungen zur Vermeidung des Effekts simuliert. Hierzu ist mit dem Referenzmodell eine einfache Supply Chain aufgebaut, die aus einem Hersteller (Liefermodul), einem Großhändler (Lagermodul) und einem Einzelhändler (Lagermodul) besteht. Die Aktivitäten der einzelnen Wertschöpfungspartner werden durch die Kundennachfrage bestimmt, die im Modell durch den Grundbaustein DEMAND abgebildet ist. In Bild 5-16 ist die beschriebene Aufbaustruktur noch einmal graphisch dargestellt.



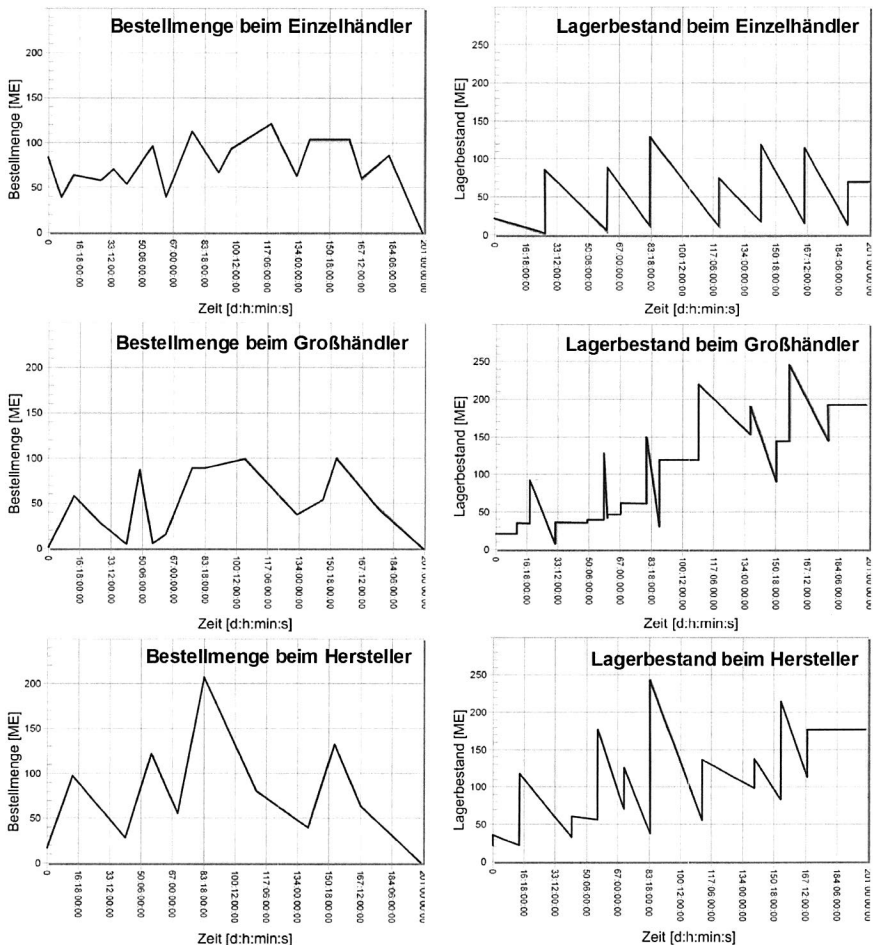
**Bild 5-16:** Aufbau einer Supply Chain zur Demonstration und Simulation des Bullwhip-Effekts mit Hilfe des entwickelten Referenzmodells

In einem ersten Szenario wird zunächst untersucht, ob die im Abschnitt 2.3.3 aufgezeigten Theorien zur Entstehung des Bullwhip-Effekts auch in der Simulation zu starken Schwankungen der Bestell- und Lagermengen in den einzelnen Modulen führen. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Einzelhändler ein einfaches Prognoseverfahren verwendet und die daraus resultierenden prognostizierten Bestellmengen daher zum Teil erheblich von den tatsächlich auftretenden Bestellmengen abweichen.

Die Prognosewerte des Einzelhändlers werden nicht an die Wertschöpfungspartner der Supply Chain weitergereicht. Sowohl der Großhändler als auch der Hersteller ermitteln ihre Prognosewerte stochastisch. Da die Kundennachfrage entlang der Supply Chain immer ungenauer zu prognostizieren ist, nimmt die Güte des verwendeten Prognoseverfahrens immer stärker ab, je weiter ein Wertschöpfungspartner innerhalb der Supply Chain vom Kunden entfernt liegt. Bezogen auf das hier beschriebene Simulationsmodell nimmt dementsprechend die Güte des Prognoseverfahrens vom Großhändler über den Einzelhändler bis hin zum Hersteller ab. Weiterhin wird angenommen, dass keine Teilauslieferungen von Bestellmengen möglich sind und so nur in ihrer gesamten Auftragsgröße bedient werden. In jedem Lager der Supply Chain wird immer dann nachbestellt, wenn der disponible Lagerbestand nicht ausreicht, um die Nachfrage der nächsten zwei Perioden zu decken.

Die Bestellmenge ist auf allen drei Stufen der Supply Chain so hoch, dass diese die Nachfrage der nächsten drei Perioden deckt. Zudem werden auf jeder Stufe der Supply Chain relativ hohe Mengen nachbestellt. Hohe Bestellmengen ergeben sich auch daraus, dass sich die Periodenlängen der Wertschöpfungspartner im Simulationsmodell unterscheiden. Die Periodenlänge des Einzel- und des Großhändlers beträgt jeweils 7 Tage, die Periodenlänge des Produzenten jedoch 14 Tage. Da die Bestandsüberwachung des Produzenten rhythmisch erfolgt, füllt dieser nur alle 14 Tage seinen Bestand im Lager auf. Dies führt zu Verzögerungen des Materialflusses.

In Bild 5-17 sind die Simulationsergebnisse des beschriebenen Szenarios graphisch aufgezeigt. Eindeutig sind hier die sich aufpeitschenden Bestellmengen entlang der einzelnen Wertschöpfungspartner erkennbar. Ebenso der stark schwankende und im anwachsende Lagerbestand. Die Einstellungen im Simulationsmodell führen zudem dazu, dass im betrachteten Zeitraum nur etwa 15% aller Kundenbestellungen bedient werden können.

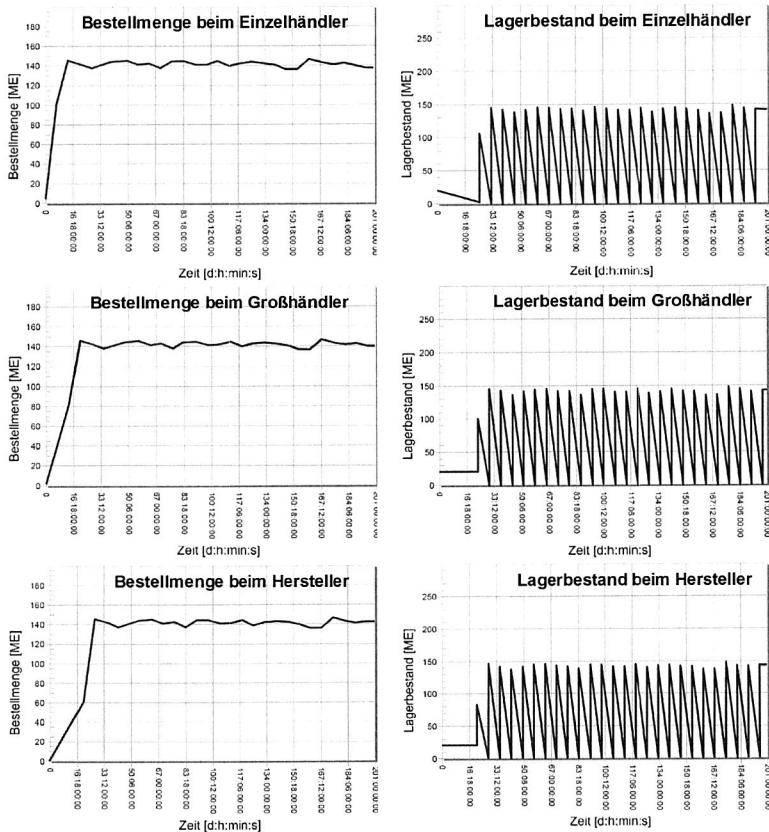


**Bild 5-17:** Simulierte Bestellmengen und Lagerverläufe innerhalb der abgebildeten Supply Chain

In einem weiteren Simulationsdurchlauf werden die Auswirkungen von Maßnahmen, die in der Literatur zur Abschwächung des Bullwhip-Effekts genannt werden, untersucht. Wesentliche Maßnahme zur Reduzierung des Bullwhip-Effekts wird in einer verbesserten Informationsübertragung von Prognosewerten gesehen, die beim Simulationsmodell berücksichtigt sind. So gibt der Einzelhändler nach jeder vergangenen Periode seine ermittelten Prognosewerte an die vorgelagerten Wertschöpfungspartner weiter. Auf deren Basis können diese dann ihre eigenen Prognosewerte ermitteln.

Realisiert wird diese Art der Prognoseübermittlung im Simulationsmodell mit Hilfe der quasideterministischen Bedarfsermittlung. Jeder im Modell eingesetzte Grundbaustein DELIVER ermittelt seine Prognosewerte auf Basis der Prognosewerte des ihm direkt folgenden Grundbausteins STORE.

Eine weitere Maßnahme zur Reduzierung des Bullwhip-Effekts liegt in einer Verringerung der Bestell- und Produktionslose. Dies erfolgt durch Anpassung der Bestellpolitiken der Grundbausteine STORE. Zudem erfolgt die Bestellauslösung beim Produzenten erfolgt in kürzeren Intervallen.



**Bild 5-18:** Bestellmengen und Lagerverläufe der abgebildeten Supply Chain unter Berücksichtigung der Maßnahmen zur Egalisierung des Bullwhip-Effekts

Die im Bild 5-18 dargestellten Ergebnisse der Untersuchung zeigen deutlich, dass eine positive Veränderung der Bestellschwankungen im Vergleich zum ersten Untersu-

chungsszenario zu erkennen ist. Die Lager aller Wertschöpfungspartner der simulierten Supply Chain sind wesentlich konstanter ausgelastet und werden in kürzeren Zyklen aufgefüllt.

Mit Einführung von Maßnahmen zur Reduzierung des Bullwhip-Effekts können im Simulationsverlauf mehr als 80% aller Kundennachfragen erfüllt werden. Daraus abgeleitet ergibt sich eine erhebliche Verkürzung der durchschnittlichen Wartezeit für die Kunden.

## **6 Konzeption eines modularen webbasierten Dienstes zur Simulation von Produktions- und Logistiksystemen**

Seit der industriellen Revolution stellt insbesondere das Internet eines der erfolgversprechendsten Innovationsfelder innerhalb der Informations- und Kommunikationstechnologien dar. Dabei entwickelt es sich seit seinen Ursprüngen in den späten sechziger Jahren des vorherigen Jahrhunderts vom einst rein militärisch und wissenschaftlich genutzten Medium zu einer privat und vor allem kommerziell angewendeten Kommunikationsplattform. Die Umsetzung der immensen Technologieinnovationen ermöglicht, dass auf der Basis der Internettechnologie immer neue Geschäftsmodelle, insbesondere im Dienstleistungssektor entstehen. [75]

Auch wenn bereits in den vergangenen Jahren immer wieder in Wissenschaft und Literatur über die Verbindung des Internets mit der Simulation bzw. dessen Nutzung für Simulationsanwendungen diskutiert und die vielfältigen Potentiale hinsichtlich technischer und ökonomischer Vorteile vorausgesagt wurden, ist die Konvergenz beider Technologien immer noch nicht ausgereift. [107]

Daher beschreibt dieses Kapitel die Konzeption eines webbasierten Dienstes zur Simulation von Produktions- und Logistiksystemen. Hierfür werden zunächst Grundlagen für ein allgemeines Verständnis geschaffen und der Begriff der webbasierten Simulation näher erläutert. Danach erfolgt eine Anforderungsbeschreibung zur Konzeption eines webbasierten Simulationsdienstes. Der anschließende Systemarchitekturentwurf und die Beschreibung der Einzelmodule schließen das Kapitel ab.

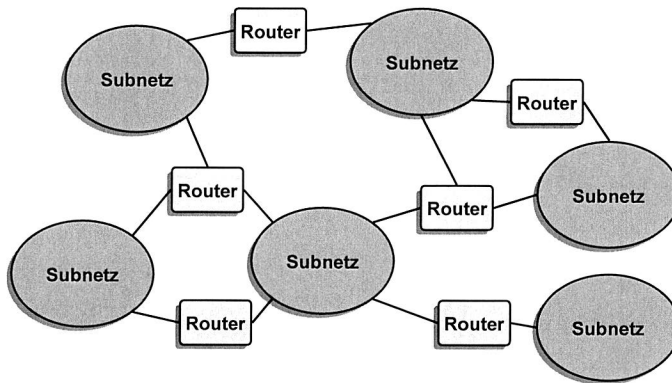
### **6.1 Grundlagen und Begriffe zur webbasierten Simulation**

Im Folgenden werden wesentliche theoretische Grundlagen zur webbasierten Simulation vermittelt. Sie bilden die Basis für ein gemeinsames Verständnis. Hierzu gehören vor allem ein Überblick über die Grundstruktur des Internets, Erläuterungen zu web-Applikationen und webbasierte Services, sowie die daraus abgeleitete Definition der webbasierten Simulation.

#### **6.1.1 Grundstruktur des Internets**

Grundsätzlich handelt es sich beim Internet um die technische Möglichkeit, weltweit zu kommunizieren und Informationen auszutauschen. Es besteht aus einem weltumspannenden Rechnernetz, das aus dem Zusammenschluss von mehreren lokalen Netzen

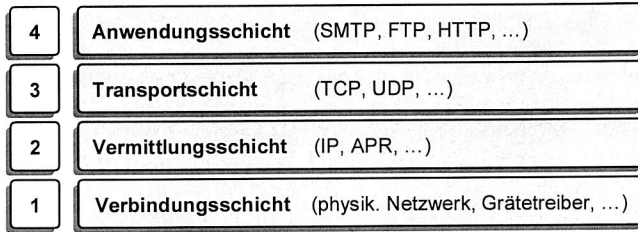
zu einem größeren Verband besteht. Die Verbindungselemente zwischen den einzelnen Netzen werden als *Router* bezeichnet, über die der Datenaustausch zwischen Rechnern, die wiederum Bestandteile dieser Subnetze sind, geschieht (vgl. Bild 6-1). Das Internet ist ein offenes Netz, das heißt, dass prinzipiell jeder, ob Unternehmen, Organisationen oder private Haushalte, gleichermaßen Zugang haben. Dem gegenüber steht ein Intranet, das meist ein innerbetriebliches oder privates in sich abgeschlossenes Rechnernetz darstellt, auf das nur definierte Rechner bzw. Anwender Zugriff haben. [1] [67]



**Bild 6-1:** Grundstruktur des Internets [1]

Ob nun Internet oder Intranet - für beide gilt, dass für die Kommunikation eine Sprache notwendig ist, die von allen beteiligten Kommunikationspartnern verstanden wird. Diese Aufgabe übernehmen bei Rechnernetzen die so genannten Übertragungsprotokolle, deren Sinn darin besteht, eine reibungslose Kommunikation zwischen den Rechnern zu ermöglichen. Mit Hilfe der Übertragungsprotokolle werden Regeln für die Übertragung von Informationen definiert, die einerseits die Übermittlung ermöglichen, andererseits zur Korrektur von Übertragungsfehlern dienen. Sie sind sozusagen die Verständigungsmittel im Rechnerverbund. Die netzwerktechnische Ebene wird durch das TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) festgelegt. Es bezeichnet dabei eine wichtige Gruppe von aufeinander abgestimmten Einzelprotokollen zur Kommunikation im Internet. Die eigentliche Kommunikationsebene bestimmt allerdings das HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*).

Schichtenmodelle dienen der Beschreibung der Kommunikation. In Bild 6-2 sind die für das Internet aufeinander aufbauenden Schichten dargestellt. Dabei verbirgt jede Schicht ihre eigene Funktionalität und stellt diese der jeweils höheren zur Verfügung.



**Bild 6-2:** Schematische Darstellung des TCP/IP-Schichtenmodells

Die **Verbindungsschicht** bildet die Basis für die physische Verbindung innerhalb der Netze. Sie umfasst vor allem Bestandteile wie Netzwerkhardware oder Gerätetreiber.

Die **Vermittlungsschicht** enthält das IP (*Internet Protocol*), das den Aufbau der einzelnen Datenpakete (Datagramme) regelt, die auf den Weg geschickt werden. Zudem werden hier auch die IP-Adressen, die der eindeutigen Identifizierung von Rechnern im Netz dienen, festgelegt. Außerdem findet hier das Routing, das heißt die Wegsteuerung eines Datenpaketes von einem Netz ins andere, statt.

Der **Transportschicht** sind vor allem das TCP (*Transmission Control Protocol*) und das UDP (*User Datagram Protocol*) zugewiesen. TCP unterstützt den gesicherten und verbindungsorientierten Datentransport sowie die Fehlererkennung und Korrektur während einer Datenübertragung, indem vor der Datenübertragung eine *Ende-zu-Ende-Verbindung* zwischen den Kommunikationspunkten aufgebaut wird. Über das UDP hingegen werden Datenpakete ins Internet versendet, ohne dass eine konkrete Verbindung zum Empfänger aufgebaut worden ist. Es handelt sich hier um ein verbindungsloses Protokoll.

Die **Anwendungsschicht** beinhaltet Anwendungsprogramme, die direkt mit der darunterliegenden Transportschicht kommunizieren. Hierzu gehören beispielsweise das SMTP (*Simple Mail Transfer Protocol*), das FTP (*File Transfer Protocol*) und vor allem das HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) als Basis für das WWW (*World Wide Web*).

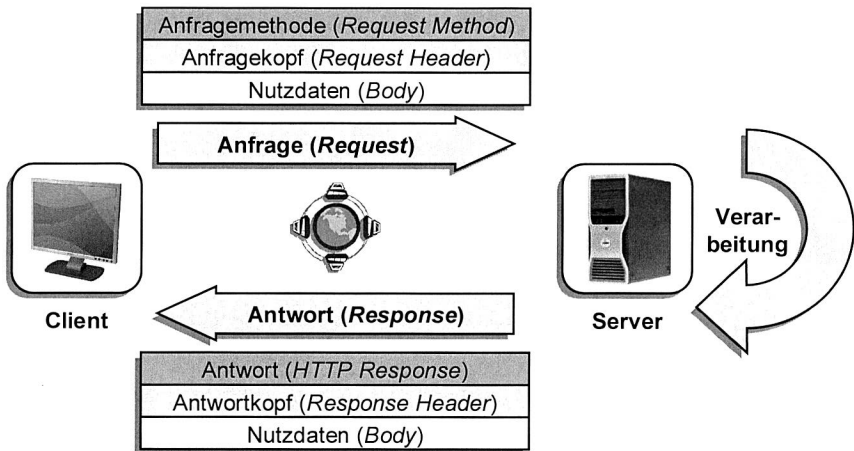
Zusammenfassend stellt das Internet aus technischer Sicht ein physikalisches Kommunikations- und Informationsnetzwerk mit einer ganzen Familie an Protokollen dar, die den Daten- und Kommunikationsaustausch über den Rechnerverbund regeln.

### **Client /Server-Anwendungen mit HTTP**

Wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert ist das HTTP der Anwendungsschicht des TCP/IP-Schichtenmodells zugeordnet. Es wird beispielsweise über dem Webbrowser angesprochen. Hier handelt es sich um ein zustandsloses Protokoll, das die Verbindung nach erfolgreicher Datenübertragung abbricht.



Prinzipiell folgt die Funktionsweise des HTTP einem Frage-Antwort-Spiel. Ein fragendes Programm, wie beispielsweise ein Internet-Browser, öffnet die Verbindung zu einem Webserver, der auf Anfragen wartet. Die Adressierung von Ressourcen mit Hilfe des HTTP erfolgt mittels URLs (*Uniform Ressource Locator*). Das fragende Programm sendet also eine Anfrage und der Server antwortet darauf. Je nachdem, ob es sich um eine Anfrage (*Request*) oder um eine Antwort (*Response*) handelt, variiert der Aufbau der übertragenen Nachricht (vgl. Bild 6-3).



**Bild 6-3:** HTTP Anfrage-Antwort-Interaktion / Nachrichtenaufbau

Eine Anfragenachricht besteht aus einer Anfragenmethode, einem Anfragenkopf und dem Abschnitt für Nutzdaten. Die Anfragemethode definiert den Anfragetyp und die Methodenauswahl. HTTP stellt einige Methoden zur Verfügung, wie beispielsweise *PUT*, *GET* und *POST*. Diese geben an, ob Daten gespeichert, geholt oder versendet werden sollen. Im Anfragekopf befinden sich zusätzliche Informationen bezüglich der Anfrage, wie zum Beispiel die Host-Adresse (host: [www.faps.de](http://www.faps.de)). Der Abschnitt für die Nutzdaten ist optional und enthält den eigentlichen Inhalt der Nachricht, beispielsweise in HTML oder XML.

Die Antwort auf eine HTTP-Anfrage, die so bezeichnete *Response*, enthält ebenfalls drei Teile. Der erste Bestandteil ist die HTTP-Response, die den Status der Antwort beinhaltet (zum Beispiel „HTTP/1.0 200 OK“). Daneben gibt es wieder einen Kopf, der Zusatzinformationen zur Antwort überträgt, gefolgt vom letzten Teil, den Nutzdaten.

Zusammenfassend ist HTTP ein Protokoll der Applikationsschicht, das alle Möglichkeiten der Übertragung von *Hypermedia*-Informationen, also auch multimediale Inhalte,

bietet. Es ist nicht hardware- oder betriebssystemabhängig, was ein wesentlicher Grund für seine große Verbreitung ist.

### 6.1.2 Web-Applikationen und webbasierte Dienste

Zunächst ist unter einer Applikation ein auf einem Computer direkt lauffähiges Programm zum Lösen einer bestimmten Aufgabe zu verstehen (z. B. ein Programm, das der Textverarbeitung dient). Mit dem Präfix *Web* entsteht eine Anwendung, die nicht wie herkömmliche Software direkt auf einem Computer installiert ist, sondern über das Internet zur Verfügung gestellt wird.

In der Literatur ist der Begriff der Web-Applikation oft als ein Gebilde mit in Relation stehenden Web-Seiten, gepaart mit einem Softwaresystem, definiert. Das Softwaresystem dient dabei beispielsweise der Kommunikations- und Datenbankunterstützung oder der Pflege und Wartung von Web-Seiten. In dieser Arbeit wird unter einer Web-Applikation die Möglichkeit zur Bereitstellung und zum Austausch von Informationen verstanden, die einem bestimmten Zweck dienen. Hierzu gehören auch Systeme zur Datenhaltung und Informationsspeicherung und die Anbindung einer serverseitigen Anwendung zur Verarbeitung der Informationen. Im Speziellen wird hier eine internetfähige Anwendung verstanden, um die Simulation von Produktions- und Logistiksystemen als webbasierten Services anzubieten. Ein webbasierter Dienst ist dabei eine über das Internet oder Intranet angebotene Dienstleistung, auf die von *Client*-Seite über einen *Browser* zugegriffen wird und serverseitig erbracht wird. [6]

## 6.2 Simulation als webbasierter Dienst

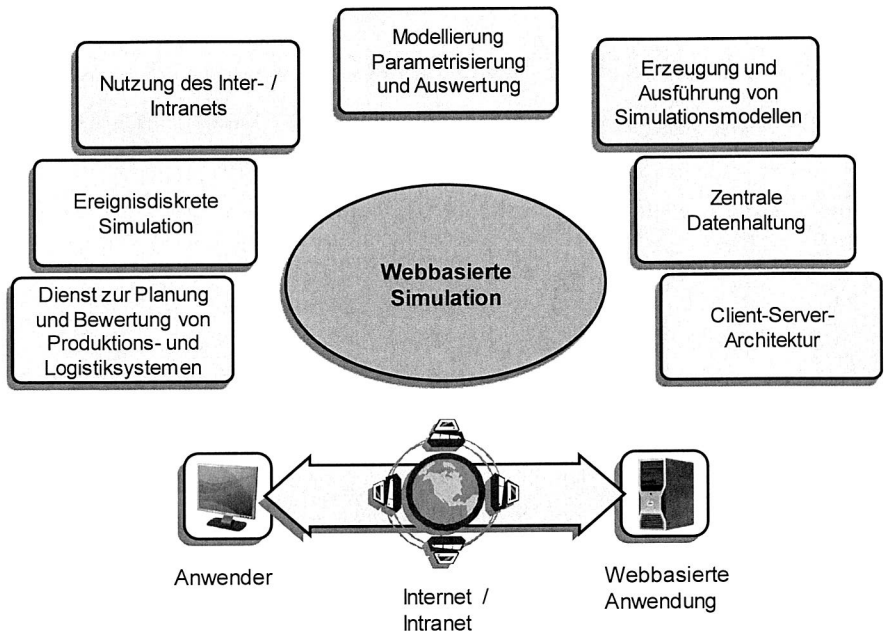
Welchen erheblichen Beitrag die Simulation zur Effizienzsteigerung innerhalb des betrieblichen Planungsprozesses leisten kann, wurde bereits ausführlich in Kapitel 3 behandelt. Dort wurden aber auch Eigenschaften der Simulation aufgezeigt, die nicht nur bei kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) zu Hemmnissen des Simulationseinsatzes sorgen, sondern auch bei größeren Industrieunternehmen. Dies sind vor allem zeit- und kostenintensive Modellerstellungen sowie eine geringe nachhaltige Modellverwendung gepaart mit hohen Investitionskosten bezüglich der Software (vgl. Unterkapitel 3.4). Eine webbasierte Anwendung kann hier Abhilfe schaffen. In diesem Unterkapitel folgt daher eine Definition des Begriffes der webbasierten Simulation, so wie er im Rahmen dieser Arbeit verstanden wird. Zudem werden die Vorteile der Simulation als webbasierter Dienst herausgearbeitet.

