

Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
der Technischen Universität München

Einsatz und Auslegung zeitfensterbasierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten

Christian Habicht

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
2. o. Univ.-Prof. Dr.rer.pol.habil. B. Kaluza,
Universität Klagenfurt, Österreich

Die Dissertation wurde am 15.09.2008 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 10.12.2008 angenommen.

Christian Habicht

**Einsatz und Auslegung zeitfensterbasierter
Planungssysteme in überbetrieblichen
Wertschöpfungsketten**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 232

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2008

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2009

ISBN 978-3-8316-0891-1

Printed in Germany
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Geleitwort des Herausgebers

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Vorwort

Der Grundstein zur vorliegenden Arbeit wurde während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München gelegt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh und Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, den Leitern dieses Instituts, gilt mein herzlicher Dank für die wohlwollende Förderung und fortwährende Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Professor Dr. Bernd Kaluza, dem Leiter der Abteilung Produktions-, Logistik- und Umweltmanagement (PLUM) der Universität Klagenfurt, bedanke ich mich für die Übernahme des Koreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit.

Darüber hinaus danke ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts sowie allen Studenten, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben. Für die fachlichen Diskussionen und die kritische Durchsicht meiner Arbeit bedanke ich mich bei Herrn Dr. Niklas Möller, Herrn Dr. Patrick Neise und Herrn Christoph Rimpau.

Besonderer Dank gilt meiner Frau, meinen Eltern und nicht zu letzt meiner Schwester die mich fortwährend und nimmer müde an die noch ausstehende Dissertation erinnert haben. Ihre Geduld, Nachsicht sowie Beharrlichkeit wird mit dieser Arbeit belohnt.

München, im Dezember 2008

Christian Habicht

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abkürzungsverzeichnis.....	v
1 Motivation und Zielsetzung.....	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	3
1.3 Aufbau der Arbeit.....	4
2 Beschreibung der Ausgangssituation	7
2.1 Zunehmend vernetzte Wertschöpfung.....	7
2.2 Verbesserung der unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit im Rahmen des Supply Chain Managements	8
2.3 Einordnung und Eingrenzung der Arbeit	14
3 Ansätze zur Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten.....	19
3.1 Zum Begriff der Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten	19
3.1.1 Ebenen des Supply Chain Managements.....	19
3.1.2 Planungsprobleme auf der operativen Ebene des Supply Chain Management – Auftragskoordination	21
3.2 Anforderungen an Systeme zur Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten	22
3.3 Zentralisierte Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten.....	24
3.3.1 Supply Chain Scheduling.....	24
3.3.2 Advanced Planning and Scheduling-Systeme (APS)	26
3.4 Dezentralisierte Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten	30
3.4.1 Anreizsysteme.....	30

3.4.2	Multiagentensysteme	33
3.5	Bewertung zentraler und dezentraler Ansätze zur Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten.....	35
4	Zeitfensterbasierte Planungssysteme – Stand der Forschung.....	39
4.1	Übertragung zeitfensterbasierter Systeme auf überbetriebliche Wertschöpfungsketten.....	39
4.2	Prinzipielle Funktionsweise zeitfensterbasierter Planungssysteme	42
4.3	Ausgestaltung zeitfensterbasierter Planungssysteme	46
4.3.1	Konzepte zeitfensterbasierter Planungssysteme	46
4.3.2	Vergleich und Bewertung der untersuchten Konzepte.....	54
4.4	Ansätze zur Bestimmung optimaler Produktionszyklen	57
4.4.1	Ursprünge der untersuchten Ansätze	57
4.4.2	Bestimmung der optimalen Planungsperiodenlänge im Rahmen des Period Batch Control.....	57
4.4.3	Bestimmung der optimalen Planungsperiodenlänge im Rahmen des Common Cycle Scheduling Problem (CCSP).....	59
4.4.4	Gegenüberstellung der untersuchten Ansätze zur Bestimmung optimaler Produktionszyklen.....	62
4.5	Kritische Würdigung der beschriebenen Arbeiten	64
5	Zeitfensterbasiertes Planungssystem mit uneinheitlichen Planungsperiodenlängen	65
5.1	Allgemeines.....	65
5.2	Systemaufbau und Annahmen.....	66
5.2.1	Aufbau der modellierten Wertschöpfungskette.....	66
5.2.2	Planung und Steuerung der Wertschöpfungskette.....	66

5.2.3	Kapazität der einzelnen Stufen der Wertschöpfungskette	67
5.2.4	Nachfrageverläufe	68
5.2.5	Rüstzeiten	69
5.2.6	Untersuchte Fälle	69
5.3	Startverzug bei uneinheitlichen Planungsperiodenlängen	70
5.4	Auswirkung der Länge der Planungsperioden auf die Durchlaufzeit ..	75
5.5	Auswirkung der Länge der Planungsperioden auf die Bestandshöhe ..	79
5.6	Auswirkung der Länge der Planungsperioden auf die Auslastung	82
5.6.1	Vorhandene Stellgrößen	82
5.6.2	Anzahl der Produktionszyklen pro Jahr	85
5.6.3	Anzahl der Rüstvorgänge je Planungsperiode	86
5.6.4	Dauer je Rüstvorgang	88
5.7	Auswirkung der Länge der Planungsperioden auf die Termintreue	96
5.8	Zusammenfassung der Ergebnisse	98
6	Verfahren zur Auslegung der Planungsperiodenlänge	101
6.1	Allgemeines	101
6.2	Formulierung des Minimierungsproblems	101
6.3	Informationsverfügbarkeitsnebenbedingung	103
6.4	Kapazitätsnebenbedingung	109
6.4.1	Kapazitätsnebenbedingung im Basisfall	109
6.4.2	Kapazitätsnebenbedingung im Fall von variablem Variantenmix	110
6.4.3	Kapazitätsnebenbedingung im Fall von variablem Variantenmix und reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten	111