### 6.2.1 Begriff der webbasierten Simulation

Eine Möglichkeit die fehlende Simulationstechnik im eigenen Hause zu kompensieren ist es, auf die Beratung externer Simulationsexperten zurückzugreifen, sei es aus Mangel an eigenem Expertenwissen oder der Vermeidung kostenintensiver Investitionen in die Simulationstechnik. Externe Berater, die sich auf die Simulation spezialisiert haben, verfügen sicherlich über das benötigte Know-how, doch beschränkt sich die Beraterleistung in der Regel auf den in der Aufgabenspezifikation festgelegten Projektumfang. Oft ändern sich allerdings nach Projektabschluss die Zielgrößen des untersuchten Systems, so dass eine sichere Entscheidungsgrundlage nicht mehr gegeben ist. Die Folge ist ein weiterer und erneuter Beratungsbedarf mit teurerer und zeitraubender Modellanpassung oder -erstellung.

Eine bessere Möglichkeit stellt die Simulation als webbasierter Dienst dar. Die sogenannte webbasierte Simulation, in Verbindung mit anwenderfreundlichen Modellierungsbausteinen, kombiniert die Kostenvorteile eines rein projektbezogenen mit den Vorteilen eines nachhaltigen Simulationseinsatzes. Benutzerbausteine und Referenzmodelle ermöglichen es, den (Modellierungs-)Aufwand zu reduzieren, da der Nutzer einerseits auf bereits bestehende (Teil-)Modelle zurückgreifen und diese selbständig durch Hinzufügen, Entfernen oder Konfigurieren der Modellierungsbausteine im Modell den neuen Gegebenheiten anpassen kann. Andererseits können mit den zur Verfügung gestellten Bausteinen in einem zeitlich überschaubaren Rahmen Modelle neu aufgebaut werden. In jedem Fall müssen die Bausteine so gestaltet sein, dass sich der Anwender – also der Planer – in seine Begriffswelt wiederfindet und so die Integration der Simulation in den betrieblichen Planungsprozess vorantreibt. Da den Modellierungsbausteinen und den Referenzmodellen eine zentrale Rolle zukommt, gehen Kapitel 6 und Kapitel 7 näher auf diese Thematik ein.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird unter der webbasierten Simulation also ein Dienst zur Planung und Bewertung von Produktions- und Logistiksystemen mittels ereignisdiskreter Simulation verstanden, der durch Nutzung des Internets oder eines Intranets als Kommunikationsmedium angeboten bzw. in Anspruch genommen wird. Hierzu zählen die Modellierung, Parametrisierung und Auswertung sowie die Erzeugung, Ausführung und Datenhaltung von Simulationsmodellen unter Verwendung einer Client-Server-Architektur. (vgl. Bild 6-4).



**Bild 6-4:** Begriffsverständnis der webbasierten Simulation im Rahmen dieser Arbeit

Das Konzept der webbasierten Simulation kann einerseits kleinen und mittelständischen Unternehmen den Zugang zur Simulation erheblich erleichtern. Ähnlich wie beim *Application Service Providing* wird es den Unternehmen somit ermöglicht, über öffentliche Netze auf die von einem Dienstleister betriebene Simulationssoftware zuzugreifen. Es ergeben sich aber auch erhebliche Vorteile bei einem firmeninternen Einsatz, da hier beispielsweise Kosten eingespart und Daten zentral zugänglich gemacht werden können. Eine detaillierte Beschreibung der Eigenschaften der webbasierten Simulation erfolgt im folgenden Abschnitt. [6] [45]

### 6.2.2 Eigenschaften der webbasierten Simulation als unternehmensexterne Dienstleistung

Die Simulation als webbasierte Dienstleistung beherbergt eine ganze Reihe an Vorteilen. Beim unternehmensexternen Einsatz wird durch einen Dienstleister die Simulationsanwendung betrieben und dem Kunden über öffentliche Netze angeboten. Es handelt sich hier um einen verteilten, verwalteten und vermieteten Zugang für eine auf einem Server zentral gehaltene Simulationsanwendung. Dabei übernimmt der Dienst-

leister nicht nur sämtliche Administrationsaufgaben, wie Sicherheits- oder *Softwareupdates*, sondern stellt auch die Modellierungsumgebung zur Verfügung. Je nach Bedarfsfall kann beim Dienstleister auch die Speicherung der Simulationsdaten und Ergebnisse oder der Simulationsmodelle stattfinden.

Auf Nutzerseite (Kunde) liegt der große Vorteil im abschätzbaren Aufwand, da lediglich für den unmittelbaren Simulationseinsatz Kosten anfallen. Im Speziellen liegen die Vorteile aber darin, dass die Kunden keine Software auf ihrem Rechner installieren und warten müssen und bei Zugriff auf die Anwendung stets die aktuellste Version der Modellierungs- und Simulationsumgebung zur Verfügung haben. Dies betrifft die Anwendung selbst, aber auch deren Dokumentation. Durch den Zugriff auf die Simulation mit einem kostenlosen oder mit dem Betriebssystem standardmäßig zur Verfügung gestellten Webbrowser ist es zudem unerheblich, welche Computerplattform oder welches Betriebssystem vom Anwender verwendet wird. Da keine Simulationsanwendung auf den eigenen Computern installiert wird, fallen auch keine einmaligen und laufenden, meist hohen, Lizenz- sowie Wartungskosten an und es besteht sogar die Möglichkeit, auf Simulatoren alternativer Hersteller zuzugreifen. Durch die Bereitstellung der Anwendung über das Internet durch einen Dienstleister können die Anwender unmittelbar Erweiterungen und Verbesserungen erhalten und so beispielsweise von einer Fehlerkorrektur sofort profitieren, sobald diese serverseitig durchgeführt wurde.

Aber auch aus Anbietersicht (Simulationsdienstleister) hat die webbasierte Simulation einige Vorteile. Diese ergeben sich vor allem aus der schnellen Distribution der Anwendung und der sich daraus ergebenden Kostenvorteile. Zudem ermöglicht eine webbasierte Simulationsanwendung den besseren Schutz des intellektuellen Kapitals, das sich im Speziellen in den dem Nutzer zur Verfügung gestellten Modellierungsbausteinen verbirgt. Der Simulationsanbieter kann also sein Know-how, das im Programmcode der Modellierungsumgebung und der Bausteinbibliothek steckt, leichter schützen, da beispielsweise der Nutzer auf Funktionen und Algorithmen keinen direkten Zugriff hat. Diese befinden sich auf Servern, deren Zugriff geregelt werden kann. Ein *Reverse-Engineering* kann daher leichter ausgeschlossen werden. Die Kostenvorteile bei der Verteilung liegen beispielsweise darin, dass die physische Distribution der Anwendung und der Dokumentation entfällt sowie die aufwändige Verfolgung abgelauener Lizenzen. Zudem ist der Änderungsaufwand bei einer Web-Applikation gering. Auch ist Neukundenakquisition leichter, da die Möglichkeit besteht, dem Kunden ohne komplizierte und aufwändige Installation die Anwendung zu Demonstrationszwecken zur Verfügung zu stellen.

Im Folgenden sind die wesentlichen Vorteile der Simulation als webbasierte Dienstleistung zusammengefasst:

- Schnelle und kostengünstige Verteilung der Simulationsanwendung
- Direkte Bereitstellung neuer Modellierungsbausteine
- Unkomplizierte Behebung fehlerhafter Funktionen und Module
- Simulatorunabhängigkeit
- Plattformunabhängigkeit
- Skalierbare Rechnerressourcen
- Vereinfachung der Kundengewinnung
- Leichter Schutz aufwändig entwickelter Funktionen und Algorithmen

### **6.2.3 Eigenschaften der webbasierten Simulation bei unternehmensinternem Einsatz**

Nicht nur für kleine und mittelständische Unternehmen bilden die Möglichkeiten und Eigenschaften der webbasierten Simulation große Vorteile gegenüber einzeln installierten Softwaresystemen, sondern auch für große Unternehmen mit meist international verteilten Standorten und eigenem Intranet.

Im Vordergrund stehen wiederum die Kosteneinsparungspotenziale, die eine zentral zur Verfügung gestellte Simulationsanwendung beherbergen. So können beispielsweise Lizenzkosten eingespart werden, da durch die Bündelung die Nutzung der einzelnen Simulationslizenzen erhöht werden. Dies kann zu einer Verringerung der im Unternehmen eingesetzten Lizenzen zur Folge haben. Ein weiterer Vorteil der webbasierten Simulation ist der reduzierte Wartungsaufwand, denn die simulatorspezifischen Wartungsarbeiten, wie Softwareupdates oder Sicherheitspatches, müssen nur serverseitig durchgeführt werden. Somit ist sichergestellt, dass jeder Anwender im Unternehmen auf die gleiche Softwareversion zurückgreift. Denn bei Einzelinstallationen wäre es so, dass auf jedem Rechner ein Softwareupdate separat aufgespielt werden muss, so entsteht die Gefahr, dass an einem Modell mit unterschiedlichen Simulatorversionen gearbeitet wird. Ähnlich wie beim unternehmensexternen Szenario kann auch bei unternehmensinternem Einsatz der webbasierten Simulation die Plattformunabhängigkeit eine große Rolle spielen. Speziell in heterogenen IT-Umgebungen bieten sich für die Integration der Simulation bisher nicht da gewesene Möglichkeiten.

Sie wird auch beim unternehmensinternen Einsatz dadurch erreicht, dass auf die Simulation über einen standardmäßigen Webbrowser zugegriffen wird.

Auch die Ortsunabhängigkeit und die zentrale und gemeinsame Datenhaltung versprechen Vorteile. So können ganze Anwender-Teams immer auf die aktuellste Modellvariante oder den Eingabedaten zurückgreifen, auch wenn sie örtlich verteilt sind. Ein semikollaboratives Arbeiten wird somit ermöglicht. Siehe hier auch den Grundgedanken der Digitalen Fabrik. Auch diese steht und fällt mit der zentralen Datenhaltung. Die webbasierte Simulation kann demnach einen Weg aufzeigen, die Materialflusssimulation in die Methode der Digitalen Fabrik zu integrieren. Zur Simulation im Umfeld der Digitalen Fabrik sei auf das Unterkapitel 3.2 verwiesen. [46]

Im Folgenden sind die wesentlichen Vorteile der Simulation als unternehmensinterne Anwendung zusammengefasst:

- Plattformunabhängig → Simulationseinsatz bei heterogener Systemlandschaft
- Ortsunabhängigkeit → Zugänglich von jedem global verteilten Standort
- Möglichkeit der zentralen Datenhaltung → kollaboratives Arbeiten
- Jeder hat gleiche Softwareversion, reduzierter Wartungsaufwand
- Bündelung von Softwarelizenzen → Lizenzeinsparungen, da vorhandene besser ausgelastet werden können
- Skalierbare Rechnerressourcen

### **6.3 Architektur einer anforderungsgerechten Kommunikations- und Informationsstruktur**

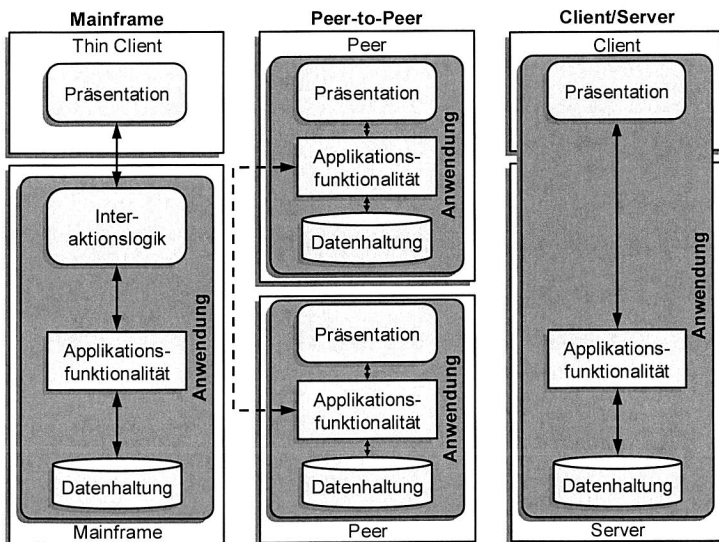
Ist von Architektur die Rede, wird dies meist mit dem gestalteten Aufbau oder auch dem Stil eines Gesamtwerkes assoziiert. Dies gilt nicht nur in der Baukunst, sondern insbesondere für die Informations- und Kommunikationstechnologie (IuK-Technologie). Die Architektur gibt vor, wie ein komplexes Gebilde gestaltet ist und wie dieses zu realisieren ist. In der IuK-Technologie stellt die Architektur somit einen Teilprozess bei der Systementwicklung und -realisierung dar, denn sie beschreibt den strukturellen Aufbau eines Systems mit den einzelnen Elementen und deren Relationen zueinander. Zur weiteren Erläuterung der Begriffe System und Systemelemente sei auf das Kapitel 4 verwiesen. Demzufolge besitzt die Architektur in der IuK-Technologie beschreibende und vorschreibende Eigenschaften. [53] [64] [34] [49]

Die folgenden Abschnitte behandeln ausgewählte Architekturstile von Anwendungssystemen die über das Internet kommunizieren und stellen die Hauptkomponenten heraus. Zudem werden die Konzepte der Client-Hosted- und der Server-Hosted-Simulation auf Basis der Client/Server-Architektur erläutert und ein mehrschichtiges Architekturkonzept zur webbasierten Simulation vorgestellt. Eine Einführung des Begriffs des Datenbanksystems beendet das Unterkapitel.

### 6.3.1 Architekturstile und –schichten zur webbasierten Simulation

Technisch betrachtet macht es bei der Anfertigung des Konzepts für die webbasierte Simulation kaum einen Unterschied, ob das System als unternehmensexterne oder unternehmensinterne Anwendung zur Verfügung gestellt wird, da die verwendeten Techniken eines betriebseigenen Intranets auf denen des Internets basieren. Lediglich die Größen der Netzwerkverbunde ist zu unterscheiden.

Die Wahl eines geeigneten Architekturkonzepts ist aber nicht allein von den verwendeten Internet- bzw. Netzwerktechniken abhängig, sondern wird auch wesentlich von den zu integrierenden Anwendungen, sprich der Simulation, und der Wahl der Datenhaltung beeinflusst. Die Entwicklung eines geeigneten Konzepts hängt auch von der Entscheidung des verwendeten Architekturstiles ab. Bild 6-5 zeigt mögliche Architekturstile webbasierter Anwendungssysteme:



**Bild 6-5:** Alternative Architekturstile zur Integration netzwerkfähiger Anwendungen



Unter den unterschiedlichen Architekturen stellt die Mainframe-Architektur wohl das älteste Schema dar und entstammt einer Zeit, als die Computer noch große und teure Rechner waren. Die Architektur zeichnet sich derart aus, dass über Terminals, den so genannten Thin-Clients, auf Mainframes zugegriffen wird, auf denen wiederum die Applikationen ausgeführt werden. Die Terminals bestehen hierbei in der einfachsten Form aus einem Bildschirm und einer Tastatur und dienen als Ein- und Ausgabe-schnittstelle zwischen Benutzer und Mainframe, sprich der Anwendung. Im Gegensatz zur Client/Server-Architektur kann ein Client nicht mit unterschiedlichen Servern kommunizieren. Mainframe und ein angeschlossener Thin-Client sind als eine fest gekoppelte Einheit anzusehen.

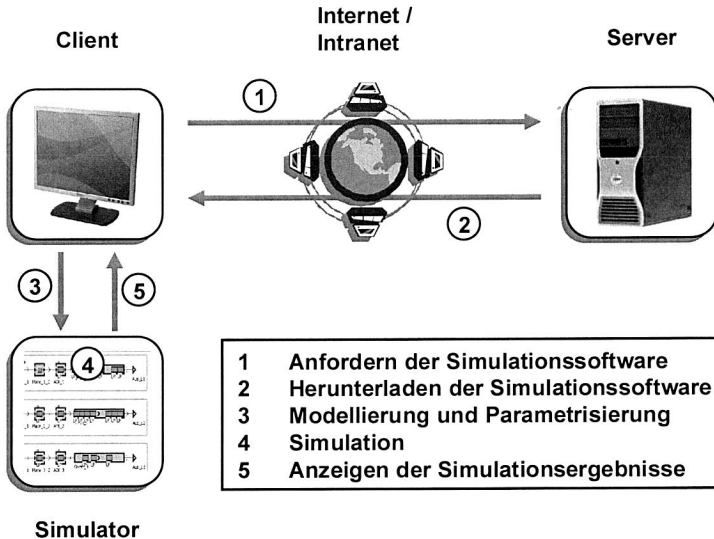
Beim Konzept des Peer-to-Peer (P2P) kommunizieren in der Regel identische Anwendungen miteinander, die dezentral auf unterschiedlichen Rechnern in einem Netzwerk verteilt sind. Dabei sind alle Peers gleichberechtigt und können einerseits Anfragen anderer Peers bearbeiten als auch Anfragen an andere Peers stellen. Ein Peer-to-Peer-Netzwerk hat zwar den Vorteil, dass die Datenverarbeitung bei geringer und mittlerer Belastung schnell und effizient ablaufen, aber bei starker Belastung einzelner Peers auch das gesamte Netzwerk ausfallen kann, da keine zentrale Steuerinstanz eingreifen könnte. [33] [49]

Das System der Client/Server-Anwendungen wurde bereits im Abschnitt 0 vorgestellt. Zur Vervollständigung sei hier noch einmal auf die Client/Server-Architektur eingegangen, die auch als Architektur der verteilten Intelligenz gesehen werden kann. Sie zeichnet sich derart aus, dass ein sich im Netzwerk befindlicher Server eine Anwendung zur Verfügung stellt, die er einem Client auf dessen Anfrage zur Bearbeitung einer Aufgabe bereitstellt. Der große Vorteil der Client/Server-Architektur liegt in der zentralen Bereitstellung der Anwendungen und Daten, die allen Clients in einem „offenen“ Netzwerk wie dem Internet zur Verfügung stehen. In welcher Art und Weise die Arbeitsverteilung zwischen Client und Server realisiert wird, hängt wiederum davon ab, ob die vom Client angeforderte Anwendung clientseitig oder serverseitig ausgeführt wird. Die beiden folgenden Abschnitte erläutern daher die Alternativen direkt am Beispiel der webbasierten Simulation.

### **Client-Hosted- und Server-Hosted-Simulation**

Bei der *Client-Hosted-Simulation*, werden alle zur Simulation notwendigen Rechenvorgänge auf den *Clients* durchgeführt. Der *Server* dient dazu, die notwendigen Simulationsanwendungen, beispielsweise in Form eines Java Applets, zur Verfügung zu stellen. Die für die Simulation notwendige Rechenleistung wird vom *Client* erbracht, wes-

halb diese Methode aus Sicht des *Servers* besonders ressourcenschonend ist (vgl. Bild 6-6).

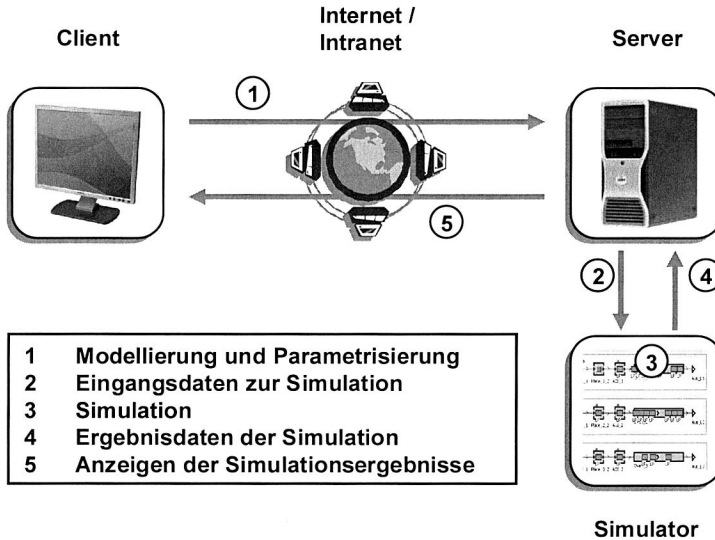


**Bild 6-6:** Konzept der *Client-Hosted-Simulation*

Dieses Konzept lässt sich jedoch nur für proprietäre Simulationswerkzeuge mit geringem Umfang verwenden und ist in Verbindung mit dem Einsatz kommerzieller Simulatoren wegen deren Komplexität und Größe nicht geeignet.

Einen weiteren Ansatz bietet das serverorientierte Architekturkonzept. Es basiert auf der Annahme einer zentral ausführbaren Simulationsapplikation, die sich auf einem Server befindet bzw. nicht auf dem *Client* direkt zur Ausführung kommt. Die technische Grundlage hierfür bietet das *Server-Based-Computing* oder auch *Client-Server-System*, das eine zentrale Bereitstellung von *Client-/Server-Anwendungen* auf leistungsfähigen Servern ermöglicht. Ein *Client-Server-System* besteht somit aus zwei logischen Teilen: einem oder mehreren *Clients*, die die Dienste oder Daten eines *Servers* in Anspruch nehmen sowie dem *Server*, der diese Dienste und Daten zur Verfügung stellt. Somit wird auch auf Rechnern mit geringer Leistung die Nutzung ressourcenaufwendiger Software möglich. Der Simulationsserver, der physisch von dem ebenfalls notwendigen *Webserver* getrennt sein kann, wird hierbei von einem oder mehreren *Clients* angesprochen. Alle zur Simulation erforderlichen Informationen und Daten werden von den *Clients* an den *Webserver* übertragen, der die Simulationser-

gebnisse seinerseits an die *Clients* übergibt. Bild 6-7 zeigt den grundsätzlichen Aufbau des *Server-Hosted-Simulation*-Konzepts.



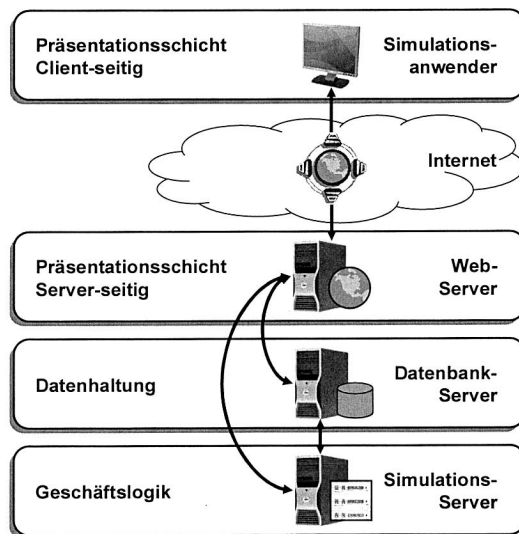
**Bild 6-7:** Konzept der *Server-Hosted-Simulation*

Im Vergleich zum Konzept der *Client-Hosted-Simulation* ist der Ansatz der *Server-Hosted-Simulation* aufgrund der Struktur für die Verwendung komplexer Simulatoren sehr gut geeignet. Aus technischer und wirtschaftlicher Sicht werden zudem die oben angeführten Anforderungen an die webbasierte Simulation im Grunde erfüllt, beziehungsweise schließen diese nicht aus. So kann aus technischer Sicht durch das zentral aufgebaute, serverorientierte Netzwerk der Aufwand für die Administration und die Wartung relativ gering gehalten werden. Eine Administration und Wartung der Client-rechner muss nicht erfolgen, da beispielsweise die Modellierung und Parametrisierung der Simulationsmodelle mit einem plattformunabhängigen und standardmäßigen Webbrowser durchgeführt wird. Auch entfällt die aufwändige Installation und Konfiguration, wie für leistungsfähige Spezialsoftware oft üblich, komplett. Ein weiterer Vorteil dieses Architekturkonzepts liegt in den geringen Kosten. Durch die zentrale Dienstleistung müssen auch die hoch leistungsfähige Hardware sowie die lizenzkostenintensive Simulationssoftware nur noch an zentralen Stellen zur Verfügung stehen. Durch effiziente Auslastung sind hier Einsparungen zu erzielen. Generell ist dieses Konzept sehr gut geeignet, die Simulation mittels einer Internetdienstleistung Anwendern zur Verfügung zu stellen. Dabei handelt es sich beim Server um einen Dienstbringer der Simulations-

distribution und beim *Client* um einen Dienstnehmer, der den Simulationsservice in Anspruch nimmt. Beide interagieren nach einer Art Anfrage-Antwort-Schema.

### 6.3.2 Ein mehrschichtiges Architekturkonzept zur webbasierten Simulation

Baut man das prinzipielle Konzept der *Server-Hosted-Simulation* hinsichtlich hoher Modularität, guter Wartbarkeit und auch einer potenziellen Skalierbarkeit aus, muss eine klare und logische Strukturierung hervorgehen. Das Konzept sieht, wie bei modernen Anwendungssystemen auch, eine mehrschichtige Architektur (*multi-tier architecture*) vor, bei der die Anwendungen des Systems in mehrere diskrete Komponenten aufgeteilt werden. Bereits die Bezeichnung „Mehrschichtige Architektur“ lässt dabei vermuten, dass die Anwendungen in Lagen bzw. Schichten aufgeteilt werden. Die Aufteilung erfolgt dabei in eine Präsentations-, eine Geschäftslogik- und eine Datenhaltungsschicht. Beim Konzept der webbasierten Simulation erfolgt auf der Client-Seite die Modellierung und Präsentation, auf der Server-Seite entsteht die Geschäftslogik (Simulationsserver) und die Datenhaltung (Datenbankserver), die strikt voneinander getrennt sind (vgl. Bild 6-8). [34]



**Bild 6-8:** Mehrschichtiges Architekturmodell zur webbasierten Simulation

Die mehrschichtige Architektur erlaubt es zudem, die Bestandteile nicht nur logisch, sondern auch physisch zu verteilen. Dies ermöglicht die Trennung der Datenhaltung von der Simulationsanwendung und es können sogar unterschiedliche Datenbanksys-

teme und Simulationsanwendungen integriert werden. Zudem können zur Leistungssteigerung bei großen Benutzerzahlen Simulations- und Datenbankserver auch auf mehrere physikalische Systeme verteilt werden.

Die *Server*-seitige Präsentationsschicht, vertreten durch einen Web-Server, der eigenständige Programme aufrufen kann, ist es zudem möglich, nicht nur statische HTML-Seiten an den Browser des *Clients* zu schicken, sondern es ist auf diese Weise auch möglich, HTML-Seiten auf dem Web-Server dynamisch zu erzeugen. Die Aufteilung der Präsentationsschicht erfolgt somit in einen *server*-seitigen Teil für die Generierung der Oberfläche in HTML und einem *client*-seitigen Anteil zur deren Anzeige in einem Browser. Dies bildet die Grundlage für die dynamische Modellierung, Parametrisierung und Simulationsergebnisanzeige in einer Web-Anwendung, d. h. in einem plattformunabhängigen Webbrowser.

Somit hat dieses Konzept den großen Vorteil, dass auf dem Client, außer dem Browser, keine spezielle Software erforderlich ist und somit keine Einzelinstallationen inklusive der damit bereits mehrfach erläuterten Nachteile notwendig ist. Weiterhin liegt der große Vorteil der mehrschichtigen Architektur in ihrer guten Skalierbarkeit, da die einzelnen Schichten logisch voneinander getrennt sind. Dies bringt auch erhebliche Vorteile bei der Wartung und Entwicklung von Systemen mit sich, da die einzelnen Schichten relativ leicht ausgetauscht werden können.

### 6.3.3 Datenbanksysteme

Generell bieten sich Datenbanken an, um Informationen strukturiert ablegen zu können. Die ersten entstanden bereits in den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts und fanden mit der Entwicklung der ersten relationalen Datenbanken in den 70ern einen breiteren Einsatz, der sich bis heute stetig ausgebaut hat [54]. Eine Datenbank besteht prinzipiell aus einer beliebigen Anzahl an strukturierten Datensätzen, die wiederum Informationen über bestimmte Objekte beinhalten. Die Datensätze werden für gewöhnlich in Form von Tabellen abgelegt, die aus der Tabellenstruktur, den so genannten Attributen und den Inhalten, sprich Datensätzen besteht. Um mit der Datenbank arbeiten zu können, bedarf es eines Datenbankmanagementsystems (DBMS). Dieses ermöglicht einerseits das Anlegen, Ändern und Löschen der Attribute sowie andererseits das Einfügen, Ändern und Löschen von Datensätzen. Zudem ermöglicht es das Abfragen von Datensätzen. Die Kombination der Datenbank mit einem DBMS bildet ein Datenbanksystem. [81]

Typische Vertreter von Datenbanksystemen sind beispielsweise *Oracle*, der *Microsoft SQL-Server* oder auch *MySQL*. Diese Systeme haben gemeinsam, dass sie eine

Client/Server-Architektur besitzen und somit grundsätzlich netzwerk- bzw. internetfähig sind. Einfachere Stand-alone-Lösungen bzw. File-Server-Systeme, wie beispielsweise *Microsoft Access* oder *dBase* stoßen im Netzwerkbetrieb an ihre Grenzen. [102]

#### 6.4 XML-basierte Modell- und Datenübertragung

Zur Durchführung einer Simulationsstudie werden einerseits umfassende Informationen benötigt und andererseits werden Daten in Form von Simulationsergebnissen erzeugt. In Verbindung mit der webbasierten Simulation ist es daher nicht nur erforderlich, dass die Eingabewerte und die Resultate der Simulationsläufe systematisch abgelegt werden, vielmehr müssen diese Informationen auch vom Anwender zum Simulationssystem und wieder zurück transportiert werden. [82]

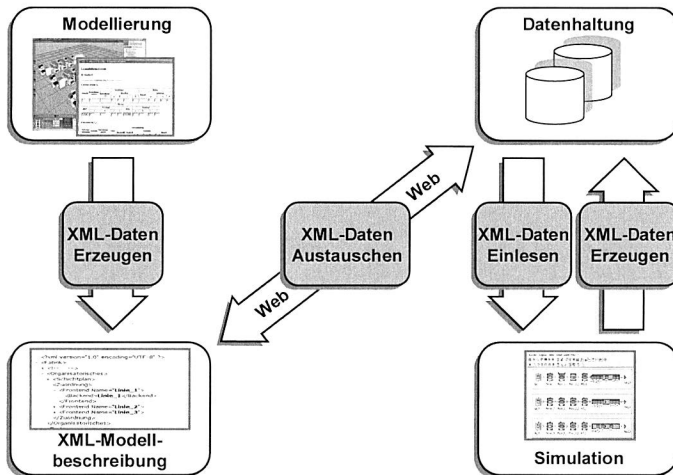
Das im vorherigen Unterkapitel vorgestellte mehrschichtige Architekturkonzept zu webbasierten Simulation beinhaltet eine Schicht zur Datenhaltung. Diese kann auf vielfältige Weise geschehen. Zum Beispiel kann ein Datenbanksystem dazu eingesetzt werden, die anfallenden Datenmengen zuverlässig zu speichern und über das Internet abfragen zu lassen.

Gerade in Verbindung mit Internettechnologien erfreut sich aber auch die Auszeichnungssprache XML (*Extended Markup Language*) großer Popularität. XML ist einerseits eine Methode, mit der Daten (semi-)strukturiert dargestellt oder ausgetauscht werden können und andererseits bietet es auch die Möglichkeit, Daten zu speichern. Auszeichnungssprache heißt, dass die in dieser Dokumentform abgelegten Informationen selbstbeschreibend sind. [57]

Weiterhin können durch die Verwendung von DTDs (*Document Type Definitions*) Regeln für die Erstellung spezifischer Dokumente vorgegeben und diese zur Validierung von XML-Dateien herangezogen werden. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass Dateien, die etwa zum Austausch von Informationen dienen, einer vorgegebenen Struktur folgen und somit fehlerfrei verarbeitet werden können. Des Weiteren erfolgt eine inhaltliche Validierung der Dokumente durch den Einsatz so genannter XML-Schemata, wodurch z. B. die Eingabe des korrekten Datentyps gewährleistet ist. Für eine webbasierte Referenzierung können XML-Schemata direkt auf dem Webserver abgelegt werden. [69]

Sowohl der webbasierte Datenaustausch als auch die Verwendung von XML-Schnittstellen für den Datenimport und -export zwischen modernen Softwareanwendungen sind aktuelle Beispiele für die Leistungsfähigkeit von XML. Der Austausch kann hierzu textbasiert in Form von einfachen Kommunikationsmechanismen erfolgen.

XML bietet sich somit auch an, Simulationsmodelle und Modellinformationen strukturiert auszutauschen, zu speichern und darzustellen. [84][30]



**Bild 6-9:** Konzept des Modell- und Informationsaustausches mit XML bei der webbasierten Simulation

Bild 6-9 stellt ein Konzept zum webbasierten Austausch und Speicherung von Simulationsmodellen und -informationen mit XML dar. Die Umsetzbarkeit des dargestellten Konzepts wurde anhand des Moduls zur Layoutplanung des webbasierten Planungssystems *@webplan* sichergestellt. Dieses stellt zunächst eine Anwendung dar, die es ermöglicht, dreidimensionale Layoutplanungen unter Verwendung einer integrierten VRML-Umgebung webbasiert durchzuführen. Dort ist es unter anderem möglich, mehrere Objekte in die Umgebung einzufügen, zu positionieren, zu drehen und zu skalieren. Darüber hinaus steht eine Kollisionserkennung zur Verfügung, die z. B. das direkte Platzieren von Objekten nebeneinander ermöglicht. Sämtliche Objekte, wie Maschinen, Transport- oder Lagereinrichtungen, werden aus einer XML-basierten Objektbibliothek ausgewählt und in das Layout eingefügt. Das Planungsergebnis kann zentral auf dem Server gespeichert und von beliebigen Orten geöffnet werden, wodurch zudem ein kollaboratives Arbeiten ermöglicht wird. [106] [28] [30]

Um die bereits existierende Planungsanwendung für die webbasierte Simulation zu nutzen, ist diese hinsichtlich Dateneingabe und -übertragung zu erweitern.

Hierzu sind die für die Simulation benötigten Eingabedaten in drei Kategorien eingeteilt. Zum einen existieren Daten, die fest mit bestimmten Maschinen- bzw. Anlagenbestandteilen verknüpft sind, wie beispielsweise die Länge eines Transportbands. Hierzu ist die XML-Datei, die bisher auf Zusatzinformationen wie Preis, Gewicht oder

Bestellnummer eines Objekts beschränkt war, um simulationsrelevante Datenfelder erweitert worden. Die zweite Kategorie umfasst Daten, die direkt aus dem erzeugten Layout hervorgehen. Hierzu zählen in erster Linie Positionsangaben sämtlicher Maschinen und vor allem die Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen. Die dritte und umfangreichste Datengruppe beinhaltet auftrags- und produktbezogene Informationen sowie maschinenspezifische Daten, die individuell für jeden Simulationslauf eingegeben werden müssen. Dies sind typischerweise Bearbeitungs-, Rüst- und Störzeiten oder Kapazitäten, die in entsprechende Masken einzugeben sind.

Eine PHP-Anwendung erzeugt aus den übertragenen Angaben eine XML-Datei, die an die Erfordernisse der Ablaufsimulation angepasst ist. Somit können aus den gesammelten Daten jeweils eine oder mehrere projektspezifische XML-Dateien für Produkt, Auftrag und Anlage erstellt werden. Darin enthalten sind die Eingangsinformationen, die von der Simulation erwartet und zur Verarbeitung herangezogen werden.

Wie hier erläutert, besitzt XML viele positive Eigenschaften bezüglich der strukturierten Beschreibung von Modellen und Informationen für die webbasierte Simulation. Dennoch stellt sich die Frage, ob diese Methode den Anforderungen an die Speicherung von Massendaten gerecht wird, die eine Simulation erfordert bzw. die durch die Simulation erzeugt werden.

## **6.5 Modellierung unter Verwendung von Bausteinbibliotheken**

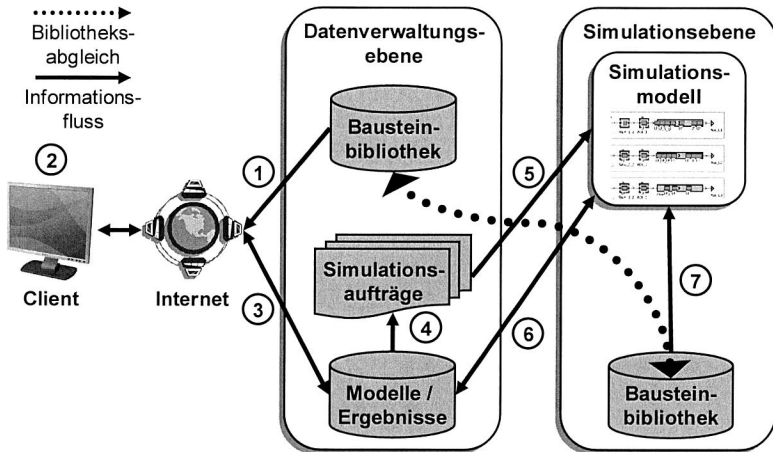
Wie bereits im Kapitel 4 erläutert kann unter Verwendung bzw. mit der Bereitstellung von Bausteinbibliotheken oder Referenzmodellen die Erstellung von Modellen erheblich vereinfacht und beschleunigt werden. Dies gilt insbesondere für vordefinierte und sich wiederholende Planungsaufgaben sowie für Anwender, die nur wenig Erfahrung im Umgang mit der Modellierung haben.

Bei der klassischen Simulationsanwendung ist die Erzeugung und Änderung der Modellierungsbausteine allerdings stark an den Simulator gekoppelt, da die Bausteinbibliothek in der verwendeten Umgebung erstellt wurde. Für die webbasierte Variante gilt es, einen anderen bzw. erweiterten Lösungsansatz zu finden, da hier die Simulatorunabhängigkeit gewahrt bleiben soll und der Nutzer keinen direkten Zugriff auf die Simulationsanwendung und somit auf die Modellierungsbausteine haben soll.

Die Lösung sieht hier eine umfangreiche Bibliothek logistischer Modellierungskomponenten vor, die von der Datenhaltungsschicht zur Verfügung gestellt werden und somit vom Simulator entkoppelt sind. Diese Bibliothek beinhaltet eine Sammlung definierter Objekte, die im Rahmen der Konfiguration ausgewählt und parametrisiert werden können (1 und 2). Die so durch den Anwender auf der Client-Seite vorgenommene Konfi-



guration enthält die ausgewählten Bausteine, deren Verknüpfung untereinander sowie die jeweils individuelle Parametrisierung der Modellkomponenten, welche dann in der serverseitigen Datenhaltung gespeichert werden (3) und das Modell zum Simulieren freigibt (4). Diese Technik ermöglicht es, durch die Aneinanderreihung der zur Verfügung gestellten Bausteine ein Modell des zu simulierenden Produktionssystems zu erstellen. Bekommt der Simulator ein Signal, dass ein neues Modell zu verarbeiten ist (5), und dieser bereit ist, greift er auf die Datenhaltung zu, um sich das entsprechende Modell zu holen (6). Gemäß dieser Modellbeschreibung erstellt dann der Simulator ein Modell mit simulatorspezifischen Modellelementen und verarbeitet dieses (7).



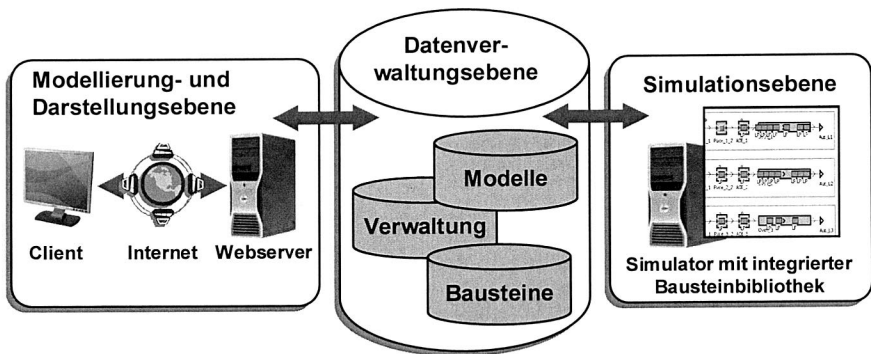
**Bild 6-10:** Zusammenhang zwischen simulatorunabhängiger Modellierung und Erstellung des Simulationsmodells

Bei jedem Simulationsstart entnimmt der Simulator somit die erforderlichen Bausteine aus der simulatorspezifischen Bibliothek und versieht diese mit den auftragsbezogenen Parametern. Das Konzept sieht somit eine automatisierte Modellerstellung innerhalb des Simulators vor.

Der Abgleich der beiden Bausteinbibliotheken kann entweder über eine zuvor definierte Schnittstelle erfolgen oder auch manuell, so dass dem Anwender die zu verwendenden Bausteine zur Verfügung stehen. Das heißt, die Inhalte der simulatorspezifischen Bausteinbibliothek müssen exportiert werden können und sämtliche Informationen enthalten. Ist eine Schnittstellenlösung, wie sie eben beschrieben wurde, aufgrund mangelnder Exportmöglichkeiten des Simulators nicht möglich, ist parallel zur Bibliothekspflege innerhalb der Simulationsapplikation für jeden Baustein ein zusätzlicher Datensatz in der Datenhaltungsschicht anzulegen.

## 7 Aufbau und prototypische Umsetzung einer webbasierten Anwendung zur Simulation von Produktionsprozessen in der Elektronik

In Kapitel 6 wurden für die webbasierte Simulation alternative Architekturprinzipien vorgestellt und auf Basis der Client/Server-Architektur ein entsprechendes Konzept herausgearbeitet. Im folgenden Kapitel wird nun anhand einer prototypischen Anwendung nachgewiesen, dass das erarbeitete Grundkonzept zur webbasierten Simulation auch realisierbar ist. Für die exemplarische Umsetzung wird die Simulation von Bestücklinien in der Elektronikproduktion herangezogen. Die Basis hierfür bildet die Entwicklung und Integration einer anwenderorientierten Bausteinbibliothek. Bild 7-1 stellt den grundsätzlichen Aufbau des Systems schematisch dar, bei dem zwischen den drei Ebenen zur *Modellierung und Darstellung*, zur *Datenverwaltung und Kommunikation* sowie zur *Simulation* unterschieden wird. Der Anwender interagiert dabei lediglich mit der Modellierungs- und Darstellungsebene. Die Datenverwaltungsebene übernimmt die Aufgaben der Datenhaltung und bildet zudem die Schnittstelle zwischen den einzelnen Ebenen.



**Bild 7-1:** Prinzipskizze der Client/Server-Architektur zur exemplarischen Umsetzung eines webbasierten Simulationsdienstes

Der Prozess zur Modellierung und Simulation ist so gestaltet, dass ein Anwender über eine Internetplattform Zugriff auf das webbasierte Simulationssystem hat. Durch die Interaktion können so verschiedene Operationen, wie beispielsweise die Erstellung neuer und die Aktualisierung bestehender Modelle oder der Abruf von Simulationsergebnissen, durchgeführt werden. Für die Umsetzung der Modellierungs- und Darstellungsebene kommt die Scriptsprache PHP zum Einsatz. Die Datenverwaltungsebene

ist durch Verwendung einer MySQL-Datenbank realisiert. Als Simulator wird *Plant Simulation* aus der Siemens PLM-Familie verwendet.

## **7.1 Bausteinbibliothek zur Modellierung von Abläufen in der Elektronikproduktion**

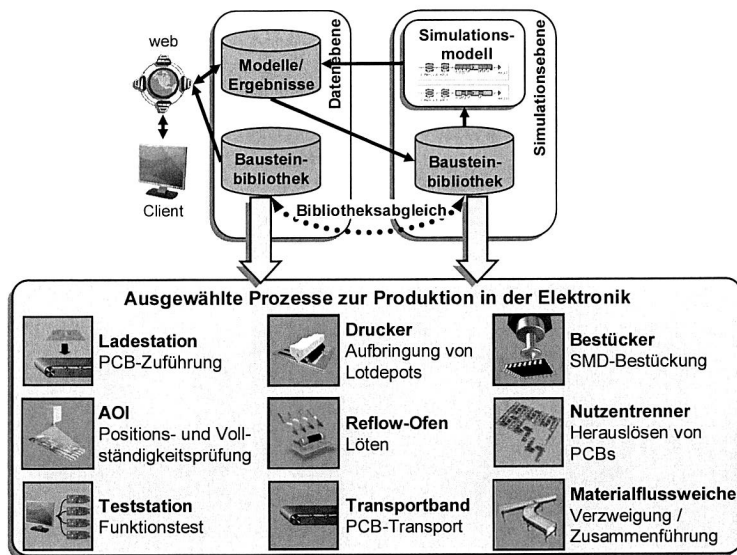
Die Thematik der Referenzmodellierung wird innerhalb dieser Arbeit mehrmals unter den jeweils spezifischen Gesichtspunkten behandelt (vgl. Kapitel 4, Kapitel 5 und Kapitel 6). Dabei werden die Eigenschaften der Referenzmodellierung im Allgemeinen und die Potenziale der Modellierung im Speziellen herausgearbeitet. Das Unterkapitel 6.5 stellt dabei ein Konzept vor, wie eine entsprechende Bausteinbibliothek in ein webbasiertes Simulationssystem integriert werden kann.

Die in diesem Unterkapitel behandelte und in die prototypische Umsetzung integrierte Bausteinbibliothek besteht aus einer Sammlung einzelner branchenspezifischer Referenzmodelle, durch deren Kombination und Verknüpfung ein Modell zur Simulation von Bestücklinien der Elektronikproduktion aufgebaut werden kann.

### **7.1.1 Bausteinauswahl**

Die Auswahl der Bausteine und deren Entwicklung entstanden in Zusammenarbeit mit einem namhaften Mobiltelefonhersteller und orientieren sich an den Prozessen, die typisch bei der Bestückung von elektronischen Leiterplatten in Oberflächenbauweise sind. Hierzu sei auf die in Kapitel 3 beschriebene Prozesskette der Elektronikproduktion verwiesen. Auch wenn die einzelnen Prozesse der Elektronikproduktion bereits dort eingehend beschrieben werden, behandelt dieser Abschnitt dies noch einmal kurz, um die Prozesse aufzuführen, die für die exemplarische Umsetzung letztendlich ausgewählt wurden.

Bild 7-2 führt einerseits die Bausteinauswahl auf und verdeutlicht andererseits die Integration der Bausteine in das Web-System. Bei der Integration ist die duale Struktur der Bibliothek hervorzuheben. Es ist zu erkennen, dass sowohl die Datenebene als auch die Simulationsebene über eine Bausteinbibliothek verfügt. Dies beruht vor allem auf der Trennung der beiden Ebenen, durch die die geforderte Simulatorunabhängigkeit gewährleistet ist. Beim Einsatz eines alternativen Simulators müssen somit nur Anpassungen auf der Simulationsseite durchgeführt werden, das heißt im Genauen: die Anpassung der simulatorspezifischen Bausteinbibliothek und ein evtl. benötigter Parser.



**Bild 7-2:** Inhalte und Integration der Bausteinbibliothek

Die entwickelte Bausteinbibliothek besteht aus einer Ladestation, deren Aufgabe es ist, die Leiterplatten (PCB) der Bestückerlinie zuzuführen. Der (Lotpasten-)Drucker hat die Aufgabe, ein Verbindungsmedium, die Lotpads, auf die Leiterplatten aufzubringen. Prinzipiell lassen sich hier verschiedene Verfahren unterscheiden, die allerdings bei der Modellbildung für die Ablaufsimulation eine untergeordnete Rolle spielen. Durch den Leiterplattenbestücker (kurz: Bestücker) werden die einzelnen SMD's auf die Leiterplatten in die Lotpaste gesetzt. Um die Bestückqualität zu prüfen und bei Bedarf fehlerhafte Leiterplatten zu korrigieren, kann dem Bestücker ein AOI-System (Automatische Optische Inspektion) folgen. Hierunter versteht man eine optische Prüfstation, die eine unzureichende Bestückgenauigkeit oder das Fehlen von Bauelementen entdecken soll. Zudem sollen in dieser Station die fehlerhaften Leiterplatten aus dem Hauptmaterialfluss geschleust und zu einer Reparaturstation gelenkt werden. Diese Reparaturstation ist im AOI-System integriert. Der Baustein des Reflow-Ofens bildet den Lötprozess innerhalb der Bestückkette ab und ist im Sinne der Ablaufsimulation als ein kontinuierlicher Prozess ähnlich dem eines Transportbandes abgebildet. Hier wird das Lot aufgeschmolzen um eine elektrische und mechanische Verbindung zwischen den elektronischen Bauelementen und der Leiterplatte herzustellen.

Sind die zu bestückenden Leiterplatten relativ klein, so werden sogenannte Mehrfachnutzen verwendet. Das bedeutet, dass eine Leiterplatte, die durch den Bestückprozess

läuft, aus mehreren einzelnen Leiterplatten besteht. Nach dem Bestücken und Löten müssen die einzelnen Mobiltelefonleiterplatten aus dem Mehrfachnutzen mit Hilfe eines Nutzentrenners herausgelöst werden. Die in die Linie integrierte Teststation stellt die Funktionstüchtigkeit der bestückten Leiterplatte fest. Um die Leiterplatten zwischen den einzelnen Bearbeitungsstationen zu befördern, falls diese nicht direkt aneinander gekoppelt sind, ist der Baustein des Transportbandes in die Bibliothek integriert. Zudem existiert ein Baustein in Form einer Materialflussweiche, um Bypasssysteme zu modellieren.

### 7.1.2 Anlagenrelevante Zustände und Parameter

Die entwickelten Bausteine sollen dem Anwender die Modellerstellung zur Simulation von Bestücklinien ermöglichen, ohne dass er über tiefgreifende Kenntnisse der Simulationstechnik verfügen muss. Dies wird mit Hilfe ausgewählter und vordefinierter Eingabeparameter, die die einzelnen Anlagen charakterisieren und der Begriffswelt des Planers entstammen, ermöglicht. Die ausgewählten Eingabeparameter entstanden durch einen Abstraktionsprozess und basieren auf dem vom *North American Metrics Committee* anerkannten SEMI E10 [*Standard For Definition And Measurement Of Equipment Reliability, Availability And Maintainability (RAM)*], der als Standard in der Halbleiterfertigung und Elektronikproduktion gilt. Im Wesentlichen sind dies Parameter, die die Zeitdauer von Ereignissen beschreiben, wie beispielsweise die Prozesszeit oder auch das Störverhalten. Des Weiteren gilt es, die einzelnen Anlagen mit Kapazitäten und Qualitätsmerkmalen zu beschreiben. Um gerade das Störverhalten zu beschreiben, werden folgende RAM-Größen verwendet:

- *MTBF - Mean Time Between Failure*  
Durchschnittszeit, in der eine Betriebsanlage ihre eigentliche Funktion zwischen den *failures* erfüllt.
- *MTTR - Mean Time To Repair*  
Durchschnittszeit, um einen *failure* zu korrigieren und um die Betriebsanlage in einen Zustand zurückzuführen, in dem die Anlage ihre eigentliche Funktion erfüllt.
- *MTBA - Mean Time Between Assists*  
Durchschnittszeit, in der eine Betriebsanlage ihre eigentlichen Funktionen zwischen den *assists* erfüllt.
- *MTTA - Mean Time To Assists*

Durchschnittszeit, um einen *assist* durchzuführen und die Betriebsanlage in den Zustand zurückzuführen, in dem sie ihre eigentliche Funktion erfüllt.

Unter *assist* ist dabei eine unplanmäßige Unterbrechung eines Maschinenzklus zu sehen, bei der folgende Voraussetzungen gelten:

- Der unterbrochene Maschinenzklus wird durch einen äußeren Eingriff (z.B. von einem Bediener) wiederaufgenommen.
- Es wird kein Teil der Anlage ersetzt außer bestimmten Verbrauchsmitteln.
- Es gibt keine weiteren Veränderungen der Spezifikationen des Produktionszyklus.