6.4.4 Übersicht der Kapazitätsnebenbedingungen der drei untersuchten Fälle	113
6.5 Bestandskosten der Wertschöpfungskette	114
6.6 Rüstkosten der Wertschöpfungskette	118
6.7 Gesamtkosten der Wertschöpfungskette	120
6.8 Optimierungsprogramm	121
6.8.1 Lösungsalgorithmus.....	121
6.8.2 Prototypisches Rechnerwerkzeug	124
6.9 Fallbeispiel	126
6.9.1 Beschreibung der Ausgangssituation.....	126
6.9.2 Systemparameter.....	129
6.9.3 Bestimmung der optimalen Planungsperiodenlänge und Bewertung gegenüber dem Ausgangszustand	130
7 Schlussbemerkung	133
7.1 Zusammenfassung	133
7.2 Ausblick.....	134
Literaturverzeichnis	137
Anhang	169
Verwendete Softwareprodukte	169

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

Zeichen Bedeutung

APS	Advanced Planning and Scheduling
ATP	Available to Promise (die Fähigkeit eines Unternehmens auf Kundenanfrage sofort Auskunft über die Verfügbarkeit von Material geben zu können)
CCSP	Common Cycle Scheduling Problem
CEO	Chief Executive Officer, vergleichbar dem deutschen Vorstandsvorsitzenden bzw. Geschäftsführer
CODP	Customer Order Decoupling Point (Kundenauftrags-Entkopplungspunkt)
CTP	Capable to Promise (die Fähigkeit eines Unternehmens auf Kundenanfrage sofort Auskunft über die Möglichkeiten zur Produktion geben zu können)
DP	Decoupling Point (Synonym von CODP)
EDI	Electronic Data Exchange (Elektronischer Datenaustausch)
ERP	Enterprise Resource Planning
FIG	Finished Goods Inventory (Lagerbestand verkaufsfähiger Produkte)
JIS	Just-in-Sequence, Anlieferung von Bauteilen entsprechend der Einbausequenz der nachfolgenden Stufe
JIT	Just-in-Time, Anlieferung von Bauteilen zum Einbaupunkt und damit Entfall der Zwischenlagerung
LTL	Less than Truck Load (Versand von teilbeladenen LKWs, dadurch erhöhte Lieferfrequenz und niedrigere Bestände, aber höhere Frachtkosten) - Gegenteil TL
MAS	Multiagentensystem
MRP	Material Requirements Planning
NP	Nichtdeterministisch polynomial
OEE	Overall Equipment Effectiveness (Effektiver Maschinennutzungsgrad)
OEM	Original Equipment Manufacturer (Endprodukthersteller)
OPP	Order Penetration Point (Synonym von CODP)
PBC	Period Batch Control
PPS	Produktionsplanung und -steuerung

Abkürzungsverzeichnis

Zeichen Bedeutung

SCD	Supply Chain Design
SCE	Supply Chain Execution
SCM	Supply Chain Management
SCS	Supply Chain Scheduling
SKU	Stock Keeping Unit: Lagerartikel
SMED	Single Minute Exchange of Dies
TL	Truck Load (Versand von komplett beladenen LKWs, dadurch niedrige Frachtkosten, aber und höhere Bestände) - Gegenteil LTL
TSP	Traveling Salesman Problem (dt. Handelsreisenderproblem)
WIP	Work in Progress (Aufträge in Bearbeitung)

Einige der aufgeführten englischen Abkürzungen bezeichnen Methoden oder Konzepte, die im Deutschen gewöhnlich im Original übernommen werden und sind deshalb nicht übersetzt. Zur inhaltlichen Erläuterung der jeweiligen Abkürzung sei auf die Ausführungen im Text sowie den zitierten Quellen verwiesen.

Dimensionsangaben

Zeichen Bedeutung

-	: Dimensionslos
%	: Prozent
<i>GE</i>	: Geldeinheit
<i>Stk</i>	: Stück
<i>ZE</i>	: Standardzeiteinheit (Stunde, Tag, Woche...)