Ein *failure* hingegen ist eine unplanmäßige Unterbrechung oder eine nichtbeabsichtigte Abweichung des Produktionsprozesses von den Spezifikationen, wenn sie nicht einem *assists* zuzurechnen ist.

*Interrupts* bilden die Summe aus *assists* und *failures*.

Bild 7-3 führt die ermittelten Parameter auf, die der Anwender zur Spezifizierung der Bausteine in seinem Modell verwenden kann.

Baustein	Eingabeparameter	Baustein	Eingabeparameter
<b>Ladestation</b>	Prozesszeit	<b>AOI / Reperatur</b>	Prozesszeit AOI
	MTBF		MTBF
	MTTR		MTTR
<b>Drucker</b>	Prozesszeit		Prozesszeit Reparatur
	MTBF		Kapazität Reparatur
	MTTR	<b>Nutzentrenner</b>	Prozesszeit
	MTTA (Reinigen)		Anzahl Leiterplatten pro Nutzen
	MTBA (Reinigen)		Bandgeschwindigkeit
<b>Bestücker</b>	Yield	<b>Transportband</b>	Kapazität
	Prozesszeit		Prozesszeit Laden
	Kapazität des Eingang	<b>Teststation</b>	Prozesszeit Entladen
	Kapazität des Ausgang		Prozesszeit Indizierung lang
	Kapazität des Tapes/Feeders		Prozesszeit Indizierung kurz
	Anzahl der abgezogenen Bauteile		MTBF
	Auslösebestand Splicen		MTTR
	Zeit Splicen		Yield
	Einlegezeit eines neuen Tapes	<b>Ofen</b>	Bandgeschwindigkeit
	Zeit Aufüllen Feeder		Kapazität
	MTBF	<b>Weiche</b>	Anzahl der Eingänge
	MTTR		Anzahl der Ausgänge
	Yield		

**Bild 7-3:** Ermittelte Parameter zur Spezifizierung der eingesetzten Modellierungsbau-  
steine

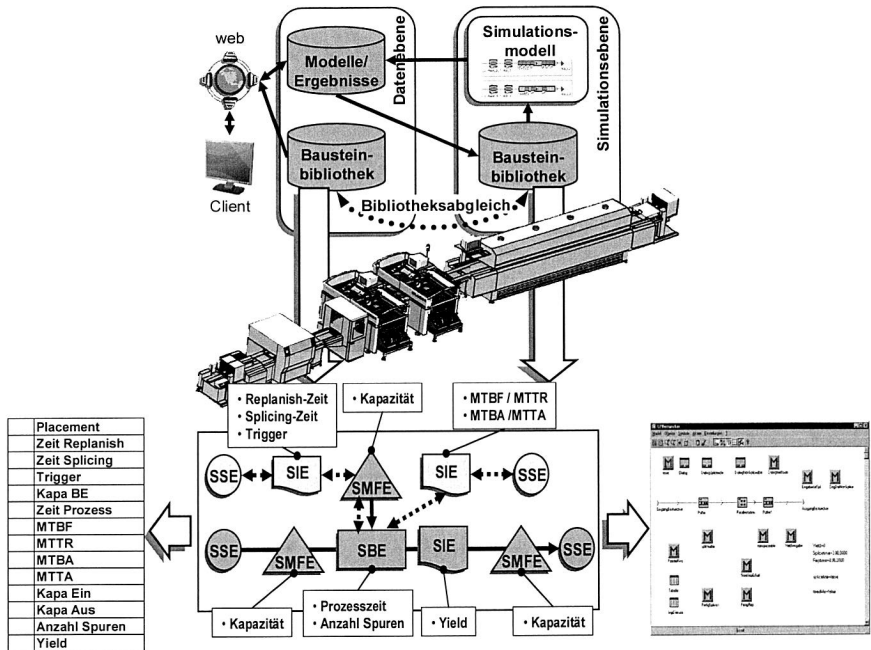
Speziell Störungen treten nicht immer in konstanten Abständen auf, und ihre Dauer ist ebenfalls nicht konstant, vielmehr sind sie statistisch verteilt. Der Anwender nimmt mit der Eingabe der Parameter MTBF und MTTR aber nur Einfluss auf die Mittelwerte der Störzeiten. Die statistischen Verteilungen sind in den Referenzbausteinen fest eingegeben und können von außen nicht verändert werden. So wurden den Referenzbausteinen im *Frontend*-Bereich für die Störzeiten jeweils Normalverteilungen angegeben mit einer Streuung von  $\sigma = 0,5$ . Im *Backend* dagegen, wurden für die Störzeiten Normalverteilungen mit einer Streuung von  $\sigma = 2,5$  angegeben. Diese empirischen Werte entsprechen den Fertigungsanlagen eines Mobiltelefonherstellers und wurden für diese Arbeit zur Verfügung gestellt. Nach Angabe des Mobiltelefonherstellers besitzt allerdings der Bestücker für die Störzeiten von den restlichen Anlagenstationen abweichende statistische Verteilungen. So wird hier für die Abstände der Störungen eine Gamma-Verteilungsfunktion angegeben mit einem  $\alpha$  von 0,56 und einem  $\beta$  von 2929,29. Die Stördauer folgt ebenfalls einer Gammaverteilung bei der  $\alpha = 0,89$  und  $\beta = 27,07$  beträgt. Bei beiden Verteilungen ist die untere Grenze gleich dem Wert Null. [105]

### 7.1.3 Bausteinmodellierung

Bei der Modellierung der Bausteine kommen die Ausführungen zur Konzeptmodellierung bzw. des Formalen Modells (vgl. Unterkapitel 4.2) zum Tragen, insbesondere aber auch die Ausführungen zur Referenzmodellierung (vgl. Abschnitt 5.1.1).

Dort wird erläutert, dass Referenzmodelle aus stationären und beweglichen Elementen bestehen und Schnittstellenelemente vorweisen können. Weiterhin sind die stationären und beweglichen Elemente nochmals in Bearbeitungselemente, Materialelemente und Informationselemente zu untergliedern.

So kommen bei Modellierung der Bausteine stationäre Materialflusselemente (SMFE), stationäre Bearbeitungselemente (SBE), stationäre Informationselemente (SIE) sowie stationäre Schnittstellenelemente (SSE) zum Einsatz. Diese bilden nicht nur die Aufbaustruktur, sondern beinhalten auch die Logik zur Ablaufstruktur. Bild 7-4 zeigt den Modellaufbau der Bausteine und ihre Integration in das Web-System am Beispiel des Bestückautomaten. Dabei ist ersichtlich, dass vom zunächst unabhängigen konzeptuellen bzw. formalen Modell ein Computermodell und die benötigte Datenbanktabelle abgeleitet werden.



**Bild 7-4:** Bauelementmodellierung und Integration in das Web-System am Beispiel des Bestückautomaten

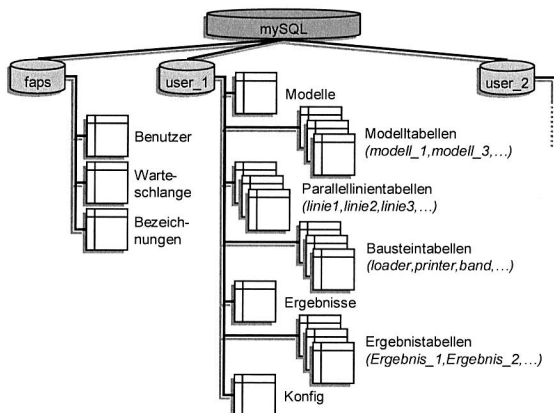
Um das Verständnis zu vergrößern soll noch einmal kurz das Modell des Bestückautomaten erläutert werden. Nach dem Abstraktionsprozess besteht dieser aus den wesentlichsten Elementen, wie den Ein- und Ausgangspuffern, zudem aus dem SBE, das die Bearbeitungszeit, das Stör- und Reinigungsverhalten sowie die Anzahl der Spuren abbildet. Die *Yield*-Vergabe (*Yield* bezeichnet den Kennwert für die Qualität) geschieht mittels eines SIE. Ein weiteres SIE bildet die Zuführung der Elektronikbauteile ab, dieses kommuniziert über zwei Schnittstellenelemente mit dem Maschinenbediener. An diesem Informationselement wird zusätzlich festgelegt, ob es sich um einen *splicebaren* oder *nichtsplicebaren* Bestückautomaten handelt, und es werden die jeweiligen Bestück- und Störzeiten übergeben. Des Weiteren wurde die Art der Bauteilzuführung berücksichtigt. Diese geschieht entweder über ein *splicing tape* oder über einen *feeder* mit Einzelbauteilen. Das Band weist eine bestimmte Kapazität auf. Ist die Bestellauslösung erreicht, muss ein Maschinenbediener ein neues Band an das alte *splicen*, sodass der Bestücker kontinuierlich weiterlaufen kann. Im Modell wurde berücksichtigt, dass wenn ein Maschinenbediener nicht zur Verfügung steht, die Bauteile ausgehen und ein "*Master Stop*" den gesamten Bestückautomaten anhält. In



diesem Fall muss ein neues Band eingeführt werden, was wiederum mehr Zeit des Bedieners in Anspruch nimmt, als das *Splicen* selbst. Bei einem *nonspllicable* Bestücker existiert kein Bestellauslösebestand, das heißt, die Maschine bleibt auf jeden Fall stehen, sobald sämtliche Bauteile im *feeder* aufgebraucht sind, da nur im Nichtbearbeitungszustand ein *feeder*-Wechsel stattfinden kann. Weiterhin hat der Anwender die Möglichkeit, einen zweispurigen Automaten zu konfigurieren. Dieser besteht aus zwei internen Förderbändern, die jeweils eine Leiterplatte aufnehmen können.

## 7.2 Datenverwaltungsebene

Wie eingeführt dient bei der hier gewählten Architektur die Datenbank einerseits als Schnittstelle zwischen dem sich auf Client-Seite befindlichen Anwender (Modellierungsebene) und der serverseitig ausgeführten Simulation (Simulationsebene), andererseits dient sie als zentraler Daten- und Informationsspeicher. Zudem erfolgt dabei die Verknüpfung der Modellierungsbausteine mit den Referenzbausteinen, die in der Datenbank hinterlegt sind. Durch die Schnittstellenfunktion der Datenbank wird zudem die geforderte Simulatorunabhängigkeit sichergestellt, da von alternativen Simulatoren über die ODBC-Schnittstellen auf die SQL-basierte Datenbanken zugegriffen werden kann. Zudem bietet dies auch die Zugriffsmöglichkeit weiterer externer Anwendungen, z. B. für die Darstellung und Überprüfung von Simulationsergebnissen. Aufgrund ihrer zentralen Rolle erfolgen somit Zugriffe von verschiedenen Seiten. Auf Basis der dadurch entstehenden Komplexität und um einen sicheren Zugriff zu gewährleisten entsteht der in Bild 7-5 schematisch dargestellte Entwurf der benötigten Datenbankstruktur, die den unterschiedlichsten Randbedingungen genügt.



**Bild 7-5:** Schematische Darstellung des Entwurfs der benötigten Datenbankstruktur

Da der Zugriff auf ein webbasiertes Simulationssystem für verschiedene Anwender gewährleisten sein muss, teilt sich die Datenbank in ein allgemeines Fragment für den öffentlichen Zugriff und in eines, das nur zugelassenen, sprich registrierten Nutzern zugänglich ist. Der öffentliche Teil (hier: *faps*) stellt neben Informationen für die Benutzerverwaltung auch Daten für die Simulationsverarbeitung bereit. Der nichtöffentliche Teil der Datenbank beinhaltet Informationen für die Modellierung, wie den aus der Modellierung resultierenden Daten und Modelle sowie die Ergebnisse der bereits abgeschlossenen Simulationen und ist über eine implementierte Zugriffskontrolle nur dem jeweiligen „Besitzer“ zugänglich.

Zur Datenbankerstellung und deren weiteren -bearbeitung kommt das Programm *phpMyAdmin* zum Einsatz, das es erlaubt, auf dem eingesetzten *MySQLServer* neue Datenbanken und zugehörige Tabellen anzulegen und zu bearbeiten. Innerhalb der aufgesetzten webbasierten Simulationsanwendung erfolgt der weitere Zugriff auf Tabellen und deren Inhalte dann durch *PHP*-Befehle, die durch Interaktion mit der Simulationsplattform ausgeführt werden.

### **7.2.1 Die Organisation der Modelltabellen und die Abbildung der Bausteinreihenfolge**

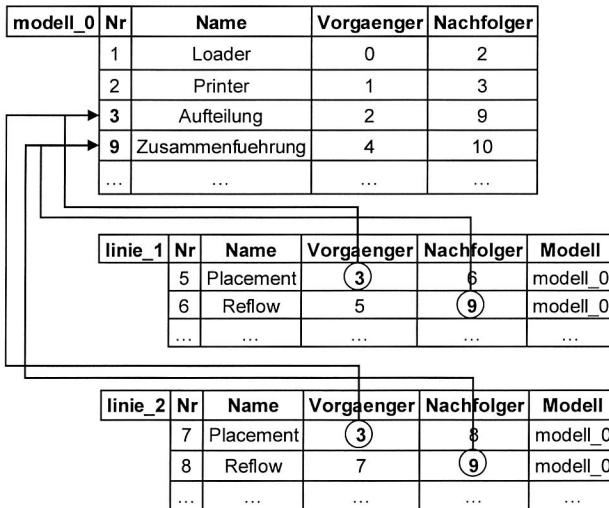
Die Ordnung der Modelle innerhalb der Benutzerdatenbank geschieht unter der Verwendung der Tabelle *modelle*. Dort wird bei Erstellung eines neuen Modells einerseits der Modellname als auch eine eindeutige Modellnummer eingetragen. Als weiterer Schritt wird bei der Erzeugung eines Modells eine separate Modelltabelle erstellt, welche als Schnittstelle zu den Modellbausteinen dient.

Das Anlegen eines neuen Modells wird über ein *php*-Dokument der Modellierungs- und Darstellungsebene initiiert, in das eine Funktion integriert ist, die die erforderlichen *SQL*-Anweisungen ausführt. Zudem wird der Modellname vergeben, den der Anwender über das besagte *php*-Dokument bestimmt. Nach erfolgreicher Überprüfung, ob bereits ein Modell mit dem eingegebenen Namen besteht, wird die Datenbank um ein weiteres Modell ergänzt. Das ausführende Dokument wird auf Grund ähnlicher Funktionsabläufe sowohl bei der Neuanlage als auch bei der Anzeige bestehender Modelle verwendet.

Der Aufbau der einzelnen Modelltabellen ist entscheidend für die Modellierung der Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen, denn diese geben im Allgemeinen die Ablaufstruktur des abgebildeten Systems wider. So regeln die Modelltabellen einerseits die Beziehung zwischen dem Modell und den darin enthaltenen Bausteinen und andererseits legen sie die Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen und die Reihenfolge der Bausteine im Modell fest. Eine Modelltabelle setzt sich aus den Attributen *Nr*, *Name*, *Vor-*

*gaenger* und *Nachfolger* zusammen. Den Modellelementen wird in der Modelltabelle eine eindeutige, automatisch inkrementierte Indexnummer zugewiesen. In der Spalte *Vorgänger* kann somit der zuletzt eingefügte Baustein durch dessen Nummer referenziert werden. Wird ein weiterer Baustein in die Reihe gesetzt, so kann dieser mit seinem Index in die Nachfolgerspalte des Vorgängers eingetragen werden. Auf diese Weise entsteht eine lückenlose Aufreihung der Modellelemente.

Materialflüsse entpuppen sich spätestens dann als komplex, wenn sie sich verzweigen. Auch für die Elektronikproduktion, die für die exemplarische Umsetzung gewählt ist, stellt sich der zunächst triviale Materialfluss komplex dar, sobald in die Bestücklinien Verzweigungen und Bypasssysteme integriert werden. Das heißt, dass die zuvor geschilderte Art der Reihenorganisation in den Modelltabellen der Datenbank an ihre Grenzen stößt, sobald Fertigungslinien modelliert werden sollen, die über mehrere Parallellinien verfügen. Um dieser Problematik zu entgehen, kommen Hilfstabellen zur Verwaltung der einzelnen Zweige im Falle einer Linienaufspaltung zum Einsatz (vgl. Bild 7-6).



**Bild 7-6:** Abbildung der Vorgänger-Nachfolger-Beziehung unter Verwendung von Hilfstabellen bei Modellierung von parallelen Linien

Damit eine Linienverzweigung in der webbasierten Modellierung realisiert werden kann, sind die zusätzlichen Elemente *Aufteilung* und *Zusammenführung* nötig. Sobald eine Aufteilung im aktuellen Modell gesetzt wird, werden die nächsten eingefügten Bausteine nicht mehr in der jeweiligen Modelltabelle aufgeführt. Stattdessen wird ein

Element je nach gewähltem Zweig an die entsprechende Linientabelle *linie\_i* angehängt. Die Reihenfolge innerhalb der Teillinien wird analog zum Modus in den Modelltabellen auch über die Vorgänger-Nachfolger-Beziehung geregelt. Die zusätzliche Spalte *Modell* ordnet den Baustein dem richtigen Modell zu.

## 7.2.2 Änderung der Bausteinreihenfolge

Ist ein Modell in den Modelltabellen bereits beschrieben, kann jederzeit eine Änderung der Bausteinreihenfolge durchgeführt werden, die Client-seitig durch das in die Indexseite integrierte php-Dokument *reiheAendern.php* angestoßen wird. Beim Aufruf des Dokuments und durch die Auswahl des zu verschiebenden Bausteins (vgl. Abschnitt 7.3.5) wird dessen Indexnummer, bzw. bei der Verschiebung eines Elements aus einer Verzweigung zusätzlich noch die Angabe der Liniennummer übermittelt. Des Weiteren wird die Angabe der Indexnummern der beiden Bausteine, die sich in der Reihenfolge vor, bzw. hinter dem Platzhalter befinden, übermittelt. Diese entsprechen den potentiellen neuen Nachbarn des zu verschiebenden Bausteins. Diese Daten werden zusammen mit den anderen Modelldaten aus der Modelltabelle abgerufen und in entsprechenden Variablen gespeichert.

Hier wird auch zum ersten Mal die Bedeutung der Nachfolgerspalte in den Modelltabellen deutlich. Für eine Änderung der Reihenfolge müssen neben den Informationen des verschobenen Bausteins auch die der vorhergehenden und nachfolgenden Steine aktualisiert werden (vgl. Bild 7-7).

```

$bausteinEntnehmen =      „UPDATE $tableAlt
                           SET Nachfolger = $_SESSION[alterNachfolger]
                           WHERE Nachfolger = $_GET[nr] $zusatz1“;
$bausteinEntnehmen =      „UPDATE $tableNeu
                           SET Nachfolger = $_GET[nr]
                           WHERE Nr = $_GET[nrVor] $zusatz2“;
    
```

modell_0	Nr	Name	Vorgaenger	Nachfolger
	1	Loader	0	2
\$\$_GET[nr]	2	Printer	1	3
\$_SESSION[alterNachfolger]	3	Aufteilung	2	9
	9	Zusammenfuehrung	4	10
\$\$_GET[nrVor]	10	AOI	9	11
	11	Finaltest	10	12
...	...	...	...	...

modell_0	Nr	Name	Vorgaenger	Nachfolger
	1	Loader	0	2
\$\$_GET[nr]	2	Printer	1	3
\$_SESSION[alterNachfolger]	3	Aufteilung	2	9
	9	Zusammenfuehrung	4	10
\$\$_GET[nrVor]	10	AOI	9	11
	11	Finaltest	10	12
...	...	...	...	...

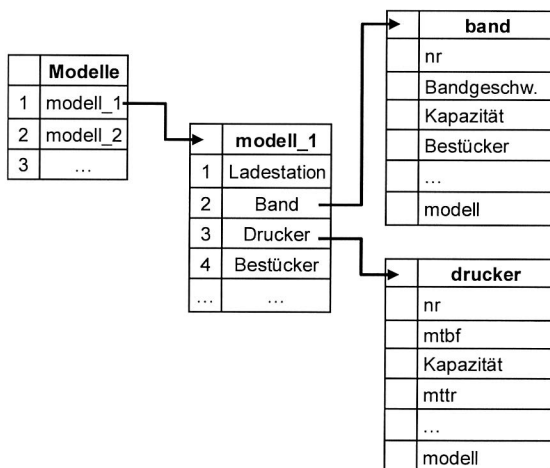
**Bild 7-7:** Teilaktionen in der Datenbank zum Verschieben eines Bausteins

### 7.2.3 Aufbau der Bausteintabellen

Nach der Modellierung der Aufbaustruktur ist jedes Modellelement seinen entsprechenden Eigenschaften nach zu parametrisieren. Das erfolgt in der Regel durch technische Kennwerte, wie beispielsweise Zykluszeiten, Störungsabständen und Störbehebungszeiten oder auch Kapazitäten.

Um der Anforderung flexibel parametrisierbare Modellelementen bzw. Bausteine gerecht zu werden und um die Übersichtlichkeit der Modelltabellen zu wahren, ist für die Handhabung der Bausteininformationen eine entsprechende Tabellenstruktur integriert (vgl. Bild 7-8).

Die Auswahl der einzelnen Attribute für die exemplarische Umsetzung basiert zusammen mit der Bausteinauswahl auf den Prozessen der Elektronikproduktion. Zur Bestimmung der Attribute für die einzelnen Bausteine sei auf den Abschnitt 7.1.2 verwiesen.



**Bild 7-8:** Schematische Darstellung der Tabellenverknüpfungen Modelle, Bausteine, Bausteininformationen

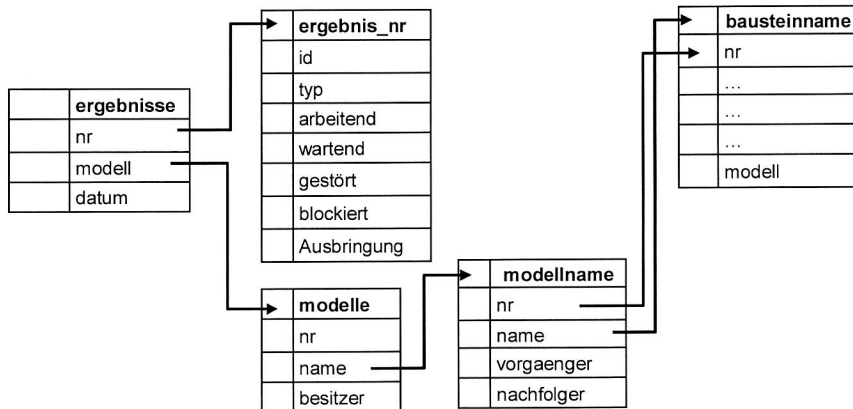
So gibt es für jeden der Bausteine, die in ein Modell einer Bestückkette eingefügt werden können, eine eigene Tabelle in der Benutzerdatenbank. Damit eine sinnvolle Bezugnahme zwischen Modell- und Bausteintabellen möglich ist, dienen die Attribute für Bausteinnummer und Modellname zusammengefasst als Primärschlüssel dieser Tabellen. Alle anderen Attribute, also Spaltenwerte, können von Tabelle zu Tabelle variieren. Außerdem unterscheidet sich die Anzahl der benötigten Attribute. Tabellen exis-

tieren bereits in der vorbereitenden Phase für alle zur Verfügung stehenden Modellelemente. Während der Nutzung des Systems für die webbasierte Simulation werden demnach nur noch Einträge und Änderungen innerhalb der Tabellen vorgenommen.

#### 7.2.4 Verwaltung der Simulationsergebnisse

Das System ist vom Ablauf so gestaltet, dass die Ergebnisse einer erfolgreich durchgeführten Simulation wiederum in der Datenbank hinterlegt werden. So wird für jeden Simulationslauf eine eigene Ergebnistabelle angelegt, in die Resultate der Simulation abgelegt werden. Die Tabellenbenennung erfolgt durch die Zeichenfolge *ergebnis*, gefolgt von einem Unterstrich und der angefügten ID des Ergebnisses. Diese Kennziffer wird beim Eintrag in die übergeordnete Tabelle *ergebnisse* als Primärschlüssel erzeugt.

Beim hier exemplarisch umgesetzten System bestehen die vom Simulator übernommenen Ergebnisdaten aus den jeweiligen Zeitanteilen der simulierten Maschinen. So werden in den danach benannten Spalten die Anteile *arbeitend*, *wartend*, *gestoert* und *blockiert* abgelegt. Ergänzt wird eine Zeile noch um den Wert *PPH (Parts Per Hour)*, also die durchschnittliche stündliche Ausbringung der einzelnen Maschinen. Folgender Ausschnitt aus einer beispielhaften Ergebnistabelle soll die Zuordnung der Zeitanteilsinformationen zu den einzelnen Modellelementen verdeutlichen:



**Bild 7-9:** Darstellung der Beziehungen der Ergebnistabellen in der Datenbank

### 7.3 Darstellungsebene und Datenbankzugriff

Das Unterkapitel 6.5 beschreibt Anforderungen, die bei der Umsetzung eines webbasierten Systems zu berücksichtigen sind. Diese gelten als Grundlage die Modellie-

rungs- und Darstellungsebene zu realisieren. Die folgenden Abschnitte nehmen einzelne aber zentrale Fragmente der Umsetzung gezielt auf und gehen näher auf diese ein.

### 7.3.1 Eine Methode zur strukturierten Darstellung und dynamischen Generierung von Webinhalten

Moderne Webanwendungen nutzen meist die Möglichkeit, Inhalte dynamisch darzustellen. In diesem Zusammenhang soll nun nicht auf Webanwendungen Bezug genommen werden, die überladen mit aufwändigen und hoch animierten graphischen Darstellungen sind. Vielmehr ist hier die dynamische Generierung von Internetseiten auf Basis zugrundeliegender Daten und Informationen zu verstehen, die die Anwendung übersichtlicher somit anwendungsfreundlicher gestaltet und vor allem nur Daten freigibt, die für den einzelnen Anwender bestimmt sind. Für den Aufbau der Modellierungs- und Darstellungsebene wurde die Scriptsprache PHP ausgewählt. PHP-Seiten erzeugen nach dem Aufruf durch den *Client* eine HTML-Ausgabe als Antwort zur Anzeige im *Webbrowser*.