Indizes

a) Laufvariablen

Zeichen Bedeutung

<i>i</i>	: Index der Produktvariante in einer Stufe, $i = 1, \dots, n$
<i>j</i>	: Index der Wertschöpfungsstufe in der Supply Chain, $j = 1, \dots, m$

b) Kenngrößenspezifikationen

Zeichen Bedeutung

<i>avg</i>	: Durchschnittswert (average)
<i>max</i>	: Maximalwert
<i>min</i>	: Minimalwert

Lateinische Formelzeichen

Zeichen Einheit Bedeutung

a_j	[Stk]	: Anzahl der Maschinen / Anlagen in Stufe j
$A_j(t)$	[Stk]	: Nachgefragte Menge der Stufe j zum Zeitpunkt t
b_j	[-]	: Enpassbetriebsmittel (bottleneck) der Stufe j
cc_j	[%/ZE]	: Kapitalbindungskosten (Capital Costs) je Geld- und Standardzeiteinheit in der Stufe $j, j = 1, \dots, m$
CC_j	[GE /ZE]	: Kapitalbindungskosten (Capital Costs) für alle Produktvarianten je Standardzeiteinheit in der Stufe $j, j = 1, \dots, m$
c_j	[GE]	: Durchschnittliche Kosten (Cost) eines Produktes der Stufe $j, j = 1, \dots, m$
D_i	[Stk]	: Bedarf (Demand) für die Produktvariante i je Planungsperiode, $i = 1, \dots, n$
d_i	[Stk]	: Bedarf (Demand) für die Produktvariante i je Standardzeiteinheit, $i = 1, \dots, n$
e, f, g	[-]	: Freie Variablen aus der Menge der natürlichen Zahlen
H	[ZE]	: Planungshorizont der Wertschöpfungskette
IC_j	[GE /ZE]	: Bestandskosten (Inventory costs) für alle Produktvarianten je Standardzeiteinheit in der Stufe $j, j = 1, \dots, m$
I_{ij}	[Stk]	: Bestand (Inventory) der Produktvariante i in der Stufe $j, j = 1, \dots, m, i = 1, \dots, n$
k_j	[Stk]	: Anzahl der Produktvarianten je Planungsperiode in Stufe j
l_{ij}	[Stk]	: Produktionslosgröße der Produktvariante i in der Stufe $j, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m$
lt_j	[ZE]	: Durchlaufzeit der Stufe $j, j = 1, \dots, m$
LT_j	[ZE]	: Durchlaufzeit der Wertschöpfungskette ab Stufe $j, j = 1, \dots, m$
m	[Stk]	: Anzahl der Stufen der Wertschöpfungskette
n_j	[Stk]	: Anzahl der Varianten bzw. Produktvarianten in der Stufe j

Abkürzungsverzeichnis

Zeichen	Einheit	Bedeutung
p_j	[GE]	: Durchschnittlicher Verkaufspreis (Price) eines Produktes der Stufe $j, j = 1, \dots, m$
P_j	[ZE]	: Produktivzeit der Stufe $j, j = 1, \dots, m$
PZ_j	[Stk/a]	: Anzahl der Produktionszyklen pro Jahr in der Stufe j
q_i	[-]	: Komplementäre Wahrscheinlichkeit der Variante bzw. des Produktes i in $T, i = 1, \dots, n$
RV	[Stk/ ZE]	: Anzahl der Rüstvorgänge je Planungsperiode
sc_j	[GE]	: Kosten (Setup Costs) je Zeiteinheit für Rüsten in der Stufe $j, j = 1, \dots, m$
SC_j	[GE/ ZE]	: Rüstkosten (Setup Costs) für alle Produktvarianten je Standardzeiteinheit in der Stufe $j, j = 1, \dots, m$
TC_j	[GE]	: Gesamtkosten (Total Cost) je Standardzeiteinheit in der Stufe $j, j = 1, \dots, m$
T_j	[ZE]	: Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit
tp_{ij}	[ZE]	: Bearbeitungszeit pro Stück der Produktvariante i in der Stufe $j, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m$
TP_{ij}	[ZE]	: Gesamte Bearbeitungszeit einer Planungsperiode in der Stufe j
ts_{ij}	[ZE]	: Rüstzeit je Rüstvorgang für die Produktvariante i in der Stufe $j, j = 1, i = 1, \dots, n$
TS_j	[ZE]	: Rüstdauer je Planungsperiode in der Stufe j
$ts_{j,avg}$	[ZE]	: Mittlere Rüstzeit je Rüstvorgang in der Stufe $j, j = 1$
$TS_{j,avg}(k)$	[ZE]	: Mittlere Rüstdauer für k Produktvarianten je Planungsperiode in der Stufe j
tv_j	[ZE]	: Startverzug der Stufe $j, j = 1, \dots, m$
$u(t)$	[-]	: Treppenfunktion der Abgangskurve
v_j	[GE /Stk]	: Durchschnittlicher Wert (Value) einer Produktvariante der Stufe $j, j = 1, \dots, m$
V_j	[GE]	: durchschnittlicher Wert (Value) des Bestandes der Stufe $j, j = 1, \dots, m$
wc_j	[GE/St/ ZE]	: Lagerkosten (Warehousing Costs) je Lager- und Standardzeiteinheit in der Stufe $j, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m$
WC_j	[GE /ZE]	: Lagerkosten (Warehousing Costs) je Standardzeiteinheit in der Stufe $j, j = 1, \dots, m$
w_i	[-]	: Auftrittswahrscheinlichkeit der Produktvariante i in $T, i = 1, \dots, n$

Zeichen Einheit Bedeutung

W_j	[ZE]	: Wartezeit nach der Stufe $j, j = 1, \dots, m$
$Z_j(t)$	[Stk]	: Produzierte Menge der Stufe j zum Zeitpunkt t

Griechische Formelzeichen

Zeichen Einheit Bedeutung

β_j	[1/ZE]	: Spreizgrad der Stufe j , Fall B
γ_j	[1/ZE]	: Spreizgrad der Stufe j , Fall C
δ_j	[ZE]	: Anpassungsparameter der Kennlinien zum Rüstaufwand
κ	[%]	: Nutzungsgrad einer Planungsperiode
μ_j	[%]	: Produktivgrad der Stufe $j, j = 1, \dots, m$

Mathematische Symbole

Zeichen Bedeutung

$E(x)$:	Erwartungswert einer Zufallsvariablen (x); der Erwartungswert ist der Wert, der sich bei häufiger Wiederholung des zugrunde liegenden Experiments als Mittelwert der Ergebnisse ergibt
$F(x)$:	Funktion von x
$ggT(x,y)$:	Größter gemeinsamer Teiler von x und y
\mathbb{N}	:	Menge der natürlichen Zahlen
$P(x)$:	Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Zufallsvariablen (x)
$R\left(\frac{a}{b}\right)$:	Rest der Division von a geteilt durch b
R_{\max}	:	Maximaler Rest einer Division
$\left\lfloor \frac{a}{b} \right\rfloor$:	Ganzzahliger Teil des Bruchs $\frac{a}{b}$
R^2	:	Bestimmtheitsmaß oder Determinationskoeffizient
F	:	F-Wert, Wert der Teststatistik
Sigf	:	Signifikanzniveau
\equiv	:	Definitionsgemäß

Die in den im Stand der Technik in Kapitel 4 zitierten Arbeiten anderer Autoren verwendeten Formelzeichen und mathematischen Symbole sind, um Überschneidungen zu vermeiden, hier nicht aufgeführt. Vielmehr jeweiligen Zeichen werden an der entsprechenden Stelle im Text erläutert.

1 Motivation und Zielsetzung

1.1 Motivation

Bedingt durch die fortschreitende Konzentration der Unternehmen auf ihre Kernkompetenzen sowie den Aufbau weltweit verstreuter Produktionsstätten, erfolgt die Wertschöpfung heute zunehmend verteilt auf eine Vielzahl verschiedener Unternehmen und Standorte. Um die Wettbewerbsfähigkeit einer Unternehmung signifikant zu steigern, reicht demnach die isolierte Betrachtung des einzelnen Unternehmens nicht mehr aus. Wurde diesen Herausforderungen in der Vergangenheit überwiegend durch die Verbesserung unternehmensinterner Prozesse begegnet, so sucht man heute verstärkt die Zusammenarbeit mit Kunden und Lieferanten, um die Wertschöpfung unternehmensübergreifend zu gestalten und zu optimieren. In den letzten Jahren hat sich hierfür der Begriff des Supply Chain Management etabliert.

Situation	Komplikation	Lösungsansatz
<ul style="list-style-type: none"> • Wertschöpfung erfolgt zunehmend verteilt auf eine Vielzahl von Unternehmen • Verbesserungspotenziale liegen an den unternehmensübergreifenden Schnittstellen • Supply Chain Management als Synonym für Optimierung von Wertschöpfungsketten 	<ul style="list-style-type: none"> • Auf der operativen Ebene der Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten differieren die lokalen und die globale Zielsetzungen. • Bestehende Ansätze zur Auftragskoordination sind entweder zu unflexibel und deren Ergebnisse wenig robust oder aufgrund ihrer Komplexität nicht auf die Realität übertragbar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Übertrag des zeitensterbasierten Planungskonzeptes auf überbetriebliche Wertschöpfungsketten • Konzeption eines Planungssystems mit uneinheitlicher Länge der Planungszeitfenster • Entwicklung eines Verfahrens zur Auslegung der optimalen Zeitfensterlänge

Abbildung 1.1: Situation, Komplikation und gewählter Lösungsansatz der Arbeit

Eine zentrale Fragestellung auf der operativen Ebene des Supply Chain Managements ist die Koordination der Produktionspläne zwischen den einzelnen Wertschöpfungsstufen. Lokal verfügbare Informationen und unterschiedliche Zielsetzungen der beteiligten Entscheidungsträger führen zu (lokal) optimalen Produktionsplänen, die jedoch von Stufe zu Stufe differieren. Handelt jede Stufe nach dem für sie optimalen Plan, so ist das Gesamtergebnis in der Regel enttäuschend. Die Herausforderung in der Auftragskoordination zwischen verschiedenen Stufen

ist es daher, Produktionspläne für die an der Wertschöpfung Beteiligten zu definieren, welche lokale Restriktionen und Zielsetzungen beachten und dabei eine bessere Gesamtperformance der Kette erzielen. Bestehende Ansätze zur Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten können diesen Anspruch nur bedingt erfüllen. Die eine Gruppe der Ansätze baut auf die Zentralisierung von Informationen und Entscheidungsbefugnissen und verspricht so hochgenaue und gesamt-optimale Pläne – ein Versprechen, das durch mangelnde Flexibilität und häufig veraltete Pläne erkaufte wird. Die zweite Gruppe existierender Planungsansätze hingegen setzt auf die Gesetze des Marktes und auf dezentrale, bilaterale Verhandlungen der Beteiligten. Die hierfür notwendigen mathematischen Formulierungen sind hoch komplex und werden nur aufgrund restriktiver Annahmen lösbar. Die getroffenen Annahmen sind so in der Realität jedoch nicht haltbar, weshalb die Ansätze keine Anwendung in der Praxis finden.