Dabei folgen HTML-Seiten inhaltlich immer einem festen Schema. Zwischen dem einleitenden `<html>`-Tag und dem abschließenden `</html>`-Tag, sind HTML-Seiten in einen Kopf- und einen Rumpfteil gegliedert. Der Kopf der HTML-Datei beinhaltet allgemeine Informationen zur aktuellen Datei und wird von entsprechenden `<head>`-Tags eingeschlossen. Der eigentlich in einem *Browser* dargestellte Seiteninhalt wird im Rumpf respektive *Body* hinterlegt. Durch die Einbettung von kurzen Abschnitten mit PHP-Code in den HTML-Rumpf, entsteht eine PHP-Seite. Diese Abschnitte werden beim Seitenaufruf, für den *Client* unbemerkt, vom Server interpretiert. Das Ergebnis können HTML-Ausgaben sein, welche nahtlos in den umgebenden HTML-Quelltext eingefügt werden. Ebenso ist es möglich, PHP-Seiten zu erstellen, die nur aus PHP-Code bestehen und erst durch Ausgabeoperationen sukzessive die HTML-Ergebnisseite aufbauen. Reine PHP-Seiten erhalten die Endung `.php` und können beim Seitenaufruf mittels der GET-Methode zusätzliche Parameter empfangen und verarbeiten. Dazu werden beliebig viele Parameter, durch bestimmte Zeichen getrennt, an den Dateinamen angehängt. Genauso wie HTML sind PHP-Seiten rein mit Text beschrieben. Bild 7-10 stellt den Aufbau des Quellcodes einer HTML-Seite und die Integration einer PHP-Ausgabe nochmals dar.

```
<!DOCTYPE HTML PUBLIC "-//W3C//DTD HTML 4.01//EN"
„http://www.w3.org/TR/html4/strict.dtd">
<html>
  <head>
    <title>Titel der HTML-Seite</title>
    <meta name="Author" content="Vorname, Nachname">
  </head>
  <body>
    ...
    <?php      echo „Hallo Welt!";
    ?>
    ...
  </body>
</html>
```

**Bild 7-10:** Exemplarischer Quellcode zur Gestaltung einer HTML-Seite und die Integration einer PHP-Ausgabe in ihren Rumpf

Um die entwickelte Modellierungs- und Darstellungsebene möglichst übersichtlich und funktional zu gestalten, aber ihr gleichzeitig ein ansprechendes Design zu verleihen, ist die Menüführung und der Seiteninhalt stets im Hauptfenster anzuzeigen. So ist ein Bereich innerhalb der Darstellungsfläche des Webrowsers für eine Menüführung reserviert, der restliche Bereich gilt der eigentlichen Anwendung.

Erzeugt wird die strukturelle Trennung mit Hilfe von *Cascading Stylesheets* (CSS), die exakte Layoutanweisungen erlauben. In einer separaten Datei können neben Angaben zu Schriftarten, Größen, Farben eben auch die Positionierung der angezeigten Objekte festgehalten werden. Das heißt, dass zur Einteilung des *Browser*-Fensters in einen Menüleistenbereich und einen Bereich für die Inhaltsdarstellung, die Eigenschaft der absoluten Positionierung von Seitenelementen genutzt wird. Ganze Seitenabschnitte können mittels `<div>`-Tags zusammengefasst und durch Kennzeichnung mit einer eindeutigen ID positioniert werden. So können darzustellende Objekte unabhängig vom Typ oder der Fenstergröße des Internetbrowsers angezeigt werden. Wichtig ist hierbei die Möglichkeit einer fixen Positionierung. So kann die Menüleiste dauerhaft an der gewünschten Stelle angezeigt werden, während die Inhalte darunter hinweg gescrollt werden können.

Die Anwendung der CSS erfolgt durch eine Verknüpfung in der entsprechenden HTML- oder PHP-Seite. Formatänderungen, die sich dann auf alle verknüpften Seiten direkt auswirken, erfolgen dann einzig durch eine Anpassung der externen *Stylesheets*-Datei. Es ergibt sich somit eine vorteilhafte Trennung von Layout und Inhalt.



### 7.3.2 Die Kommunikation zwischen Darstellungs- und Datenebene

Die Wahl der Scriptsprache PHP begründet sich nicht nur, weil sie die Darstellung dynamischer Inhalte in einem Webbrowser erlaubt, sondern gerade auch deshalb, weil sie die Funktionalität bietet, auf Datenbanken zuzugreifen und deren Inhalte zu bearbeiten. Um den Datenbankzugriff und die Inhalte bearbeiten zu können, muss innerhalb des PHP-Codes ein Verbindungsaufbau zur benötigten Datenbank erfolgen, um anschließend mit einer Reihe zur Verfügung stehender PHP-Funktionen Datenbankabfragen und -abfragen sowie -änderungen durchzuführen. Unter den PHP-Funktionen stellt der Befehl `mysql_query($query)` das zentrale Instrument dar. Innerhalb dieses Befehls repräsentiert die Variable `$query` eine zu übergebende SQL-Anweisung in Form einer Zeichenkette. Bei einer erfolgreichen Anfrage an die Datenbank werden die Ergebnisse dann gepuffert und eine Ressourcenkennung als Rückgabewert bereitgestellt. Dabei bieten sich mehrdimensionale *Arrays* an, Ergebnisse von mehreren PHP-Anweisungen zu hinterlegen. Dazu ist es allerdings nötig, immer wieder die Ressourcenkennung zu referenzieren. Am Ende einer Datenbanksitzung ist die Verbindung zur Datenbank zu trennen.

Um Zugriff auf das Web-System zu erhalten, muss sich der im Web-System registrierte Anwender auf der Indexseite mit seinen Benutzerdaten über ein HTML-Formular anmelden. Das heißt, dass in der separaten Datenbank *faps*, auf die das Kommunikationssystem ständig zugreift, neben weiteren Informationen auch die zugelassenen Benutzer des Systems mit ihren Zugangsdaten verschlüsselt hinterlegt sind. Für die Verschlüsselung wird aus dem Passwort des Benutzers eine MD5-Prüfsumme (*Message-Digest Algorithm 5*) errechnet. Hierfür wird von PHP die Funktion `md5()` bereitgestellt, die als *Hashwert* eine aus 32 Zeichen bestehende alphanumerische Zeichenkette zurückgibt. Dieser Wert wird in der Datenbank *faps* gespeichert und kann mit der Eingabe von Benutzerdaten auf der Weboberfläche verglichen werden. Ist das Ergebnis des Vergleichs positiv, wird der Benutzername in der *Session*-Datei gespeichert und die geschützten Inhalte angezeigt. Ist der Überprüfung allerdings negativ, wird ein Fehler ausgegeben und zu einem erneuten Anmeldeversuch aufgefordert.

Die besagte Indexseite (*index.php*) dient allerdings nicht nur als Einstiegsseite, vielmehr kommt ihr bei der Kommunikation zwischen Darstellungs- und Datenebene eine zentrale Rolle zu, denn sie stellt die einzige explizit aufgerufene Internetseite des gesamten Kommunikationssystems dar. Das heißt, dass auch innerhalb des Web-Systems einzig auf die *index.php* verwiesen wird. Möglich wird dies durch die Parameterübergabe mittels der GET-Methode. So wird zwar immer wieder die gleiche Seite aufgerufen, jedoch werden bei jedem Seitenaufruf die übergebenen Zeichenketten

überprüft und ggf. ausgewertet. Das Erscheinungsbild der *index.php* lässt sich dadurch dynamisch anpassen. PHP erlaubt es aber auch, externe Inhalte in einen aktuellen Programmablauf einzubinden. So können separate PHP- oder HTML-Inhalte über eine *include()*-Funktion während der Abarbeitung des PHP-Quellcodes in die Indexseite integriert und ebenfalls abgearbeitet werden. Der Befehl *include()* wird beim hier entwickelten System ebenfalls verwendet, um häufig genutzte Funktionen in einer separaten Datei zu deklarieren, was einen reduzierten Programmieraufwand bei der Funktionserstellung sowie -änderung zur Folge hat. In Kombination mit einer Fallunterscheidung (*switch()*-Anweisung) wird zudem erreicht, dass nur die Teile in die angezeigte Seite eingebettet werden, welche explizit durch die Parameterübergabe beim Seitenaufruf angefordert wurden, um nur die aktuell benötigte Funktionalität zu laden. Und über eine *echo*-Anweisung wird es ermöglicht, die Anzeige bestimmter *<div>*-Bereiche (vgl. Abschnitt 7.3.1) an Bedingungen in PHP-Funktionen zu knüpfen. Zum Beispiel wird diese Funktionalität genutzt, um das besagte Zugangssystem einzurichten. Somit werden die Inhalte, die innerhalb des *<div id="inhalt">*-Tags angezeigt werden, je nach erfolgtem Autorisierungsstatus angepasst. Vergleiche hierzu Bild 7-11.

```
<?php
... // Auslassungszeichen
    switch ($_GET['action']) {
        case 'auswahl':
            include "auswahl.php";
            break;
        ...
        case 'modelle':
            include "modelle.php";
            break;
        case 'simulation':
            include "simulation.php";
            break;
        default:
            //Hier wird die Startseite erzeugt
            break;
    }
...
?>
```

**Bild 7-11:** Darstellung des PHP-Codes zur dynamischen Inhaltsgestaltung der Indexseite

### 7.3.3 Verwaltung temporärer Verbindungsdaten mit Hilfe von *Sessions*

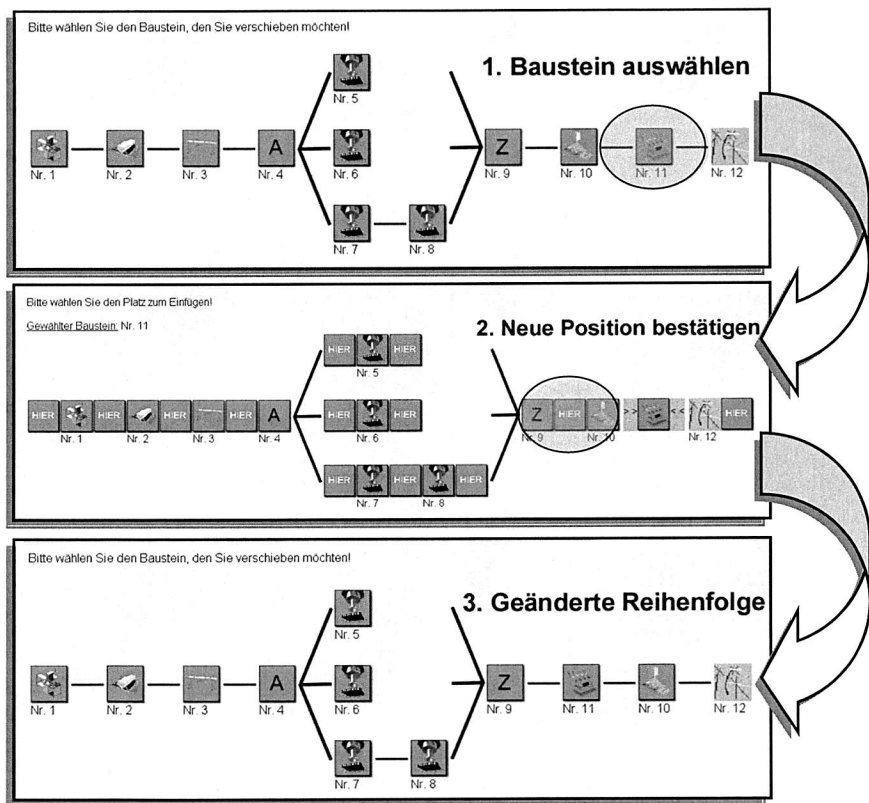
Bei der webbasierten Simulation müssen unter Umständen sehr viele Variablen zwischen den einzelnen aufgerufenen Modellierungsseiten übermittelt werden. Darunter befinden sich aber auch welche, deren Bereitstellung nicht bei jedem Seitenaufruf nötig ist, die aber im späteren Verlauf einer Simulationssitzung von großer Bedeutung sein können. Um dies zu realisieren, können innerhalb von PHP durch die sogenannte *Sessions*-Verwaltung die wichtigsten Daten einer Internetverbindung serverseitig gespeichert werden, bis die Verbindung beendet wird. Dazu können neben den Verbindungsdaten auch beliebig viele eigene Session-Variable temporär auf dem Server bereitgehalten werden. Mit der zu Beginn der Simulationssitzung aufgerufenen Funktion `start_session()` wird eine eindeutige ID erzeugt und der aktuellen *Session* zugeordnet. Die Variablen werden dann in einer Datei auf dem Server gespeichert, welche den gleichen Namen trägt wie die Session-ID. Beispielsweise kann dann auf die Variable `modell` über die Funktion `$_SESSION['modell']` zugegriffen werden. Um die Simulationssitzung bzw. die Internetverbindung aufrecht zu erhalten, wird die aktuelle ID zudem in einem *Cookie* auf dem Client-Rechner gespeichert. [83]

Das hier umgesetzte webbasierte Simulationssystem besteht aus einem komplexen Geflecht an unterschiedlichen Webinhalten, die auf einzelnen Internetseiten veröffentlicht werden müssen. In Kombination mit dem Konzept der zentralen Indexseite (vgl. Abschnitt 7.3.2) kann ein weiterer Vorteil der Methode der *Sessions* genutzt werden. Denn hiermit kann sichergestellt werden, dass bei jedem neuen Seitenaufruf die aktuelle *Session* erhalten bleibt und somit auch die gespeicherten Daten für den weiteren Verlauf der Sitzung zur Verfügung stehen.

Als positiven Nebeneffekt wird außerdem eine zusätzliche Sicherheitsabfrage mit Hilfe der *Session*-Daten realisiert. Beim Öffnen einer neuen *Session* wird nämlich die IP-Adresse des zugreifenden Benutzers in der *Session*-Variable `$_SESSION['IP']` gespeichert. Bei einem erneuten Zugriff auf die `index.php` kann dann überprüft werden, ob diese Variable bereits besteht und ob sie mit der IP-Adresse des aktuellen Benutzers übereinstimmt. Somit kann ausgeschlossen werden, dass sich unbefugte Teilnehmer durch den Einsatz ausgespäter *Session*-IDs Zugriff auf das System verschaffen.

### 7.3.4 Darstellung der Simulationsmodelle im Internetsystem

Die Modellierungsphase kann prinzipiell zwei Motivationsgründe haben. Entweder ist ein neues Modell anzulegen oder es ist ein schon vorhandenes Modell abzuändern. Diese zwei Möglichkeiten bietet auch das prototypisch umgesetzte webbasierte Simulationssystem. Damit eng verbunden ist ebenso die Darstellungsart der Simulationsmodelle im Webbrowser. In der Darstellungsebene des umgesetzten Web-Systems wird dabei zwischen zwei alternativen Modellvisualisierungen unterschieden.



**Bild 7-12:** Kompakte Darstellung der Linienstruktur und Vorgehensweise bei der Bausteinreihenfolgenänderung

Einerseits hat der Anwender die Möglichkeit, sich die modellierte Linienstruktur in rein symbolischer Form anzeigen zu lassen. Dies ermöglicht ihm, sich schnell einen Überblick zu verschaffen. Des Weiteren wird diese kompakte Liniendarstellung für die Durchführung der Bausteinreihenfolgeänderung verwendet. Die einzelnen Maschinen einer Bestückkette werden durch graphische Symbole und die Verbindungen durch Linien dargestellt. Die benötigten Informationen zur Darstellung werden dabei mittels integrierten SQL-Anfragen aus den Modelltabellen ermittelt. Das Ergebnis der SQL-Anfrage enthält neben der Bausteinreihenfolge u. a. auch den Typ (Name) des jeweiligen Bausteins. Der Bausteinname dient dabei dem Einfügen des entsprechenden Bausteinsymbols. Dieses ist jeweils unter demselben Namen auf dem Server gespeichert. Zudem wird die bildliche Darstellung eines Bausteins mit einem Hyperlink versehen, welcher die Funktion der Bausteinreihenfolgenänderung auslöst. Für die datenbanktechnische Realisierung der Funktion sei auf den Abschnitt 7.2.2 verwiesen. Anschließend wird noch das Liniensymbol eingefügt, welches die logische Verbindung des Bausteins zu seinem Nachfolger darstellt. Bild 7-12.

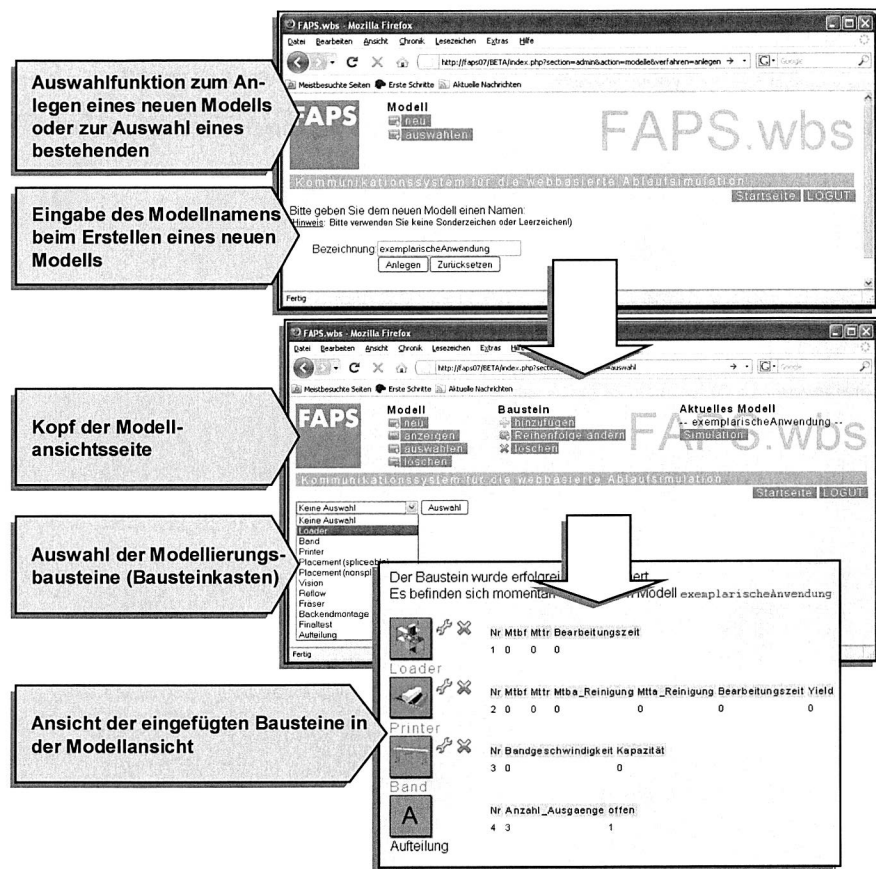
Im gezeigten Beispiel wird die Position des Reflowofens und der Vision-Teststation vertauscht. Dazu ist im Menü der Punkt *Baustein: Reihenfolge ändern* auszuwählen. Es folgt die grafische Darstellung der modellierten Bestückerlinie mit der Möglichkeit einen Baustein zu verschieben. Dieser ist per Mausklick auszuwählen. Nun werden an allen Stellen Platzhalter angezeigt, an denen der soeben gewählte Baustein (hier der Reflowofen) eingefügt werden kann. Durch Auswählen des entsprechenden Platzhalters wird das Modellelement an dortiger Stelle in die Reihenfolge eingebettet (Hier zwischen Verzweigung und AOI).

Andererseits können aber auch die modellierten Bestücklinien komplett mit den sämtlichen Parameterdaten eines jeden Modellbausteins dargestellt werden.

### 7.3.5 Modellierung und graphische Darstellung des Linienaufbaus

Bild 7-13 veranschaulicht die Modellierungsvorgehensweise begonnen mit dem Anlegen eines neuen Modells.

Hierzu kann entweder dem Verweis *Neues Modell anlegen* auf der Startseite gefolgt werden oder alternativ der Menüpunkt *neu* im Seitenkopf ausgewählt werden. Die Folgeseite erlaubt nun die Eingabe eines Namens für das anzulegende Modell.



**Bild 7-13:** Darstellung der Modellierung durch die Auswahl entsprechender Bausteine

Nach dem Absenden des Namens wird dieser mit den bereits vorhandenen Einträgen in der Modelldatenbank verglichen. Ist dieser noch nicht vorhanden, wird die Übersichtsseite der Modellansicht angezeigt. Dabei wird die Menüleiste um weitere Funktionalitäten erweitert. So führt der Menüpunkt *Modell: anzeigen* immer wieder auf diese Übersichtsseite zurück. Außerdem kann ein Modell inklusive aller damit verbundenen Eingaben über *Modell: löschen* verworfen werden.

Unter dem Hauptmenüpunkt *Baustein* finden sich Funktionen zum Hinzufügen oder Löschen von Bausteinen oder auch zur Reihenfolgeänderung. Die Anzeige *Aktuelles Modell* zeigt permanent an, welches Modell gerade aktiv ist. Über den Verweis *Simulation* können Simulationsergebnisse abgerufen werden und das aktuelle Modell für die

Simulation freigegeben werden. Unter der Menüleiste wird der Anwender zudem über die aktuelle Bausteinanzahl informiert.

Für das Einsetzen der Modellierungsbausteine in ein Modell steht das PHP-Dokument *ein fuegen.php* zur Verfügung, das die nötigen Einfügeoperationen ausgeführt. Es dient jedoch auch der detaillierten Darstellung aller Bausteine des aktiven Modells in der festgelegten Reihenfolge. Damit ein Modell um einen Baustein erweitert werden kann, wird zunächst die Seite *auswahl.php* aufgerufen und in die Indexseite integriert. Dort werden dem Benutzer die zur Auswahl stehenden Maschinentypen in Form eines Dropdown-Menüs angezeigt. Durch Selektion eines Bausteintyps und anschließender Betätigung des Auswahl-Buttons wird der entsprechende Name des Elements an die Seite *ein fuegen.php* übermittelt (vgl. Bild 7-13). Durch die Übermittlung wird die Einfügeoperation in die Datenbank ausgeführt und der Baustein wird schließlich als Element in der Übersichtsliste angezeigt. Die rechte Hälfte der Anzeige zeigt nun bereits die Parametereinstellung des eingesetzten Bausteins eingeblendet, die alle mit dem Wert „0“ vorbelegt sind. Der Index *Nr* wird von der Datenbank automatisch vergeben. An dieser Stelle kann wahlweise mit dem Aufbau des Modells fortgefahren oder die Konfiguration der bereits eingesetzten Bausteine vorgenommen werden.

Wie bereits erläutert, stellt die Abbildung von Bypasssystemen in Bestückanlagen eine besondere Herausforderung dar. Um dies zu realisieren stehen die Bausteine *Aufteilung* und *Zusammenführung* bereit. Um eine parallele Linie zu modellieren, ist der Baustein *Aufteilung* ins Modell einzusetzen. Es wird dann typischerweise wieder die Indexseite aufgerufen. Anstatt die Verarbeitung mit der Datei *ein fuegen.php* durchzuführen, wird jedoch das PHP-Dokument *datenEingabeAufteilung.php* ausgeführt.

Es erscheint ein Texteingabefeld für die Ergänzung der gewünschten Anzahl an Teillinien. Durch erneutes Absenden der Daten wird die Aufteilung hinzugefügt und mit den entsprechenden Informationen in der Datenbank abgelegt.

Das zusätzliche Attribut *offen* in der Aufteilungstabelle dient als Indikator, ob die im weiteren Verlauf eingesetzten Bausteine Bestandteil des Bypasses sind oder nicht. Beim Setzen einer Aufteilung wird für dieses Attribut generell der Wert „1“ (offen) gesetzt. Alle folgenden Elemente werden folglich dieser Aufteilung zugeordnet. Erst beim Einsetzen einer Zusammenführung wird dieser Parameter mit „0“ belegt und dieser Baustein mit der dazugehörigen Verzweigung verknüpft. Aufteilung und Zusammenführung können als einzige Bausteine nicht weiter konfiguriert werden.

In der Übersicht werden verzweigte Linien durch eine Einrückung und stilisierte Verbindungen angedeutet, während die senkrecht verlaufenden Linien die Reihenfolge innerhalb einer Teillinie, und die waagrechten Linien den Beginn eines neuen Zweiges

andeuten (vgl. Bild 7-14). Es muss auf jeden Zweig mindestens ein Baustein gesetzt werden, um die Verzweigung wieder mittels Zusammenführung vereinen zu können.

The interface shows a sidebar on the left with icons for different components: Loader, Printer, Band, Aufteilung, PlacementN, and Zusammenführung. The main area displays a table of parameters for each component. A large arrow points from the 'PlacementN' component in the sidebar to the main table area.

Nr		Mtbf	Mtr	Bearbeitungszeit
1	0	0	0	

Nr		Mtbf	Mtr	Mtba_Reinigung	Mtts_Reinigung	Bearbeitungszeit	Yield
2	0	0	0	0	0	0	0

Nr		Bandgeschwindigkeit	Kapazität
3	0	0	

Nr		Anzahl_Ausgaenge	offen
4	3	0	

Nr		Mtbf	Mtr	Bestückzeit	Spurenzahl	FeederKapazität	AbgezogeneBauteile	FeederwechselZeit	Inputkapazität	Yield
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nr		Mtbf	Mtr	Bestückzeit	Spurenzahl	FeederKapazität	AbgezogeneBauteile	FeederwechselZeit	Inputkapazität	Outputkapazität	Yield
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nr		Anzahl_Eingaenge	Aufteilung
7	3	4	

**Bild 7-14:** Darstellung der Modellierung einer verzweigten Montagelinie

### 7.3.6 Parametrisierung der Modellelemente

Neben der Modellierung der Linienstruktur sind die einzelnen Bausteine zu konfigurieren und die detaillierten Parametereinstellungen in der Datenbank zu hinterlegen. Die Parameter entsprechen dabei den jeweiligen Attributen in den Bausteintabellen der Datenbank (vgl. 7.2.3). So sind die hinterlegten Informationen ständig abrufbar und im weiteren Verlauf der Modellerstellung stets veränderbar.