Im Zuge der in den 1980er und 1990er Jahren propagierten Segmentierung der Fertigung und der damit verbundenen Schaffung dezentraler, autonomer Organisationseinheiten wurden in der Vergangenheit immer wieder zeitenfensterbasierte Planungssysteme zur Koordination der innerbetrieblichen Leistungserbringung vorgeschlagen. Zeitefensterbasierte Planungssysteme beruhen auf fixen Planungsperioden bzw. Zeitefenstern der Länge T . Zu Beginn eines Zeitefensters wird der gesamte Auftragsvorrat der aktuellen Planungsperiode für die jeweilige Produktionsstufe freigegeben, welche innerhalb des Zeitefensters die entsprechenden Produkte produziert, um sie zu Beginn der darauffolgenden Planungsperiode an die nächste Produktionsstufe weiterzureichen. Im Vergleich zu anderen Planungsverfahren unterscheiden sich zeitefensterbasierte Planungssysteme durch drei grundlegende Prinzipien: die gleiche Freigabefrequenz der Aufträge für die verschiedenen Produktionsstufen, die Einphasigkeit – jeder Auftrag wird zum gleichen Zeitpunkt im Produktionssystem freigegeben – und die identischen Planungsperioden – alle Aufträge haben die gleiche Durchlaufzeit (vgl. hierzu u.a. BENDERS & RIEZEBOS 2002, S. 499 f.; STEELE 1998, S. 310). Durch ihre Ausgestaltung ermöglichen zeitefensterbasierte Systeme zum einen eine straffe zentrale Koordination des Gesamtprozesses und bieten zum anderen gleichzeitig den dezentralen Segmenten die Möglichkeit der lokalen Optimierung im Rahmen des Planungszeitfensters. Daher liegt der Gedanke nahe, diese Ideen auf die überbetriebliche Auftragskoordination zu übertragen und ein zeitefensterbasiertes Planungssystem für Wertschöpfungsketten zu konzipieren, welches die Vorteile dezentraler und zentraler Planungssysteme vereint, ohne deren jeweilige Nachteile aufzuweisen.

Ein Charakteristikum und zugleich ein großes Defizit bestehender zeitenfensterbasierter Planungssysteme ist die Nutzung einheitlicher Zeitefensterlängen für die verschiedenen Wertschöpfungsstufen. Da die Länge des Zeitefensters nach dem schwächsten Glied der Kette auszulegen ist, führt dies zu langen Gesamtdurchlaufzeiten und damit hohen Kapitalbindungskosten und macht den Ansatz für die Nutzung in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten wenig attraktiv. Um dieses Manko auszugleichen, ist die Entwicklung eines zeitenfensterbasierten Planungssystems mit uneinheitlich langen Planungszeitfenstern notwendig.

Wie groß die Planungszeitfenster der einzelnen Stufen und damit wie groß deren jeweiliger Handlungs- und Entscheidungsspielraum zur lokalen Optimierung zu bemessen ist, so dass ein Gesamtoptimum für die Wertschöpfungskette erzielt wird, ist die zentrale Frage bei der Auslegung solcher Planungssysteme. Bislang fehlt es an Verfahren zur Auslegung der optimalen Zeitefensterlänge in Systemen mit uneinheitlich langen Planungszeitfenstern.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines zeitenfensterbasierten Planungssystems zur Auftragskoordination innerhalb einer überbetrieblichen Wertschöpfungskette und eines entsprechenden Verfahrens zur optimalen Auslegung der Planungszeitfenster der einzelnen Wertschöpfungsstufen. Durch die Konfiguration der Länge der Planungsfreiräume der einzelnen an der Wertschöpfung Beteiligten soll eine globale Optimierung durch eine effektive unternehmensübergreifende Koordination der einzelnen Stufen der Wertschöpfungskette erreicht und zugleich die Flexibilität und Robustheit durch eine lokale Optimierung der einzelnen Wertschöpfungsstufen gewährleistet werden. Im Gegensatz zur isolierten Planung und Steuerung innerhalb einer Stufe der Wertschöpfungskette wird eine globale Optimierung durch die unternehmensübergreifende Koordination angestrebt.

Um die Defizite bestehender zeitenfensterbasierter Systeme auszugleichen, muss das zu entwickelnde Planungssystem den an der Wertschöpfung Beteiligten die Möglichkeit zum Einsatz individuell abgestimmter, uneinheitlicher Planungszeitfensterlängen bieten. Des Weiteren sind die restriktiven Annahmen bestehender Ansätze bezüglich zulässiger Nachfrageschwankungen, Veränderungen im Variantenmix und Umrüstzeiten aufzuheben.

1 Motivation und Zielsetzung

Die zentrale Frage im Rahmen der Auslegung der Länge der Planungsperioden ist, wie groß der Handlungs- und Entscheidungsspielraum der an der Wertschöpfung beteiligten Akteure gewählt werden muss und welche Auswirkungen dies auf die Gesamtkosten der Wertschöpfungskette hat. Hierzu sind die Auswirkungen der Planungsperiodenlänge auf die logistischen Zielgrößen Durchlaufzeit, Bestand, Auslastung und Termintreue zu ermitteln und anschließend monetär zu bewerten.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel, den groben Aufbau zeigt Abbildung 1.2. In den vorangegangenen Abschnitten wurden bereits die Motivation und darauf aufbauend die Zielsetzung der Arbeit beschrieben.

Situation Kapitel 2	Komplikation Kapitel 3	Lösungsansatz Kapitel 4, 5 und 6
<ul style="list-style-type: none"> • Zunehmend vernetzte Wertschöpfung Abschnitt 2.1 • Verbesserungspotenziale liegen an den unternehmensübergreifenden Schnittstellen Abschnitt 2.2 • Abgrenzung der untersuchten Wertschöpfungsketten Abschnitt 2.3 	<ul style="list-style-type: none"> • Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten Abschnitt 3.1 • Anforderung an Ansätze zur Auftragskoordination Abschnitt 3.2 • Bestehende Ansätze zur Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten <ul style="list-style-type: none"> – Zentralisierte Ansätze Abschnitt 3.3 – Dezentralisierte Ansätze Abschnitt 3.4 – Bewertung der Ansätze Abschnitt 3.5 	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitfensterbasierte Planungssysteme und Übertrag des Konzeptes auf überbetriebliche Wertschöpfungsketten Kapitel 4 • Konzeption eines Planungssystems mit uneinheitlicher Länge der Planungszeitfenster Kapitel 5 • Entwicklung eines Verfahrens zur Auslegung der optimalen Zeitfensterlänge Kapitel 6

Abbildung 1.2: Aufbau der Arbeit

Kapitel 2 dient der Situationsbeschreibung. Neben den Hintergründen der zunehmenden Verteilung der Wertschöpfung wird auf die Verbesserung der unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit im Rahmen des Supply Chain Managements eingegangen. Zudem erfolgt die Definition und Eingrenzung des Untersuchungsgegenstandes.

Mit der allgemeinen Erläuterung des Begriffs Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten beginnt Kapitel 3. Darauf folgen die Anforderung an Systeme

zur Auftragskoordination und die Beschreibung bestehender zentralisierter und dezentralisierter Ansätze zur Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten. Die Bewertung der Ansätze in Abschnitt 3.5 beschließt das Kapitel.

Die Beschreibung der Funktionsweise zeitfensterbasierter Planungssysteme sowie die kritische Würdigung des Standes der Wissenschaft auf dem Gebiet zeitfensterbasierter Planungssysteme für innerbetriebliche Wertschöpfungsketten geschieht in Kapitel 4. Betrachtet werden darüber hinaus Ansätze zur Auslegung der Länge der Planungsperioden.

Das Konzept und zugrunde liegende Annahmen des zeitfensterbasierten Planungssystems mit uneinheitlichen Zeitfensterlängen sind Bestandteil von Kapitel 5. Nach der Herleitung des bei uneinheitlichen Periodenlängen notwendigen Startverzugs werden die Auswirkungen der Planungsperiodenlänge auf die logistischen Zielgrößen Durchlaufzeit, Bestand, Auslastung und Termintreue untersucht und die hierfür notwendigen Bestimmungsgleichungen abgeleitet.

Basierend auf den in Kapitel 5 erläuterten Gleichungen erfolgt in Kapitel 6 die Formulierung des Minimierungsproblems sowie der notwendigen Randbedingungen zur Bestimmung der gesamtkostenminimalen Länge der einzelnen Planungszeitfenster. Zur Lösung des Minimierungsproblems wird ein Algorithmus entwickelt und prototypisch in einem Rechnerwerkzeug umgesetzt. Ein Fallbeispiel beschließt dieses Kapitel.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse, die Bewertung der vorgestellten Vorgehensweise sowie ein Ausblick auf weiterführende Fragestellungen im Rahmen des Einsatzes zeitfensterbasierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten bilden den Abschluss dieser Arbeit in Kapitel 7.

2 Beschreibung der Ausgangssituation

2.1 Zunehmend vernetzte Wertschöpfung

Das Umfeld produzierender Unternehmen ist heute geprägt durch einen gestiegenen Wettbewerbsdruck, bedingt durch die zunehmende Globalisierung der Absatz- und Beschaffungsmärkte sowie Fortschritte in der Informations- und Kommunikationstechnologie (GÖPFERT & GRÜNERT 2006, S. 130). Dieser verschärfte Wettbewerb macht die Konzentration produzierender Unternehmen auf ihre Kernkompetenzen unabdingbar (REINSCH 2004, S. 45, NYHUIS ET AL. 2005, S. 283 f.) und erfordert daher die Aufteilung der Wertschöpfung auf eine Vielzahl verschiedener Unternehmen.

Des Weiteren zu beobachten ist die Entwicklung hin zur lokalen Produktion vor Ort (ASHAYERI ET AL. 1998, S. 819). Produzierten große Unternehmen in der Vergangenheit an einem Standort und vertrieben ihre Produkte auf den globalen Märkten, so siedeln sie heute ihre Produktionsstätten nahe den Kunden an (NYHUIS ET AL. 2005, S. 282). Gründe hierfür sind beispielsweise die erhöhte Flexibilität bezüglich sich verändernder Kundenwünsche (MÜLLER ET AL. 2006, S. 198), gesetzliche Forderungen¹ (ZÄH ET AL. 2005, S. 247, DOMBROWSKI ET AL. 2006, S. 258), steuerliche Vorteile (DOMBROWSKI ET AL. 2006, S. 256), Kostenvorteile (ZÄH ET AL. 2005, S. 247) oder die Notwendigkeit der lokalen Spezifikation der Produkte. Die Leistungserbringung innerhalb des Unternehmens ist folglich auf ein Netz von Standorten verteilt.