Die Anzeige der Bausteineinstellungen kann jederzeit durch einfache SELECT-Anfragen an die Datenbank gestaltet werden. Die Parametereinstellungen sind in der Übersichtsdarstellung des Modells für jeden Baustein aufgelistet. Um die SELECT-Anweisung ausführen zu können, genügen die Bausteinnummer, der Typ des Bausteins und die Modellbezeichnung. Das Ergebnis wird in einem mehrdimensionalen



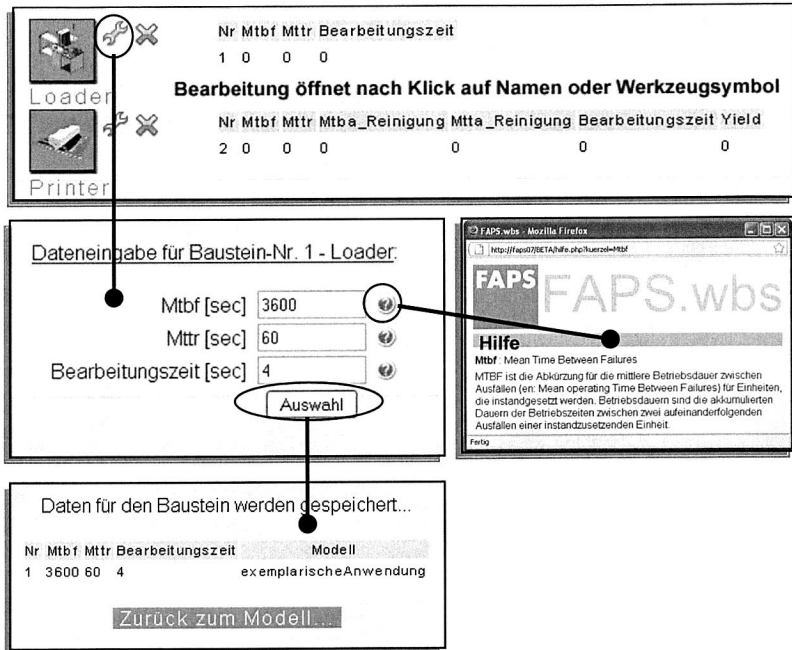
Array hinterlegt und kann in Form einer Schleife durchlaufen werden, um die einzelnen Wertausprägungen innerhalb einer HTML-Tabelle anzeigen zu lassen.

Für die Bearbeitung der Bausteininformationen existiert die Seite *daten\_Eingabe.php*. Unter Verwendung eines HTML-Formulars werden dabei Texteingabefelder für alle veränderbaren Parameter angezeigt. Soweit bereits Eingaben bestehen, gilt dies auch für die hinterlegten Informationen als Textfeldvorbelegung. Somit kann es dem Anwender ermöglicht werden, gezielte Feinjustierungen an der Parameterkonfiguration vorzunehmen. Durch das Absenden der Daten wird die Datei *auswertung.php* zur Ausführung der für die Aktualisierung benötigten Datenbankoperationen aufgerufen.

Komplex gestaltet sich dabei die Zuordnung der übermittelten Wertausprägungen zu den entsprechenden Attributen der Bausteintabelle. Aus diesem Grund wird zu den übertragenen Formularwerten auch noch eine Zeichenkette *feld* mittels der GET-Methode angehängt, welche sämtliche vorkommende Feldbezeichnungen enthält. Diese Bezeichnungen stimmen mit den Namen der Attribute in der Bausteintabelle überein. Die empfangene Variable `$_POST[feld]` wird dann in der lokalen Variable `$felder` abgelegt.

Nach der Zerlegung dieses Strings anhand eines vorher spezifizierten Trennzeichens können im Folgenden sämtliche POST-Variablen über die jeweiligen Feldbezeichnungen angesprochen und in die entsprechenden Felder der Bausteintabelle eingetragen werden. Die gezeigte Vorgehensweise ermöglicht eine wiederholte Bearbeitung der hinterlegten Daten. Jederzeit kann über einen entsprechenden Link die Bearbeitung eines Modellelements angestoßen werden. Werte, die im Formular unverändert bleiben, sind dies auch bei diesem Vorgang.

Die Anzeige der Parametereinstellungen der einzelnen Maschinen der Fertigungskette geschieht auf der Übersichtsseite des Simulationsmodells. Um jedoch überhaupt Daten eingeben zu können bzw. diese abzuändern, muss die Seite *daten\_Eingabe.php* von dieser Ausgangsseite aus aufgerufen werden. Dafür sind zwei Alternativen vorgesehen. Es kann direkt der Name des zu bearbeitenden Bausteins oder das entsprechende Werkzeugsymbol neben der Bausteinbezeichnung angeklickt werden. In beiden Fällen gelangt man zur eben erwähnten Seite, welche ein HTML-Formular mit Texteingabefeldern beinhaltet. Für den Fall der Bearbeitung eines schon bestehenden Datenbestands wird dieser in den Feldern als Vorbelegung angezeigt (vgl. Bild 7-15).



**Bild 7-15:** Vorgehensweise bei der Parametrierung der Modellbausteine und Darstellung der integrierten Hilfefunktion

Zur Unterstützung der Parametrisierung dient eine integrierte Hilfefunktion, die durch Symbole am Rande der Eingabefelder aufrufbar ist. Bei Aktivierung öffnet sich ein kleines Zweitfenster des Browsers, in dem sich Erklärungen zu entsprechenden Abkürzungen befinden.

Sobald die Eingabe abgeschlossen ist, werden die Daten durch einen Klick auf den Auswahl-Button an die Seite *auswertung.php* übermittelt. Dort erfolgt die Ergänzung der Datenbank um die eingetragenen Werte. Im Anschluss ermöglicht die tabellarische Darstellung der hinterlegten Bausteinparameter einen Überblick über die vorgenommenen Änderungen. Ein Link führt zurück zur Übersichtsseite.

### 7.3.7 Simulation und Ergebnisabruf

Nachdem die Datenbankstruktur nun eine Form aufweist, in der alle notwendigen Modellinformationen geordnet hinterlegt werden können, soll die Handhabung der Simulationsinformationen in den Vordergrund gestellt werden. Hier gilt es, erneut der Schnittstellenfunktion der Datenbank zwischen Modellierung und Simulation gerecht zu wer-

den. Neben der Informationsverarbeitung und -speicherung müssen auch die Simulationsaufträge von der Webplattform organisiert werden. Zusätzlich ist die Speicherung und Darstellung der Simulationsergebnissen zu ermöglichen.

### **Simulationsfreigabe**

Nachdem die Daten der Bausteine im vorliegenden Beispiel fertig konfiguriert worden sind, besteht der nächste Anwendungsschritt aus der Freigabe für die Simulation.

Dazu kann jederzeit über das Menü das Simulationsfenster geöffnet werden. Dahinter verbirgt sich die Seite *simulation.php*, die die weiteren Abläufe ermöglicht. So können neben der Eingabe der Rahmendaten für den Simulationslauf und der damit verbundenen Aktivierung des Modells für die Simulation auch die Ergebnisse abgerufen werden.

Um die fehlenden Daten zu ergänzen, steht dem Benutzer ein Formular zur Verfügung. Dabei werden die zusätzlich gemachten Angaben Simulationsdauer und Anzahl der Werker im Modell zusammen mit weiteren Eckdaten in die Tabelle *warteschlange* der übergeordneten Datenbank eingetragen.

Der Eintrag bleibt dort so lange bestehen, bis die eigentliche Simulation gestartet wird und darauf folgend gelöscht. Solange allerdings die Simulation noch nicht gestartet wurde, kann durch abermaliges Absenden der Daten eine Konfigurationsänderung des Auftrages vorgenommen werden.

Nachdem der Zugriff auf das Kommunikationssystem für die webbasierte Simulation mehreren Benutzern zugänglich ist, ist auch mit einer gleichzeitigen Absendung unterschiedlicher, sich zeitlich überschneidender Simulationsaufträge zu organisieren. Damit diese vom eingesetzten Simulator dennoch geregelt abgearbeitet werden können, bedarf es der Erzeugung einer eindeutigen Reihenfolge. Dies gewährleistet ebenfalls die Warteschlange. Neben der Speicherung modellspezifischer Simulationsinformationen, kann über den Zeilenindex auch die Reihenfolge der Abarbeitung festgelegt werden. Hierbei kommt das FIFO-Prinzip zum Einsatz. Zuerst eingetragene Simulationsaufträge werden auch zuerst abgearbeitet. Dabei ist es unerheblich, welchem Benutzer die betreffenden Modelle zugeordnet sind.

Weitere Informationen über Modellaufbau und -elemente müssen nicht explizit mit angegeben werden, da diese vom Simulator direkt aus den entsprechenden Modell- und Bausteintabellen abgerufen werden sollen. Für die Bearbeitung dieser Warteschlange ist von Seiten des Internetsystems die Seite *simulation.php* gedacht. Sie soll einen Überblick über die zur Simulation anstehenden Modelle bieten und für die Simulationsfreigabe durch den Benutzer dienen.

## Simulationsdurchführung

Sind Modelle vom Anwender über die Modellierungs- und Darstellungsebene für die Simulation freigegeben, werden diese in die Simulationsanwendung importiert. Dabei befindet sich der Simulator in einer Warteschleife. Durch ein regelmäßiges Abfragen der Warteschlangentabelle wird überprüft, ob Aufträge vorhanden sind. Dann wird das Modell mittels der integrierten Referenzbausteine automatisiert aufgebaut und die Simulation durchgeführt. Hierzu ist ein Parser implementiert worden, also eine Routine, die zuerst die Modellierungsdaten schrittweise aus der Datenbank abrufen und auf deren Basis dann das Simulationsmodell durch Einsetzen der entsprechenden Referenzbausteine automatisiert aufbaut.

Für die Durchführung der Simulationen kommt exemplarisch die kommerzielle Simulationssoftware *Plant Simulation* der Firma Tecnomatix zum Einsatz. Prinzipiell ist der Simulator über eine ODBC-Schnittstelle mit der MySQL-Datenbank verbunden und prüft fortwährend die Datenbankeinträge. Die ODBC-Datenbankschnittstelle ist speziell für den Zugriff auf die Benutzerdatenbanken und dem verwendeten SQL-Standard konfiguriert. Das Simulationsprogramm *Plant Simulation* selbst stellt in einem begrenzten Umfang Funktionen für die Kommunikation mit der Datenbank zur Verfügung.

Nach der Beendigung der Simulation werden die Ergebnisse nach Maschinen sortiert vom Netzwerk *outputdata* verarbeitet. Die jeweiligen Zeitanteile der Komponenten werden vom Simulator in einer separat angelegten Ergebnistabelle auf dem Internetserver eingetragen. Zudem wird die Tabelle *ergebnisse* um das neue Resultat erweitert.

## Darstellung der Simulationsergebnisse

Nach dem Simulationslauf werden die Ergebnisse wiederum in die Datenbank eingetragen (Tabelle *ergebnisse*) und mit den Modelldaten verknüpft. Hierzu wurden entsprechende Routinen entwickelt, welche entsprechende SQL-Anweisungen generieren.

Damit die Simulationsergebnisse dem Anwender übersichtlich präsentiert werden können, ist im Web-System ein eigener Bereich vorgesehen. Dort werden die Simulationsergebnisse entsprechend der Tabelle *ergebnisse* aus der Datenbank ausgegeben. Dafür kommt eine MySQL-Abfrage zum Einsatz, welche nur vom aktuell betrachtenden Anwender in Auftrag gegebene Simulationen berücksichtigt. Dadurch wird erreicht, dass jeder Benutzer nur eigene Ergebnisse angezeigt bekommt. Die so angezeigte Liste ist nach Datum und Uhrzeit absteigend sortiert, um die zuletzt durchgeführte Simulationen anzuzeigen. Sollte ein weiteres Szenario eines Modells mit veränderten Parametern

tern durchzuführen sein, kann die se Konfiguration vorgenommen werden das Modell erneut einem Simulationslauf unterzogen werden.

Für die Verarbeitung und grafische Darstellung der Informationen wird auf eine spezielle PHP-Bibliothek zurückgegriffen, mittels derer Bilder und Grafiken erstellt werden können. Ausgegeben wird dabei eine Ergebnisübersicht mit der detaillierten Ansicht der Simulationsergebnisse.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Globalisierte Märkte in Verbindung mit weltumspannenden Produktionsnetzwerken stellen die Planung in der Produktion und insbesondere in der Logistik vor neue Herausforderungen. Zu deren Bewältigung stehen innovative und effiziente Methoden wie die Ablaufsimulation bereit. Gerade diese bietet bei der Auslegung von Produktions- und Logistiknetzwerken ein hohes Unterstützungspotenzial, da sie die dynamischen Effekte innerhalb dieser Systeme abbildet.

Dennoch bleibt ihr bisher eine breite Anwendung verwehrt. Das liegt einerseits daran, dass die Durchführung von Simulationsstudien meist aufwändig ist und hoch spezialisierte Experten heranzuziehen sind. Andererseits erschwert aber auch die problematische Verfügbarkeit der speziellen, meist kosten- und wartungsintensiven Simulationswerkzeuge inklusive der benötigten Hardwareressourcen deren breiten Einsatz. Die Kombination der Referenzmodellierung mit der webbasierten Simulation hat das Potenzial, die beschriebenen Hemmnisse zu minimieren und die Simulation noch stärker in den betrieblichen Alltag zu integrieren.

So hat sich diese Arbeit auf Basis oben genannter Anforderungen folgende Ziele gesetzt: einerseits ein Referenzmodell zur Modellierung und Simulation von Logistik- und Supply Chain Netzwerken zu entwickeln, das einem Anwender, der kein Simulationsexperte ist, die Möglichkeit bietet, schnell komplexe Supply Chain Netzwerke in einem Simulationssystem abzubilden; andererseits, im Sinne des modernen *Cloud Computing*, einen webbasierten Service zu entwickeln, der bislang existierende Einsatzprobleme der Simulation minimiert. So steigert die webbasierte Simulation die Effizienz bei der Hard- und Softwarenutzung, vereinfacht den Zugang zur Simulation und erhöht die Anwenderfreundlichkeit durch integrierte Bausteinbibliotheken.

Demgemäß wurde nach einer Analyse des Ist-Zustands zunächst das Themenfeld der globalen Wertschöpfungsnetzwerke betrachtet. Es zeigte sich, welche Strategien der Produktionssystematik verfolgt werden müssen, um den Herausforderungen der Globalisierung gerecht zu werden. Weiterhin wurden die Rolle der Logistik in global verteilten arbeitsteiligen Netzwerken aufgezeigt und das Supply Chain Management als moderne Art der Handhabung von Liefernetzwerken erläutert.

Dabei stellte sich heraus, dass sich durch den Einsatz der Ablaufsimulation bei der Planung großer Supply Chain Netzwerke Unsicherheiten im späteren operativen Prozess nachhaltig verringern lassen.

Ein besonderes Augenmerk lag auf der Produktion und Logistik bei der Wertschöpfung mobiler Kommunikationselektronik, da diese ein sehr gutes Beispiel für die weltumspannende Produktion ist. Hierzu wurden zunächst die Prozesskette bei der Herstellung mobiler Kommunikationsgeräte analysiert und insbesondere die Distributionsprozesse untersucht. Dabei stellte sich deutlich heraus, dass sich der Fokus von der Optimierung der reinen Produktionsprozesse hin zur Optimierung der Distributions- bzw. Supply Chain Prozesse verschoben hat. Diese befinden sich in einem schnellen und stetigen Wandel. Simulation in Verbindung mit Referenzmodellen stellt hier eine immense Effizienzsteigerung dar.

Durch die vermehrte Forderung nach einem verstärkten Einsatz digitaler Methoden bei der Planung in Produktion und Logistik wurde zunächst die Schlüsselrolle der Simulation innerhalb der Digitalen Fabrik aufgezeigt und ein Vorgehensmodell zur methodischen Durchführung von Simulationsstudien vorgestellt. Weiterhin wurden aktuelle Methoden aus der Informations- und Kommunikationstechnologie aufgenommen und eine Vision erarbeitet, wie zukünftig Planungen und Simulationen in der Produktion und Logistik digital unterstützt werden können.

Auf Basis der bis dahin erarbeiteten Ergebnisse ist ein modulares Referenzmodell zur Auslegung komplexer Supply Chain Netzwerke entstanden. So wird nun unter Verwendung eigens entwickelter logistischer Grundbausteine eine effiziente und eine kostengünstige Modellierung ermöglicht. Des Weiteren wird damit einem Nicht-Simulationsexperten der Zugang zur Methode erleichtert. Die Funktionstüchtigkeit des Referenzmodells wurde durch die Simulation verbrauchsgesteuerter Dispositionsverfahren und die Darstellung und Beseitigung des *Bull-Whip-Effekts* in einem typischen Logistiksystem bewiesen.

Weitere Vorteile entstehen indem inzwischen mit modernen Kommunikationsmethoden Softwareanwendungen auch über das Internet angeboten werden können. So ist es einerseits möglich, die Kosten für das reine Vorhalten der Anwendung zu senken oder komplett zu eliminieren, indem nur für die reine Nutzung Aufwand entsteht. Andererseits können große Unternehmen ihre Software- und Hardwareressourcen bündeln und bedarfsgerecht bereitstellen.

Da bisher noch keine nennenswerten Lösungen hinsichtlich der webbasierten Simulation existieren, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein solches System konzipiert und exemplarisch zur Überprüfung der Umsetzbarkeit realisiert. Dieses basiert auf einer Client/Server-Architektur, bei der eine Datenbank das zentrale Element zwischen Modellierung und Simulation ist. Sie dient somit nicht nur zur reinen Datenspeicherung,

sondern auch als Kommunikationsschnittstelle, was zur Folge hat, dass das System simulatorunabhängig gestaltet ist.

Die in der vorliegenden Arbeit erzielten Ergebnisse zur Referenzmodellierung und webbasierten Simulation bilden die Grundlage, die Simulation in Produktion und Logistik einem breiteren Anwenderfeld zur Verfügung zu stellen. Sie bilden aber auch die Basis dafür, die Methoden der Digitalen Fabrik in Richtung moderner Informations- und Kommunikationstechnologien weiter zu entwickeln. Dies umfasst die Umsetzung der bereits in der Arbeit dargestellten Vision einer offenen und somit „selbstwachsenden“ Internet-Plattform zur Planung in Produktion und Logistik. Weiter bietet eine solche Plattform vielfältige Möglichkeiten: So ist es denkbar, diese nicht nur zur Planung, sondern auch zum Monitoring und zur Telediagnose realer Anlagen weiterzuentwickeln.



## Literaturverzeichnis

1. Abts, D.: Masterkurs Client/Server-Programmierung mit Java. 3., erweiterte und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Vieweg 2010.
2. Aliche, K.: Planung und Betrieb von Logistiknetzwerken. Berlin [u. a.]: Springer 2005.
3. Arnold, D. (Hrsg.): Handbuch Logistik. Berlin [u. a.]: Springer 2008.
4. Back, A. [u. a.]: Web 2.0 und Social Media in der Unternehmenspraxis. München: Oldenbourg 2012.
5. Balci, O.: Guidelines for successful simulation studies. In: Balci O., Sadowski R., Nance, R. (Hrsg.) Proceedings of the 1990 Winter Simulation Conference, New Orleans (USA) (1990). IEEE, Piscataway, S. 25-32. [Banks] Banks, J.: Discrete-Event System Simulation, 5th Edition. München [u. a.]: Upper Saddle River 2010.
6. Bauer, G.: Architekturen für Web-Anwendungen: Eine Praxisbezogene Konstruktions-Systematik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2009.
7. Baun, Ch. [Hrsg.]: Cloud Computing. Web-basierte dynamische IT-Services. 2. Auflage. Heidelberg: Springer 2011.
8. Bellmann, K.; Müller, D.: Auswirkungen der Globalisierung auf die Qualität von Automobilen. In: Hausladen, I. (Hrsg.): Management am Puls der Zeit. Strategien, Konzepte und Methoden. Festschrift für Prof. Horst Wildemann. München: TCW 2007.
9. Benlian, A. [u. a.]: Software-as-a-Service. Anbieterstrategien, Kundenbedürfnisse und Wertschöpfungsstrukturen. Wiesbaden: Gabler 2010.
10. N.N.: BITKOM-Branche geht optimistisch ins nächste Jahr. Presseinformation des BITKOM vom 20.12.10. Internet-Abruf: [www.bitkom.org](http://www.bitkom.org) [Abruf 19.02.11].
11. Bley, H.; Franke, C.: Integration von Produkt- und Produktionsmodell mit Hilfe der Digitalen Fabrik. In: wt Werkstattstechnik online 91 (2001), Heft 4, S. 214-220.
12. Bolstorff, P. [u. a.]: Supply Chain Excellence: A Handbook for Dramatic Improvement Using the SCOR Model. New York: American Management Association 2012.
13. Boppert, J.; Schedlbauer, M.; Günthner, W. A.: Flexibilität durch Standardisierung – Adaptive Logistikplanung. In: Günthner, W. A. (Hrsg.): Neue Wege in der Automobillogistik. Berlin [u. a.]: Springer 2007.
14. Bowersox, D.: Supply chain logistics management. New York: McGraw-Hill 2013.
15. Bracht, U.; Masurat, T.: Quo Vadis Ablaufsimulation?. Die Bedeutung der Ablaufsimulation im Konzept der Digitalen Fabrik. In: Hülsemann, F. [u. a.] [Hrsg.]: Simulationstechnique 18th Symposium in Erlangen September 2005. Erlangen: SCS Publishing House e.V. 2005.
16. Bracht, U.; Rooks, T.: Virtuelle Logistikplanung für die Montage Intelligenter Produzieren. Frankfurt a. M.: VDMA Verlag 2008.

17. Bracht, U. [u. a.]: Nutzung moderner Werkzeuge der Digitalen Fabrik bei KMU. In: Digitales Engineering und Virtuelle Techniken zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme. Magdeburg: Tagungsband 13. IFF-Wissenschaftstage 2010.
18. Bracht, U. [u. a.]: Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele. Berlin [u. a.]: Springer 2011.
19. Brumme, H. [u. a.]: Supply Chain Management und Logistik. Stuttgart: Kohlhammer 2010.
20. Clausen, U.; Hesse, K.: Entsorgung und Kreislaufwirtschaft. In: Arnold D. [u. a.] (Hrsg.): Handbuch Logistik, 3. Auflage. Berlin [u. a.]: Springer 2008.
21. N.N.: Cloud Computing ist erneut IT-Trend des Jahres. Presseinformation des BITKOM vom 18.01.11. Internet-Abuf: [www.bitkom.org](http://www.bitkom.org) [Abuf 19.02.11].
22. Corsten, H.; Gössinger, R.: Einführung in das Supply Chain Management. Oldenburg: Wissenschaftsverlag 2008
23. Delfmann, W.; Klaas-Wissing, T. (Hrsg.): Pioneering supply chain design. a comprehensice insight into emerging trends, technologies and applications. Lohmar [u. a.]: Eul 2012.
24. Dubbel, H.: Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau, 23. Auflage. Berlin [u. a.]: Springer 2011.
25. N.N.: Erfolgreiches Weihnachtsgeschäft mit Hightech. Presseinformation des BITKOM vom 23.12.10. Internet-Abuf: [www.bitkom.org](http://www.bitkom.org) [Abuf 19.02.11].
26. N.N.: Daimler verlagert Produktion nach Amerika. Richtung Westen, wo der Dollar günstig ist. FAZ.net. Internet-Abuf: [www.faz.de](http://www.faz.de) [Abuf 30.12.09]
27. Fandel, G.: Produktionsmanagement. Berlin [u. a.]: Springer 2011.
28. Feldmann, K.; Sutanto, A.; Brossog, M.; Alvarez, C.: Verteilte Rechnersysteme zur kollaborativen Planung von Montagesystemen für mechatronische Produkte. In: Tagungsband zum internationalen Forum Mechatronik (2005), S. 781-792.
29. Feldmann, K.; Schmuck, T.; Brossog, M.: Optimierung der Produktion durch rechnergestützte Simulation von Anlagen und Prozessen. In: Hausladen, I. (Hrsg.): Management am Puls der Zeit. Strategien, Konzepte und Methoden. Festschrift für Prof. Horst Wildemann. München: TCW 2007.
30. Feldmann, K.; Schmuck, T.; Brossog, M.: Entwicklung XML-basierter Modellbeschreibungen für die 3D-Layoutplanung und Simulation von Produktionsanlagen über das Internet. In: ZWF 102 (2007), Heft 5, S. 311-315.
31. Fettke, P.; vom Brocke, J.: Referenzmodell. In: Kurbel, K. [u. a.] (Hrsg.): Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik. Online-Lexikon, 5. Auflage. Frankfurt (Oder): Oldenbourg 2011. Internet-Abuf: [www.encyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de](http://www.encyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de) [Abuf 11.11.11].
32. Fleischmann, B.: Grundlagen. Begriff der Logistik, logistische Systeme und Prozesse: Begriffliche Grundlagen. In: Arnold, D. [u. a.] (Hrsg.): Handbuch Logistik, 3. Auflage. Berlin [u. a.]: Springer 2008.