Die Wertschöpfung erfolgt somit zunehmend vernetzt und die Anzahl der Akteure, die Struktur der Material- und Informationsflüsse (BEAMON & CHEN 2001, S. 3195) sowie die erweiterte geographische Ausdehnung im Zuge der Globalisierung (AKKERMANS ET AL. 1999, S. 565 f.) tragen substantziell zur Komplexität der Austauschbeziehungen bei. Die Motivation einzelner Unternehmen zur Kooperation liegt dabei nicht in der Tatsache begründet, dass diese das Zusammenarbeiten (Kollaborieren) um seiner selbst Willen anstreben, sondern in der Tatsa-

¹ Dies sind häufig so genannte Local Content-Vorschriften. So berichten ZÄH ET AL. (ZÄH ET AL. 2005, S. 247) über einen Anstieg lokal beschaffter Teile von 4 auf 60% bei der VW AG in China über einen Zeitraum von fünf Jahren aufgrund des politischen Drucks der chinesischen Regierung.

2 Beschreibung der Ausgangssituation

che, dass ihnen durch die Zusammenarbeit (Kollaboration) ökonomische Vorteile erwachsen (BITITCI ET AL. 2003, S. 411).

Es entstehen komplexe Systeme, in denen die lokalen Entscheidungen der an der Wertschöpfung Beteiligten häufig nicht zu optimalen Gesamtlösungen führen. Lokale auf einzelne Knoten eines solchen Netzes beschränkte Verbesserungsinitiativen reichen zur Wahrung der Wettbewerbsfähigkeit und somit zum langfristigen Bestehen eines Unternehmens nicht mehr aus. Entsprechende Optimierungsmaßnahmen müssen vielmehr auf alle im Netzwerk verbundenen Beteiligten ausgedehnt werden. Ein in diesem Zusammenhang oft zitierter Ausspruch, dessen Ursprung allerdings im Dunkeln liegt², lautet, dass in Zukunft nicht mehr einzelne Unternehmen, sondern vielmehr die jeweiligen Netzwerke im Wettbewerb stehen werden³ (CHRISTOPHER 1992; TOWILL & CHRISTOPHER 2002, S. 299; VAN DER ZEE & VAN DER VORST 2005, S. 66; YANG & BURNS 2003, S. 2075; CLOSS ET AL. 1998, S. 31; XIAOBO ET AL. 2003, S. 2817; CHWIF ET AL. 2002, S. 59; AKKERMANS ET AL. 2003, S. 298).

Aus der Notwendigkeit, die unternehmensübergreifende Zusammenarbeit zu verbessern, hat sich in den letzten Jahren ein neues Forschungsfeld entwickelt. Dieses wird im Allgemeinen mit Supply Chain Management umschrieben und wird im folgenden Abschnitt kurz vorgestellt.

2.2 Verbesserung der unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit im Rahmen des Supply Chain Managements

Wurde in der Vergangenheit überwiegend versucht, den Herausforderungen des Marktes durch die Verbesserung unternehmensinterner Prozesse zu begegnen, so sucht man heute verstärkt die Zusammenarbeit mit Kunden und Lieferanten, um die Wertschöpfung unternehmensübergreifend zu gestalten und zu optimieren. Dies ist zum einen damit zu begründen, dass die innerbetrieblichen Abläufe, welche in den 1990er Jahren im Fokus standen, weitestgehend optimiert sind und weitere Verbesserungen an den unternehmensübergreifenden Schnittstellen gesucht werden müssen (ALICKE 2002, S. 40 f.; DANGELMAIER ET AL. 2003, S. 70).

² CAVINATO (CAVINATO 2002, S. 65) führt den Ausspruch auf John Chabers, den damaligen CEO von Cisco Systems, aus dem Jahre 1990 zurück.

³ Eine Diskussion zum "Wettbewerb der Netze" findet sich in RICE & HOPPE 2001.

2.2 Verbesserung der unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit im Rahmen des Supply Chain Managements

Zum anderen stellen BLACKHURST ET AL. (BLACKHURST ET AL. 2004, S. 1640) fest, dass der Versuch einzelner Akteure, unabhängig voneinander ihre eigenen Prozesse isoliert zu optimieren, nicht zu einem Gesamtoptimum führen kann. ZÄPFEL (ZÄPFEL 2001, S. 9) bemerkt hierzu, dass die „ganzheitliche bzw. systemische Betrachtung von der Überlegung ausgeht, dass Wettbewerbsfähigkeit bzw. das Erreichen von Wettbewerbsvorteilen von den beteiligten Akteuren eines Liefernetzwerkes verlangt, ihre Prozesse nicht mehr vor dem Hintergrund lokaler Suboptima einzelner Unternehmen zu planen und zu realisieren und damit Bereichsegoismen wiederzugeben, sondern eine Koordination der gesamten Lieferketten erforderlich macht“.