33. Fischer, P.; Hofer, P.: Lexikon der Informatik, 14. überarbeitete Auflage. Berlin [u. a.]: Springer 2008.
34. Freitag, F.: Geschäftsprozessmodelle und SOA. Hamburg [u. a.]: disserta 2013.
35. Fröschle, H.-P. [u. a.] (Hrsg.): Cloud Computing&SaaS. Praxis der Wirtschaftsinformatik (2010), Heft 275.
36. Gallasch, A.: Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion. Dissertation, TU München. München: Utz 2000.
37. Gleißner, H.; Femerling, J. C.: Logistik: Grundlagen-Übungen-Fallbeispiele. 2. Auflage. Wiesbaden: Gabler 2012.
38. Gleißner, H.; Femerling, Ch.: Logistik. Wiesbaden: Springer Gabler 2012.
39. Göpfert, I [Hrsg.]: Logistik der Zukunft. Wiesbaden: Springer Gabler 2012.
40. Günther, H.-O.; Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik, 9. Aufl. Berlin [u. a.]: Springer 2012.
41. Gronau, N.; Müller, C.: Wissensmanagement in Wertschöpfungsnetzwerken. In: Wojda, F.; Barth, A. (Hrsg.): Innovative Kooperationsnetzwerke. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2006.
42. Gudehus, T.: Technische Logistiksysteme. Innerbetriebliche Logistik. Kommissioniersysteme. In: Arnold D. [u. a.] (Hrsg.): Handbuch Logistik, 3. Auflage. Berlin [u. a.]: Springer 2008.
43. Gutenschwager, K.; Aliche, K.: Supply Chain Simulation mit ICON-SimChain. In: Logistik Management - Prozesse, Systeme, Ausbildung. 2004. S.161-178
44. Haasis, H.-D.: Produktions- und Logistikmanagement. Planung und Gestaltung von Wertschöpfungsprozessen. Wiesbaden: Gabler 2008.
45. Hall, Th. [u. a.]: Application Service Provider and Software as a Service Agreements Line by Line. Boston: Aspatore 2009.
46. Hanisch, A. [u. a.]: Die B2B Simulation Initiative. Simulationsdienstleistungen als E-Business. Proceedings der 7. Magdeburger Logistiktagung. Logistikplanung im e-Zeitalter. Magdeburg: 2001.
47. Heavey, C., Ryan, J.: Process modeling support for the conceptual modeling phase of a simulation project. In: Perrone L. [u. a.] (Hrsg.): Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, Monterey (USA). San Diego: SCS International 2006, S 801-808.
48. Heinrich, G.: Basiswissen Mathematik, Statistik und Operations Research für Wirtschaftswissenschaftler. 5. Auflage. München [u. a.]: Oldenbourg 2013.
49. Herden, S. [u. a.]: Software-Architekturen für das E-Business. Enterprise-Application-Integration mit verteilten Systemen. Berlin [u. a.]: Springer 2006.
50. Heiserich, O. E.: Logistik: Eine praxisorientierte Einführung. 4. Auflage. Wiesbaden: Gabler 2011.
51. Inderfurth, K.; Jensen, T.: Grundlagen. Planung logistischer Systeme: Lagerbestandsmanagement. In: Arnold D. [u. a.] (Hrsg.): Handbuch Logistik, 3. Auflage. Berlin [u. a.]: Springer 2008.

52. Kapp, R.; Le Blond, J.; Westkämper, E.: Fabrikstruktur und Logistik integriert planen. Erweiterung eines kommerziellen Werkzeugs der Digitalen Fabrik für den Mittelstand. In: wt Werkstattstechnik online 95 (2005), Heft 4, S. 191-196.
53. Karif, U. [Red.]: Duden. Das Fremdwörterbuch. 10. Auflage. Mannheim [u. a.]: Dudenverlag 2010.
54. Kemper, A.: Datenbanksysteme. München: Oldenbourg 2013.
55. Klaus, P.: Gabler Lexikon Logistik. Management logistischer Netzwerke und Flüsse. 5. Auflage. Wiesbaden: Gabler 2012.
56. Klettke, M.; Meyer, H.: XML & Datenbanken. Konzepte, Sprachen und Systeme. Heidelberg: dpunkt 2003.
57. Knemeyer, M. A.; Murphy, P. R.: Evaluating the Performance of Third-Party Logistics Arrangements. A Relationship Marketing Perspective. In: The Journal of Supply Chain Management - A Global Review of Purchasing and Supply 40 (2004), Heft 1, S. 35-51.
58. Knolmayer, G. F.: Sourcing-Entscheidungen aus den Perspektiven des Produktions- und Informationsmanagements. In: Specht, D. (Hrsg.): Insourcing, Outsourcing, Offshoring. Tagungsband der Herbsttagung 2005 der Wissenschaftlichen Kommission Produktionswirtschaft im VHB. Wiesbaden: DUV 2007.
59. Kuhn, A.; Rabe, M.: Simulation in Produktion und Logistik – Fallbeispielsammlung. Berlin [u. a.]: Springer 1998.
60. Kuhn, A.; Wenzel, S.: Simulation logistischer Systeme. In: Arnold D. [u. a.] (Hrsg.): Handbuch Logistik, 3. Auflage. Berlin [u. a.]: Springer 2008.
61. Kummer, S.; Grün, O.; Jammernegg, W.: Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik. 2. Auflage. München [u. a.]: Pearson Studium 2011.
62. Koch, W.: Zur Wertschöpfungstiefe von Unternehmen. Die strategische Logik der Integration. Wiesbaden: DUV 2006.
63. Koether, R (Hrsg.): Taschenbuch der Logistik. 3. Auflage. München: Hanser 2008.
64. Konopka, A. [u. a.]: Duden. Das Bedeutungswörterbuch. 4. Auflage. Mannheim [u. a.]: Dudenverlag 2011.
65. Košturiak, J.: Simulation von Produktionssystemen. Wien [u. a.]: Springer 1995.
66. Large, R. O.: Outsourcing von komplexen logistischen Dienstleistungen: Dokumentenanalyse und Überlegungen zum Erfolg der Kontraktlogistik auf Basis des Beziehungsmarketings und der Transaktionskostentheorie. In: Specht, D. (Hrsg.): Insourcing, Outsourcing, Offshoring. Tagungsband der Herbsttagung 2005 der Wissenschaftlichen Kommission Produktionswirtschaft im VHB. Wiesbaden: DUV 2007.
67. Linten, M. [u. a.]: PC-Netzwerke. Bonn: Galileo Press 2013.
68. Lödging, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung. Berlin [u. a.]: Springer 2008.

- 
69. Lu, R. F. [u. a.]: NIST XML Simulation Interface Specification at Boeing: A Case Study. Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, IEEE Press, Piscataway, NJ, S. 1230-1237.
  70. Meier, H.; Homuth, M.: Erschließung der Potenziale der Digitalen Fabrik in heterogener Systemlandschaft. In: ZWF 100 (2005), Heft 1-2, S. 20-24.
  71. Meier, H.; Quade, N.: Planungsunterstützung durch Integration hierarchischer Modelle in das System „Digitale Fabrik“. In: wt Werkstattstechnik online 97 (2007), Heft 1-2, S. 25-29.
  72. Menges, R.: Frühzeitige Produktbeeinflussung und Prozessabsicherung. Die Digitale Fabrik ist der Schlüssel zum Erfolg. In: ZWF 100 (2005), Heft 1-2, S. 25-31.
  73. Merk, J.; Schote, O.: Erfolgsfaktoren im Service Supply Chain Management der Hightech-Industrie. In: Barkawi, K. [u. a.] (Hrsg.): Erfolgreich mit After Sales Services. Geschäftsstrategien für Servicemanagement und Ersatzteillogistik. Berlin [u. a.]: Springer 2006.
  74. Merten M.: Supply Chain Design. Die Optimierung des Gesamtsystems ist besser als die Optimierung von Teilsystemen. Norderstedt: Grin 2009.
  75. Ney, M.: Wirtschaftlichkeit von Interaktionsplattformen. Effizienz und Effektivität an der Schnittstelle zum Kunden. Dissertation, TU München. Wiesbaden: DUV 2006.
  76. Pawellek G.: Logik der Produktionslogistik. München: Oldenbourg 2009.
  77. Pohl, S. [u. a.]: Verifizierung, Validierung und Akkreditierung von Modellen, Simulationen und Förderationen. Abschlussbericht Studienkennziffer E/F11S/2A280/T5228. Neubiberg: Institut für Technik Intelligenter Systeme (ITIS) 2005.
  78. Pollert, A. [u. a.]: Duden. Wirtschaft von A bis Z. Grundlagenwissen für Schule und Studium, Beruf und Alltag. 4. Aufl. Mannheim [u. a.]: Dudenverlag 2010.
  79. Postinett A.: Konsumelektronik: Weiter wachsen, komme was da wolle. München: Hanser 2007. In: Handelsblatt vom 7.1.09. Internet-Abruf: [www.handelsblatt.de](http://www.handelsblatt.de) [Abruf 10.01.10].
  80. Prahalad, C. K.; Hamel, G.: The Core Competence of the Corporation. In: Harvard Business Review, Mai-Juni (1990), S. 79-91.
  81. Preiß, N.: Relationale Datenbanken und SQL in Theorie und Praxis. Berlin [u. a.]: Springer Vieweg 2012.
  82. Rabe, M.; Spieckermann S.; Wenzel, S.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin [u. a.]: Springer 2008.
  83. Reimers, S.; Thies, G.: PHP 5.4 und MySQL 5.5. Bonn: Galileo Press 2012.
  84. Reinhardt, A.[u. a.]: Formale Beschreibung von Simulationsmodellen in XML. In: ASIM, Tagungsband zum 17. Symposium Simulationstechnik, Magdeburg 2003, S. 69-74.
  85. Reithofer, N.: Nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit von Produktionsnetzwerken durch Innovation, Wandlungsfähigkeit und Wertschöpfungsgestaltung. In: Haus-

- laden, I. (Hrsg.): Management am Puls der Zeit. Strategien, Konzepte und Methoden. Festschrift für Prof. Horst Wildemann. München: TCW 2007.
86. Robinson, S.: Simulation: The Practice of model development and use. Chichester: John Wiley & Sons 2004.
87. Robinson, S.: Conceptual modelling for simulation. Issues and research requirements. In: Perrone L.; Wieland F. [u. a.] (Hrsg.): Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference. Monterey (USA): SCS International 2006.
88. Ropol, G.: Allgemeine Technologie: eine Systemtheorie der Technik. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2009.
89. Schaller, A.: Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte. Dissertation, Universität Erlangen. Bamberg: Meisenbach 2009.
90. Schedlbauer, M.; Wulz, J.; Günthner, W. A.: Adaptive Logistikplanung durch digitale Werkzeuge. In: Günthner, W. A. (Hrsg.): Neue Wege in der Automobillogistik. Berlin [u. a.]: Springer 2007.
91. Schönsleben, P.: Integrales Logistikmanagement. Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend. 6., bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin [u. a.]: Springer 2011.
92. Schlögl, W.: Integriertes Simulations-Datenmanagement für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung. Dissertation, Universität Erlangen. Bamberg: Meisenbach 2000.
93. Schmid, S.; Grosche, P.: Globale Wertschöpfung im Volkswagen-Konzern. Auf dem Weg zu mehr Dezentralisierung bei Produktion und Entwicklung. Berlin: ESCP-EAP 2008.
94. Schmidt, M.: Logistikprozesse in Industrie und Handel. Produktionsplanung und Steuerung. In: Arnold D. [u. a.] (Hrsg.): Handbuch Logistik, 3. Auflage. Berlin [u. a.]: Springer 2008.
95. Schmuck, T. [u. a.]: Simulation von Distributionsprozessen bei Produkten der Konsumelektronik. In: Simulation und Visualisierung 2007. Magdeburg: SCS Publishing House e.V. 2007.
96. Schneltzer, M.; Schönsleben, R. A.; Sennheiser, A.: Unternehmensbezogener Wertbeitrag von Beschaffung und Logistik. In: Garcia Sanz, F. J. [u. a.] (Hrsg.): Die Automobilindustrie auf dem Weg zur globalen Netzwerkkompetenz. Berlin [u. a.]: Springer 2007.
97. Scholl, A.: Grundlagen der modellgestützten Planung. In: Arnold, D. [u. a.] (Hrsg.): Handbuch Logistik, 3. Auflage. Berlin [u. a.]: Springer 2008.
98. Scholz-Reiter, B. [u. a.]: Dynamik logistischer Systeme. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin [u. a.]: Springer 2008.
99. Schraft, D.; Bierschenk, S.: Digitale Fabrik und ihre Vernetzung mit der realen Fabrik. In: ZWF 100 (2005), Heft 1-2, S. 14-18.
100. Schulte, C.: Logistik – Wege zur Optimierung der Supply Chain. München: Vahlen 2009.

101. N.N.: Schwellenländer treiben die weltweiten Hightech-Märkte. Presseinformation des BITKOM vom 29.09.09. Internet-Abruf: [www.bitkom.org](http://www.bitkom.org) [Abruf 11.01.10].
102. Schwarz, B. [u. a.]: High performance MySQL. Peking [u. a.]: O'Reilly 2012.
103. Supply Chain Council: Supply-Chain Operations Reference-Model. Version 10, Pittsburgh (Pennsylvania) 2010.
104. Simon, H.: Das Risiko der Deglobalisierung. In: manager magazin 39 (2009), Heft 4, S. 106.
105. N.N.: Standard for definition and measurement of equipment (RAM), E10-0699, 2010.
106. Sutanto, A.: Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments. Dissertation am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Universität Erlangen. Bamberg: Meisenbach 2005.
107. Sihm, W. [u. a.]: Internetbasierte Konfiguration und Simulation von Produktionssystemen. In: Simulation und Visualisierung 2002, S. 225-236. Magdeburg: SCS European Publishing House 2002.
108. Straube F. [u. a.]: Trends und Strategien in der Logistik. Ein Blick auf die Agenda des Logistik-Managements 2010.
109. Tempelmeier, H.: Material-Logistik. 7. Auflage. Berlin [u. a.]: Springer 2008.
110. Tiemeyer, E.: IT-Management. München: Hanser 2009.
111. Vastag, A.; Schürholz, A.: Distribution. In: Arnold D. [u. a.] (Hrsg.): Handbuch Logistik, 3. Auflage. Berlin [u. a.]: Springer 2008.
112. VDI Richtlinie 3590 Blatt 1: Kommissioniersystem; Grundlagen. Berlin: Beuth 1994.
113. VDI Richtlinie 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen. Grundlagen, 2. Auflage. Berlin: Beuth 2000.
114. VDI Richtlinie 4499 Blatt 1: Die Digitale Fabrik. Grundlagen. Berlin: Beuth 2006.
115. Voß, P.-H.: Horizontale Supply-Chain-Beziehungen. Wiesbaden: DUV 2007.
116. Walsh, G. [u. a.]: Grundlagen des Web 2.0. In: Walsh, G. [u. a.] (Hrsg.): Web 2.0. Neue Perspektiven für Marketing und Medien. Berlin [u. a.]: Springer 2010.
117. Weber, J. [u. a.]: Logistik- und Supply Chain Controlling. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 2010.
118. Wenzel, S.: Verbesserung der Informationsgestaltung in der Simulationstechnik unter Nutzung autonomer Visualisierungswerkzeuge. Dortmund: Verlag Praxiswissen 1998.
119. Wenzel, S. (Hrsg.): Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik. Delft [u. a.]: SCS 2000.
120. Wenzel, S.: Die Digitale Fabrik – Ein Konzept für interoperative Modellnutzung. In: Industrie Management 20 (2004), Heft 3, S. 54-58.

121. Wenzel, S. [u. a.]: Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik. Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Berlin [u. a.]: Springer 2008.
122. Werner, H.: Supply Chain Management - Grundlagen, Strategien, Instrumente und Controlling. 4. Auflage. Wiesbaden: Gabler 2011.
123. Westkämper, E.: Die Digitale Fabrik – ein Produkt für Produkte. In: wt Werkstattstechnik online 97 (2007), Heft 3, S. 107.
124. Wildemann, H.: Prophylaktisches Entstörungsmanagement in dezentralen PPS-Systemen. In: Abschlussbericht zum Bayerischen Forschungsverbund Simulationstechnik (FORSIM). Erlangen [u. a.]: 1999.
125. Wöhe, G.: Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 24. Auflage. München: Vahlen 2010.
126. Wortmann, D.: Dynamische Simulationsmodelle verbinden Produktions- und Logistikprozesse. In: ZWF 101 (2006), Heft 1-2, S. 77-80.
127. Zäh, F.; Müller, N.; Aull, F.; Sudhoff, W.: Digitale Planungswerkzeuge. Methodik zur Bewertung von Potentialen und Risiken. In: wt Werkstattstechnik online 95 (2005), Heft 4, S. 175-180.
128. Zentes, J.; Schramm-Klein H.: Neue Anforderungen an die Handelslogistik – Implikationen aus Theorie und Praxis mit besonderem Fokus auf Multi-Channel-Systeme des Handels. In: Nyhuis P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin [u. a.]: Springer 2008.
129. Zeier, A.: Identifikation und Analyse branchenspezifischer Faktoren für den Einsatz von Supply-Chain-Management-Software. Teil III: Evaluation der betriebstopologischen Anforderungsprofile auf Basis des SCM-Kernschalen-Modells in der Praxis für die Branchen Elektronik, Automobil, Konsumgüter, Chemie/Pharma. Bamberg, Erlangen: Forwin 2002.



## Summary

Globalized markets in connection with worldwide production networks pose new challenges for production planning and especially for logistics. Innovative and efficient methods such as process simulation are available to help cope with these demands. These methods offer an especially high degree of support potential in the interpretation of production and logistics networks, as they reflect the dynamic effects within these systems.

However, they have not been extensively used. On the one hand, that is due to the fact that the implementation of simulation studies is usually costly and requires the consultation of specialized experts. On the other hand, the problematic availability of usually expensive and maintenance-intensive special simulation tools and the hardware resources also required impede its widespread use. The combination of reference modeling together with web-based simulation has the potential of minimizing the barriers described and integrating the simulation even more into daily operations.

This paper has thus set the following goals based on the challenges mentioned above: On the one hand to develop a reference model for the modeling and simulation of logistics and supply chain networks that offers a user who has no expertise in simulation the possibility of quickly depicting complex supply chain networks in a simulation system; on the other to develop a web-based service in the modern Cloud Computing sense, which minimizes the problems of utilizing simulation so far. Thus, web-based simulation increases the efficiency of hardware and software use, simplifies the access to simulation and increases user friendliness through the use of integrated building block libraries.

The topics of global value networks were first considered according to an analysis of the status quo or State is. It shows which strategies of production engineering must be followed to meet the requirements of globalization. Furthermore, the role of logistics in globally distributed work-sharing networks was shown and supply chain management was explained as the modern way of handling delivery networks.

It was determined that the use of process simulation in the planning of large supply chain networks has a sustained minimizing effect when it comes to uncertainties in the later operating processes phase.

Special attention was given to production and logistics when it comes to the economic value of mobile communications electronics, as this is a good example of worldwide production. To do that the chain of processes in the production of mobile communications devices was first analyzed and especially the distribution process examined. It was determined that the focus has shifted from the optimization of the

pure production process to the optimization of the distribution or supply chain processes. These are constantly and quickly changing. Simulation in connection with reference models represents a huge increase in efficiency.

The key role of simulation within the digital factory is demonstrated and a procedural model for the methodical execution of simulation studies is represented by the increased demand for the stronger use of digital methods in the planning of production and logistics. Furthermore, current methods used in information and communications technology were incorporated and a vision developed of how planning and simulations in production and logistics can be digitally supported in the future.

Based on the results developed so far, a modular reference model for the interpretation of complex supply chain networks has been created. Efficient and low-cost modeling has been made possible using logistical basic building blocks we have developed. In addition, access to this method has been made easier for non-simulation experts. The functionality of the reference model was proved through the simulation of a consumption-based disposition process and the representation and removal of the bull-whip effect in a logistical system.

Further advantages are created by now being able to offer software applications with modern communications methods over the internet. Thus; on the one hand, it is possible to lower the costs for the sheer provision of the application or to eliminate them completely by only creating costs when using the application. On the other hand large companies can bundle their software and hardware resources and make them available when needed.

As there are not yet any noteworthy solutions with respect to web-based simulations, such a system was created and its feasibility as an example implemented within the framework of this paper. It is based on a client/server architecture, on which a databank is the central element between modeling and simulation.. It thus not only serves as pure data storage, but also as a communications interface which means that the system can be used independently with any simulator.

The results achieved in this paper form a basis for reference modeling and web-based simulation to make simulation in production and logistics available to a wide user field. However, they also form the basis for the further development of the methods of the digital factory toward modern information and communications technologies. That encompasses the realization of the vision already presented in the paper of an open and thus self-growing internet platform for planning in production and logistics. Furthermore, such a platform offers a variety of possibilities: Thus it is imaginable that it is not only for planning, but can also be further developed for the monitoring and telediagnosis of real facilities.

# Reihe Fertigungstechnik - Erlangen

[www.mb.uni-erlangen.de/diss](http://www.mb.uni-erlangen.de/diss)

**Band 1 - 52**

**Carl Hanser Verlag, München**

**ab Band 53**

**Meisenbach Verlag, Bamberg**

**45,-- Euro**

Band 1: Andreas Hemberger

**Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion  
durch wissensbasierte Systeme**

208 Seiten, 107 Bilder. 1988.

Band 2: Detlef Classe

**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme  
durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**

194 Seiten, 70 Bilder. 1988.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting

**Projektierung von Montagesystemen**

201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Band 4: Karsten Schlüter

**Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen  
durch den Einsatz der Simulationstechnik**

177 Seiten, 97 Bilder. 1989.

Band 5: Shir-Kuan Lin

**Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern**

168 Seiten, 46 Bilder. 1989.

Band 6: Rudolf Nuss

**Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität  
im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden**

206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989.

Band 7: Wolfgang Scholz

**Modell zur datenbankgestützten Planung  
automatisierter Montageanlagen**

194 Seiten, 89 Bilder. 1989.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier

**Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens  
von Hartmetall-Fließpreßmatrizen**

179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989.

Band 9: Rainer Eisele

**Konzeption und Wirtschaftlichkeit  
von Planungssystemen in der Produktion**

183 Seiten, 86 Bilder. 1990.

Band 10: Rolf Pfeiffer

**Technologisch orientierte Montageplanung  
am Beispiel der Schraubtechnik**

216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990.

Band 11: Herbert Fischer

**Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung  
der rechnerintegrierten Teilefertigung**

201 Seiten, 82 Bilder. 1990.

Band 12: Gerhard Kleineidam  
**CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung**  
203 Seiten, 107 Bilder. 1990.

Band 13: Frank Vollertsen  
**Pulvermetallurgische Verarbeitung  
eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls**  
XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990.

Band 14: Stephan Biermann  
**Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik  
für das Schneiden mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern**  
VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991.

Band 15: Uwe Geißler  
**Material- und Datenfluß  
in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle**  
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991.

Band 16: Frank Oswald Hake  
**Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems  
für automatisierte Montagezellen**  
XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.

Band 17: Herbert Reichel  
**Optimierung der Werkzeugbereitstellung  
durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung**  
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991.

Band 18: Josef Scheller  
**Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen  
für rechnergeführte Montagezellen**  
198 Seiten, 65 Bilder. 1991.

Band 19: Arnold vom Ende  
**Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize**  
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991.

Band 20: Joachim Schmid  
**Beitrag zum automatisierten Bearbeiten  
von Keramikguß mit Industrierobotern**  
XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991.

Band 21: Egon Sommer  
**Multiprozessorsteuerung für kooperierende  
Industrieroboter in Montagezellen**  
188 Seiten, 102 Bilder. 1991.

Band 22: Georg Geyer  
**Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten  
in der Montage**  
192 Seiten, 112 Bilder. 1991.

Band 23: Rainer Flohr  
**Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik  
in der Oberflächenmontage (SMT)**  
186 Seiten, 79 Bilder. 1991.

Band 24: Alfons Rief  
**Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden  
und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung**  
VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991.

Band 25: Christoph Thim  
**Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen  
in der Elektronikmontage durch Simulation**  
188 Seiten, 74 Bilder. 1992.

Band 26: Roland Müller  
**CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschneiden  
von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen**  
141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992.

Band 27: Günther Schäfer  
**Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung**  
195 Seiten, 76 Bilder. 1992.

Band 28: Martin Hoffmann  
**Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette  
für die Herstellung von Blechbiegeteilen**  
149 Seiten, 89 Bilder. 1992.

Band 29: Peter Hoffmann  
**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen :  
Prozessführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung  
von Blechformteilen**  
186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992.

Band 30: Olaf Schröder  
**Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen**  
180 Seiten, 84 Bilder. 1992.

Band 31: Hubert Reinisch  
**Planungs- und Steuerungswerkzeuge  
zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen**  
XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.

Band 32: Brigitte Bärnreuther  
**Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens  
von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen**  
XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.

Band 33: Joachim Hutfless  
**Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik  
in der Strahlführung einer CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage**  
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993.

Band 34: Uwe Günzel  
**Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative  
und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung**  
XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993.

Band 35: Bertram Ehmann  
**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung  
auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**  
XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.

Band 36: Harald Kolléra  
**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems  
für das Laserstrahlschneiden**  
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993.

Band 37: Stephanie Abels  
**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen  
in einem integrierten Simulationssystem**  
188 Seiten, 88 Bilder. 1993.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel  
**Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher**  
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993.

Band 39: Norbert Lutz  
**Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe  
mit XeCl-Excimerlaserstrahlung**  
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994.

Band 40: Konrad Grampp  
**Rechnerunterstützung bei Test und Schulung  
an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien**  
178 Seiten, 88 Bilder. 1995.

Band 41: Martin Koch  
**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung  
in der Investitionsgüterindustrie**  
169 Seiten, 68 Bilder. 1995.

Band 42: Armin Gropp  
**Anlagen- und Prozessdiagnostik  
beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser**  
160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995.

Band 43: Werner Heckel  
**Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biege winkelmessung  
mit dem Lichtschnittverfahren**  
149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tabellen. 1995.

Band 44: Armin Rothhaupt  
**Modulares Planungssystem  
zur Optimierung der Elektronikfertigung**  
180 Seiten, 101 Bilder. 1995.

Band 45: Bernd Zöllner  
**Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion**  
195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tabellen. 1995.

Band 46: Bodo Vormann  
**Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung  
komplexer Blechbiegeteile**  
126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995.

Band 47: Peter Schnepf  
**Zielkostenorientierte Montageplanung**  
144 Seiten, 75 Bilder. 1995.

Band 48: Rainer Klotzbücher  
**Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung  
in flexiblen Fertigungssystemen**  
156 Seiten, 62 Bilder. 1995.

Band 49: Wolfgang Greska  
**Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen**  
144 Seiten, 96 Bilder. 1995.

Band 50: Jörg Franke  
**Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien  
für räumliche spritzgessene Schaltungsträger (3-D MID)**  
196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tabellen. 1995.

Band 51: Franz-Josef Zeller  
**Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter**  
190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995.

Band 52: Michael Solvie  
**Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung  
in Feldkommunikationssystemen**  
200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996.

Band 53: Robert Hopperdietzel  
**Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie**  
180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996.  
ISBN 3-87525-070-2

Band 54: Thomas Rebhan  
**Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern –  
Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen**  
148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996.  
ISBN 3-87525-075-3

Band 55: Henning Hanebuth  
**Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik**  
157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996.  
ISBN 3-87525-074-5

Band 56: Uwe Schönherr  
**Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen  
mit kooperierenden Robotern**  
188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996.  
ISBN 3-87525-076-1

Band 57: Stefan Holzer  
**Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung**  
162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 1996.  
ISBN 3-87525-079-6

Band 58: Markus Schultz  
**Fertigungsqualität beim 3D–Laserstrahlschweißen  
von Blechformteilen**  
165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-080-X

Band 59: Thomas Krebs  
**Integration elektromechanischer CA–Anwendungen  
über einem STEP–Produktmodell**  
198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-081-8

Band 60: Jürgen Sturm  
**Prozeßintegrierte Qualitätssicherung  
in der Elektronikproduktion**  
167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-082-6

Band 61: Andreas Brand  
**Prozesse und Systeme zur Bestückung  
räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)**  
182 Seiten, 100 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-087-7

Band 62: Michael Kauf  
**Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter  
einer CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage**  
140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-083-4

Band 63: Peter Steinwässer  
**Modulares Informationsmanagement  
in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung**  
190 Seiten, 87 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-084-2

Band 64: Georg Liedl  
**Integriertes Automatisierungskonzept  
für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion**  
196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-086-9

Band 65: Andreas Otto  
**Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen**  
132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tabelle. 1997.  
ISBN 3-87525-089-3

Band 66: Wolfgang Blöchl  
**Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC–Steuerungen  
zur Prozeß- und Programmoptimierung**  
168 Seiten, 96 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-091-5

Band 67: Klaus–Uwe Wolf  
**Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung  
zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln**  
186 Seiten, 125 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-092-3

Band 68: Frank Backes  
**Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D–Laserstrahlbearbeitung**  
138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-093-1

Band 69: Jürgen Kraus  
**Laserstrahlumformen von Profilen**  
137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-094-X

Band 70: Norbert Neubauer  
**Adaptive Strahlführungen für CO<sub>2</sub>-Laseranlagen**  
120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-095-8

Band 71: Michael Steber

**Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen  
in der automatisierten Montage**

168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen, 1997.  
ISBN 3-87525-096-6

Band 72: Markus Pfestorf

**Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik**

162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tabellen, 1997.  
ISBN 3-87525-097-4

Band 73: Volker Franke

**Integrierte Planung und Konstruktion  
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung**

143 Seiten, 81 Bilder, 1998.  
ISBN 3-87525-098-2

Band 74: Herbert Scheller

**Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte  
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen**

184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tabellen, 1998.  
ISBN 3-87525-099-0

Band 75: Arthur Meßner

**Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile  
– Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung**

164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tabellen, 1998.  
ISBN 3-87525-100-8

Band 76: Mathias Glasmacher

**Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen**

184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tabellen, 1998.  
ISBN 3-87525-101-6

Band 77: Michael Schwind

**Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften  
von Feiblechen mit dem Wirbelstromverfahren**

124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tabellen, 1998.  
ISBN 3-87525-102-4

Band 78: Manfred Gerhard

**Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung  
der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen**

179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tabellen, 1998.  
ISBN 3-87525-103-2

Band 79: Elke Rauh

**Methodische Einbindung der Simulation  
in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe**

192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tabellen, 1998.  
ISBN 3-87525-104-0

Band 80: Sorin Niederkorn

**Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung  
bei umformtechnischen Prozessen**

99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tabellen, 1998.  
ISBN 3-87525-105-9

Band 81: Stefan Schubert

**Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern  
unter Einsatz von adaptiven Optiken**

140 Seiten, 63 Bilder, 3 Tabellen, 1998.  
ISBN 3-87525-106-7

Band 82: Armando Walter Colombo

**Development and Implementation of Hierarchical Control Structures  
of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets**

216 Seiten, 86 Bilder, 1998.  
ISBN 3-87525-109-1

Band 83: Otto Meedt

**Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling  
durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung**

186 Seiten, 103 Bilder, 1998.  
ISBN 3-87525-108-3



Band 84: Knuth Götz  
**Modelle und effiziente Modellbildung  
zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion**  
212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-112-1

Band 85: Ralf Luchs  
**Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe  
zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT**  
176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-113-7

Band 86: Frank Pöhlau  
**Entscheidungsgrundlagen zur Einführung  
räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**  
144 Seiten, 99 Bilder. 1999.  
ISBN 3-87525-114-8

Band 87: Roland T. A. Kals  
**Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes**  
128 Seiten, 68 Bilder, 11 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-115-6

Band 88: Gerhard Luhn  
**Implizites Wissen und technisches Handeln  
am Beispiel der Elektronikproduktion**  
252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tabelle. 1999.  
ISBN 3-87525-116-4

Band 89: Axel Sprenger  
**Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen**  
114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-117-2

Band 90: Hans-Jörg Pucher  
**Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken  
und Laserstrahllöten von Mikrokontakten**  
158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-118-9

Band 91: Horst Arnet  
**Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung**  
128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-120-2

Band 92: Doris Schubart  
**Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung  
beim Abtragen mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung**  
133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-122-9

Band 93: Adrianus L. P. Coremans  
**Laserstrahlsintern von Metallpulver – Prozeßmodellierung,  
Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper**  
184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-124-5

Band 94: Hans-Martin Biehler  
**Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung  
und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung**  
194 Seiten, 105 Bilder. 1999.  
ISBN 3-87525-126-1

Band 95: Wolfgang Becker  
**Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften  
excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken**  
175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-127-X

Band 96: Philipp Hein  
**Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren:  
Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung**  
129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-128-8

Band 97: Gunter Beitinger  
**Herstellungs- und Prüfverfahren  
für thermoplastische Schaltungsträger**  
169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-129-6

Band 98: Jürgen Knobloch  
**Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von  
Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden**  
155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-130-X

Band 99: Frank Breitenbach  
**Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie  
elektronischer SMT-Bauelemente**  
147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen. 2000.  
ISBN 3-87525-131-8

Band 100: Bernd Falk  
**Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage  
für Werkzeuge der Kaltmassivumformung**  
134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tabellen. 2000.  
ISBN 3-87525-136-9

Band 101: Wolfgang Schlögl  
**Integriertes Simulationsdaten-Management  
für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung**  
169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tabellen. 2000.  
ISBN 3-87525-137-7

Band 102: Christian Hinsel  
**Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter  
Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung**  
130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tabellen. 2000.  
ISBN 3-87525-138-5

Band 103: Stefan Bobbert  
**Simulationsgestützte Prozessauslegung  
für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren**  
123 Seiten, 77 Bilder. 2000.  
ISBN 3-87525-145-8

Band 104: Harald Rottbauer  
**Modulares Planungswerkzeug  
zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion**  
166 Seiten, 106 Bilder. 2001.  
ISBN 3-87525-139-3

Band 105: Thomas Hennige  
**Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen**  
119 Seiten, 50 Bilder. 2001.  
ISBN 3-87525-140-7

Band 106: Thomas Menzel  
**Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung  
und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse**  
152 Seiten, 71 Bilder. 2001.  
ISBN 3-87525-142-3

Band 107: Thomas Stöckel  
**Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebe-  
ne in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks**  
147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-143-1

Band 108: Frank Pitter  
**Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen  
durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen**  
158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-144-X

Band 109: Markus Korneli  
**Integration lokaler CAP-Systeme  
in einen globalen Fertigungsdatenverbund**  
121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-146-6

Band 110: Burkhard Müller  
**Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern – Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion**  
128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tabellen. 2001  
ISBN 3-87525-159-8

Band 111: Jürgen Göhringer  
**Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen**  
178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-147-4

Band 112: Robert Feuerstein  
**Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung**  
161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-151-2

Band 113: Marcus Reichenberger  
**Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)**  
165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-152-0

Band 114: Alexander Huber  
**Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren**  
122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-153-9

Band 115: Sami Krimi  
**Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion**  
155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-157-1

Band 116: Marion Merklein  
**Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften**  
122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-156-3

Band 117: Thomas Collisi  
**Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten**  
181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-164-4

Band 118: Markus Koch  
**Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik**  
176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-165-2

Band 119: Michael Schmidt  
**Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion**  
152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-166-0

Band 120: Nicolas Tiesler  
**Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile**  
126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-175-X

Band 121: Lars Pursche  
**Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung**  
111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-183-0

Band 122: Jan-Oliver Brassel  
**Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen**  
148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-181-4

Band 123: Mark Geisel

**Prozeßkontrolle und –steuerung beim Laserstrahlschweißen  
mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik**

135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-180-6

Band 124: Gerd Eßer

**Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf  
Thermoplastsubstraten für die MID-Technik**

148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-171-7

Band 125: Marc Fleckenstein

**Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen  
elektronischer Kontakte**

159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-170-9

Band 126: Stefan Kaufmann

**Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen  
von Silizium für Komponenten der Optoelektronik**

159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-172-5

Band 127: Thomas Fröhlich

**Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente  
mit Diodenlaserstrahlung**

143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-186-5

Band 128: Achim Hofmann

**Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von  
Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen**

113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tabellen  
ISBN 3-87525-182-2

Band 129: Ingo Kriebitzsch

**3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik**

129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-169-5

Band 130: Thomas Pohl

**Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter  
Formplatinen aus Aluminiumlegierungen**

133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tabellen. 2002  
ISBN 3-87525-173-3

Band 131: Matthias Wenk

**Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die  
flexible Sensorführung von Industrierobotern**

167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tabelle. 2002.  
ISBN 3-87525-174-1

Band 132: Matthias Negendanck

**Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe  
zum Laserstrahlschweißen**

116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tabellen  
ISBN 3-87525-184-9

Band 133: Oliver Kreis

**Integrierte Fertigung –  
Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und  
Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation**

167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tabellen  
ISBN 3-87525-176-8

Band 134: Stefan Trautner

**Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der  
Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten**

179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-177-6

Band 135: Roland Meier

**Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher  
spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**

155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-178-4

Band 136: Jürgen Wunderlich

**Kostensimulation – Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung  
komplexer Produktionssysteme**

202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-179-2

Band 137: Stefan Novotny

**Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und  
Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur**

132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-185-7

Band 138: Andreas Licha

**Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter  
Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter**

158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tabellen. 2003.  
ISBN 3-87525-189-X

Band 139: Michael Eisenbarth

**Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik  
für mechatronische Baugruppen**

207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tabellen. 2003.  
ISBN 3-87525-190-3

Band 140: Frank Christoph

**Durchgängige simulationsgestützte Planung von  
Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion**

187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tabellen. 2003.  
ISBN 3-87525-191-1

Band 141: Hinnerk Hagenah

**Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden  
Mähaltigkeit für das Blechbiegen**

131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tabellen. 2003.  
ISBN 3-87525-192-X

Band 142: Ralf Eckstein

**Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile –  
Materialeinfluss und Materialverhalten**

148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tabellen. 2003.  
ISBN 3-87525-193-8

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

**Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien  
mit homogener Lichtlinie**

138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tabellen. 2003.  
ISBN 3-87525-196-2

Band 144: Andreas Kach

**Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen  
an Bauteilabweichungen**

139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 2004.  
ISBN 3-87525-197-0

Band 145: Stefan Hierl

**System- und Prozesstechnik für das simultane Löten mit  
Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen**

124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tabellen. 2004.  
ISBN 3-87525-198-9

Band 146: Thomas Neudecker

**Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge-  
Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung**

166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tabellen. 2004.  
ISBN 3-87525-200-4

Band 147: Ulrich Wenger

**Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze**  
132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tabellen. 2004.  
ISBN 3-87525-203-9

Band 148: Stefan Slama

**Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz**  
188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tabellen. 2004.  
ISBN 3-87525-204-7

Band 149: Thomas Wurm

**Laserstrahljustieren mittels Aktoren – Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik**  
122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tabellen. 2004.  
ISBN 3-87525-206-3

Band 150: Martino Celeghini

**Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie**  
146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tabellen. 2004.  
ISBN 3-87525-207-1

Band 151: Ralph Hohenstein

**Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung**  
282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tabellen. 2004.  
ISBN 3-87525-210-1

Band 152: Angelika Hutterer

**Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse**  
149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-212-8

Band 153: Emil Egerer

**Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur**  
158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-213-6

Band 154: Rüdiger Holzmann

**Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen**  
186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-217-9

Band 155: Marco Nock

**Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen**  
Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens  
164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-218-7

Band 156: Frank Niebling

**Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile**  
148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-219-5

Band 157: Markus Meiler

**Großserientauglichkeit trockenschmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk**  
Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche  
104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-221-7

Band 158: Agus Sutanto

**Solution Approaches for Planning of Assembly Systems  
in Three-Dimensional Virtual Environments**

169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-220-9

Band 159: Matthias Boiger

**Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen  
auf der Basis flexibler Schaltungsträger**

175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-222-5

Band 160: Matthias Pitz

**Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle**

120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-223-3

Band 161: Meik Vahl

**Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses  
beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen**

165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-224-1

Band 162: Peter K. Kraus

**Plattformstrategien – Realisierung einer varianz- und  
kostenoptimierten Wertschöpfung**

181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-226-8

Band 163: Adrienn Cser

**Laserstrahlschmelzabtrag – Prozessanalyse und -modellierung**

146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-227-6

Band 164: Markus C. Hahn

**Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von  
Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern**

143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-228-4

Band 165: Gordana Michos

**Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen**

146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-230-6

Band 166: Markus Stark

**Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays**

158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-231-4

Band 167: Yurong Zhou

**Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen  
Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion**

156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-232-2

Band 168: Werner Enser

**Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer  
Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen**

190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-233-0

Band 169: Katrin Melzer

**Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen  
Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle**

155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-234-9

Band 170: Alexander Putz

**Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von  
armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall**

137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tabellen. 2006.  
ISBN 3-87525-237-3

Band 171: Martin Prechtl

**Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien –  
System- und Prozesstechnik**

154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tabellen. 2006.

ISBN 3-87525-238-1

Band 172: Markus Meidert

**Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung  
von Werkzeugen der Kaltmassivumformung**

131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tabellen. 2006.

ISBN 3-87525-239-X

Band 173: Bernd Müller

**Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung  
und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile**

147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tabellen. 2006.

ISBN 3-87525-240-3

Band 174: Alexander Hofmann

**Hybrides Laserdurchstrahlsschweißen von Kunststoffen**

136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tabellen. 2006.

ISBN 978-3-87525-243-9

ISBN 3-87525-243-8

Band 175: Peter Wölflick

**Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen  
für bleifreie Mechatronik-Anwendungen**

177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tabellen. 2006.

ISBN 978-3-87525-246-0

ISBN 3-87525-246-2

Band 176: Attila Komlódi

**Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding  
of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods**

155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tabellen. 2006.

ISBN 978-3-87525-248-4

ISBN 3-87525-248-9

Band 177: Uwe Popp

**Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren  
von Kaltmassivumformwerkzeugen**

140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tabellen. 2006.

ISBN 978-3-87525-249-1

ISBN 3-87525-249-7

Band 178: Veit Rückel

**Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung  
Für kooperierende Industrieroboter**

148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tabellen. 2006.

ISBN 978-3-87525-250-7

ISBN 3-87525-250-0

Band 179: Manfred Dirscherl

**Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse**

154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tabellen. 2007.

ISBN 978-3-87525-251-4

ISBN 3-87525-251-9

Band 180: Yong Zhuo

**Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und  
Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)**

181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tabellen. 2007.

ISBN 978-3-87525-253-8

Band 181: Stefan Lang

**Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und  
Prozesssicherheit in der Produktion**

172 Seiten, 93 Bilder. 2007.

ISBN 978-3-87525-257-6

Band 182: Hans-Joachim Krauß

**Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere**

171 Seiten, 100 Bilder. 2007.

ISBN 978-3-87525-258-3



Band 183: Stefan Junker

**Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung  
permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten**  
173 Seiten, 75 Bilder. 2007.

ISBN 978-3-87525-259-0

Band 184: Rainer Kohlbauer

**Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung  
wirkmedienbasierter Blechumformprozesse**  
135 Seiten, 50 Bilder. 2007.

ISBN 978-3-87525-260-6

Band 185: Klaus Lamprecht

**Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer  
Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge**  
137 Seiten, 81 Bilder. 2007.

ISBN 978-3-87525-265-1

Band 186: Bernd Zolleiß

**Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung  
mechatronischer Baugruppen**  
180 Seiten, 117 Bilder. 2007.

ISBN 978-3-87525-266-8

Band 187: Michael Kerausch

**Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal  
wärmebehandelter Aluminiumplatten**  
146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tabellen 2007.

ISBN 978-3-87525-267-5

Band 188: Matthias Weber

**Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen  
durch innovative Softwaresysteme**  
183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tabellen 2007.

ISBN 978-3-87525-269-9

Band 189: Thomas Frick

**Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen  
beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen**  
104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tabellen 2007.

ISBN 978-3-87525-268-2

Band 190: Joachim Hecht

**Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirkmedienbasierte  
Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen**  
107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tabellen 2007.

ISBN 978-3-87525-270-5

Band 191: Ralf Völkl

**Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und  
Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung**  
178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tabellen 2008.

ISBN 978-3-87525-272-9

Band 192: Massimo Tolazzi

**Innenhochdruck-Umformen verstärkter Blech-Rahmenstrukturen**  
164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tabellen 2008.

ISBN 978-3-87525-273-6

Band 193: Cornelia Hoff

**Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim  
Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5**  
133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tabellen 2008.

ISBN 978-3-87525-275-0

Band 194: Christian Alvarez

**Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von  
Lötprozessen in der Elektronikproduktion**  
149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tabellen 2008.

ISBN 978-3-87525-277-4

Band 195: Andreas Kunze

**Automatisierte Montage von makromechatronischen  
Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetzsysteme**  
160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tabellen 2008.

ISBN 978-3-87525-278-1

Band 196: Wolfgang Hußnätter  
**Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließortkurven bei erhöhten Temperaturen**  
152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tabellen 2008.  
ISBN 978-3-87525-279-8

Band 197: Thomas Bigl  
**Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen**  
175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tabellen 2008.  
ISBN 978-3-87525-280-4

Band 198: Stephan Roth  
**Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen**  
113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tabellen 2008.  
ISBN 978-3-87525-281-1

Band 199: Artur Giera  
**Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreißschweißen metallischer Werkstoffe**  
179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tabellen 2008.  
ISBN 978-3-87525-282-8

Band 200: Jürgen Lechler  
**Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen**  
154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tabellen 2009.  
ISBN 978-3-87525-286-6

Band 201: Andreas Blankl  
**Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen**  
120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tabellen 2009.  
ISBN 978-3-87525-287-3

Band 202: Andreas Schaller  
**Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte**  
120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tabellen 2009.  
ISBN 978-3-87525-289-7

Band 203: Claudius Schimpf  
**Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion**  
162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tabellen 2009.  
ISBN 978-3-87525-290-3

Band 204: Simon Dietrich  
**Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessemissionen beim Laserstrahl-tiefschweißen**  
138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen 2009.  
ISBN 978-3-87525-292-7

Band 205: Wolfgang Wolf  
**Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld**  
167 Seiten, 98 Bilder, 2009.  
ISBN 978-3-87525-293-4

Band 206: Steffen Polster  
**Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile**  
160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tabellen 2009.  
ISBN 978-3-87525-294-1

Band 207: Stephan Manuel Dörfler  
**Rührreißschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen**  
190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen 2009.  
ISBN 978-3-87525-295-8

Band 208: Uwe Vogt  
**Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks**  
151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tabellen 2009.  
ISBN 978-3-87525-296-5

Band 209: Till Laumann  
**Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen**  
117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tabellen 2009.  
ISBN 978-3-87525-299-6

Band 210: Alexander Diehl  
**Größeneffekte bei Biegeprozessen- Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung**  
180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen 2010.  
ISBN 978-3-87525-302-3

Band 211: Detlev Staud  
**Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche**  
164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tabellen 2010.  
ISBN 978-3-87525-303-0

Band 212: Jens Ackermann  
**Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe**  
129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tabellen 2010.  
ISBN 978-3-87525-305-4

Band 213: Stephan Weidel  
**Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten**  
144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tabellen 2010.  
ISBN 978-3-87525-307-8

Band 214: Stefan Geißdörfer  
**Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation**  
133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tabellen 2010.  
ISBN 978-3-87525-308-5

Band 215: Christian Matzner  
**Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betattung im Automobil**  
165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tabellen 2010.  
ISBN 978-3-87525-309-2

Band 216: Florian Schüßler  
**Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen**  
184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tabellen 2010.  
ISBN 978-3-87525-310-8

Band 217: Massimo Cojutti  
**Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren**  
125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tabellen 2010.  
ISBN 978-3-87525-312-2

Band 218: Raoul Plettke  
**Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren**  
152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tabellen 2010.  
ISBN 978-3-87525-315-3

Band 219: Andreas Dobroschke  
**Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung  
wickeltechnischer Produkte**  
184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tabellen 2011.  
ISBN 978-3-87525-317-7

Band 220: Azhar Zam  
**Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled  
Tissue-Specific Laser Surgery**  
99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tabellen 2011.  
ISBN 978-3-87525-318-4

Band 221: Michael Rösch  
**Potenziale und Strategien zur Optimierung des  
Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion**  
192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tabellen 2011.  
ISBN 978-3-87525-319-1

Band 222: Thomas Rechtenwald  
**Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten -  
Eine Betrachtung werkstoff- prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK**  
150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tabellen 2011.  
ISBN 978-3-87525-320-7

Band 223: Daniel Craiovan  
**Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente  
auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern**  
165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tabellen 2011.  
ISBN 978-3-87525-324-5

Band 224: Kay Wagner  
**Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte  
Werkzeugoberflächen**  
147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tabellen 2011.  
ISBN 978-3-87525-325-2

Band 225: Martin Brandhuber  
**Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei  
höchstfesten Stahlgüten**  
155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tabellen 2011.  
ISBN 978-3-87525-327-6

Band 226: Peter Sebastian Feuser  
**Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosserieteilen mit maßgeschneiderten  
mechanischen Eigenschaften: Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation  
und funktionale Untersuchung**  
195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tabellen 2012.  
ISBN 978-3-87525-328-3

Band 227: Murat Arbak  
**Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified  
by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics**  
109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tabellen 2012.  
ISBN 978-3-87525-330-6

Band 228: Indra Pitz  
**Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen**  
137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tabellen 2012.  
ISBN 978-3-87525-333-7

Band 229: Alexander Grimm  
**Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik**  
125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tabellen 2012.  
ISBN 978-3-87525-334-4

Band 230: Markus Kaupper  
**Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit**  
160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tabellen 2012.  
ISBN 978-3-87525-339-9

Band 231: Thomas Kroiß

**Modellbasierte Prozessauslegung für die Kaltmassivumformung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung**

169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tabellen 2012.  
ISBN 978-3-87525-341-2

Band 232: Christian Goth

**Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)**

176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tabellen 2012.  
ISBN 978-3-87525-340-5

Band 233: Christian Ziegler

**Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie**

170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tabellen 2012.  
ISBN 978-3-87525-342-9

Band 234: Florian Albert

**Automatisiertes Laserstrahllöten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen**

127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tabellen 2012.  
ISBN 978-3-87525-344-3

Band 235: Thomas Stöhr

**Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen**

118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tabellen 2013.  
ISBN 978-3-87525-346-7

Band 236: Christian Kägeler

**Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß**

145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tabellen 2013.  
ISBN 978-3-87525-347-4

Band 237: Andreas Sulzberger

**Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen**

153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tabellen 2013.  
ISBN 978-3-87525-349-8

Band 238: Simon Opel

**Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung**

163 Seiten, 108 Bilder, 207 Tabellen 2013.  
ISBN 978-3-87525-350-4

Band 239: Rajesh Kanawade

**In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development**

124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tabellen 2013.  
ISBN 978-3-87525-351-1

Band 240: Stephan Busse

**Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens**

119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tabellen 2013.  
ISBN 978-3-87525-352-8

Band 241: Karl-Heinz Leitz

**Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung**

154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tabellen 2013.  
ISBN 978-3-87525-355-9

Band 242: Markus Michl

**Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose**

182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tabellen 2013.  
ISBN 978-3-87525-356-6

Band 243: Vera Sturm

**Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen**

113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tabellen.  
ISBN 978-3-87525-357-3

Band 244: Christian Neudel

**Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau**

178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tabellen.  
ISBN 978-3-87525-358-0

Band 245: Anja Neumann

**Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk**

162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-360-3

Band 246: Ulf-Hermann Quentin

**Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen**

137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-361-0

Band 247: Erik Lamprecht

**Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen**

148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-362-7

Band 248: Sebastian Rösel

**Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium**

148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-363-4

Band 249: Paul Hippchen

**Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehalteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung**

163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-364-1

Band 250: Martin Zubeil

**Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren**

171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-365-8

Band 251: Alexander Kühl

**Flexible Automatisierung der Statorenmontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik**

142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tabellen 2014.

ISBN 978-3-87525-367-2

Band 252: Thomas Albrecht

**Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen**

198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tabellen 2014.

ISBN 978-3-87525-368-9

Band 253: Florian Risch

**Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles**

185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tabellen 2014.

ISBN 978-3-87525-369-6

Band 254: Markus Weigl

**Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen**

184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tabellen 2014.

ISBN 978-3-87525-370-2

Band 255: Johannes Noneder

**Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen**

161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tabellen 2014.

ISBN 978-3-87525-371-9

Band 256: Andreas Reinhardt

**Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger**

123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tabellen 2014.

ISBN 978-3-87525-373-3

Band 257: Tobias Schmuck

**Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation**

151 Seiten, 74 Bilder 2014.

ISBN 978-3-87525-374-0