Die Gestaltung unternehmensübergreifender Abläufe ist „ohne Zweifel immer noch ein Überthema in Managementkreisen“⁴ (OTTO & KOTZAB 2003, S. 306). Eine einheitliche Definition bzw. einheitliche Begriffe haben sich bislang dennoch bzw. vielleicht auch gerade deshalb nicht durchsetzen können (SEURING 2001). Neben dem in frühen Veröffentlichungen verwendeten Begriff des production/distribution system (z.B. COHEN & LEE 1988) finden sich inzwischen unter anderem: Supply Chain (SWAMINATHAN ET AL. 1998), Supply Chain Network (BALLOU 2001; HIEBER & HARTEL 2003; COHEN & LEE 1988), Supply Network (CHOI & HONG 2002; CHOI ET AL. 2001), Value Stream Network (HOLWEG & BICHENO 2002) und Demand Chain (CHILDERHOUSE ET AL. 2002; VAN LANDEGHEMA & VANMAELE 2002) bzw. im Deutschen Lieferkette (ZÄPFEL 2001; REINSCH 2004; SCHNEIDER 2004; KURBEL 2005), Logistikkette (STIEFBOLD 1998), Logistisches Netzwerk (SCHWEIER 2000), Liefernetz (ZÄPFEL 2001), Produktionsnetzwerk (MEIER ET AL. 2001) und Wertschöpfungsnetzwerk (LANZA ET AL. 2006). Am weitesten verbreitet ist wohl der Begriff der Supply bzw. der Value Chain, in letzter Zeit auch häufig mit dem Wortteil Network⁵, bzw. im deutschsprachigen Raum dessen Äquivalent Wertschöpfungskette bzw. -netzwerk sowie die Ausdrücke Liefer- bzw. Versorgungskette (vgl. hierzu die Ausführungen in SEURING 2001).

JAGDEV & THOBEN (JAGDEV & THOBEN 2001, S. 444), CHOI & HONG (CHOI & HONG 2002, S. 469) und HOFSTEDÉ ET AL. (HOFSTEDÉ ET AL. 2003, S. 113) betonen, dass mit dem Wortzusatz -netzwerk (Network) anstatt -kette (Chain) die

⁴ Im englischen Original lautet der Satz „No doubt, supply chain management (SCM) is still a hyper-topic in the management arena.“

⁵ KALUZA ET AL. (KALUZA ET AL. 2003, S. 27) verwenden gar den Begriff Supply Chain Netzwerk.

2 Beschreibung der Ausgangssituation

Beziehungen der beteiligten Unternehmen besser charakterisiert werden, da die beteiligten Unternehmen selten jeweils genau einen Lieferanten und einen Kunden besitzen. CHOI & HONG (CHOI & HONG 2002, S. 471) stellen jedoch richtigerweise fest, dass für die operative Steuerung und Kontrolle einzelne Stränge sequentieller Dyaden von Kunden und Lieferanten betrachtet werden müssen. Zum einen sei es schwer möglich, die Lieferanten für ein bestimmtes Produkt in einer Gruppe zusammenzufassen⁶ und gemeinsam zu steuern, zum anderen könne eine möglicherweise bestehende Konkurrenzsituation zwischen den einzelnen Zulieferern, wie z.B. im Falle des dual- oder multi-sourcing⁷, eine solche gemeinsame Steuerung verhindern.

Trotz der bestehenden Unterschiede zwischen Netzwerken und Ketten kann allein durch die Verwendung eines Terminus nicht auf einen systematischen Unterschied des Betrachtungsgegenstands geschlossen werden. SEURING (SEURING 2001) weist vielmehr darauf hin, dass die verwendeten Begriffe synonym zu gebrauchen seien⁸. In der vorliegenden Arbeit werden daher im Weiteren die Begriffe Wertschöpfungskette und -netzwerk synonym verwendet.

Angesichts der bestehenden Begriffsvielfalt ist es nicht verwunderlich, dass auch eine Vielzahl von Definitionen existiert (vgl. KURBEL 2005, S. 338). CAVINATO (CAVINATO 2002, S. 609) beklagt gar das mangelnde Verständnis, welches aus den uneinheitlichen Definitionen und verschiedenen Interpretationen des Begriffs Supply Chain resultiert. Im Folgenden seien daher vier Definitionen von Supply Chain genannt, um die wesentlichen Aspekte dieses Konzeptes aufzuzeigen.

⁶ Im englischen Original "to lump together", zu Deutsch "in einen Topf zu werfen".

⁷ Dual- bzw. multi-sourcing sind Konzepte zur Minderung etwaiger Abhängigkeiten von einem einzelnen Lieferanten bzgl. Preis und/oder Materialverfügbarkeit. So werden für ein bestimmtes Bauteil zwei (dual-sourcing) oder mehrere (multi-sourcing) Lieferanten ausgewählt, die jeweils einen Teil der Nachfrage decken.

⁸ Diese Sichtweise wird nicht von allen Autoren geteilt. So verwenden z.B. AGNETIS ET AL. (AGNETIS ET AL. 2001) und CHEN (CHEN 1999) den Begriff Supply Chain für die Austauschbeziehungen zwischen verschiedenen Abteilungen innerhalb einer Fabrik. Andere Autoren wiederum betonen ausdrücklich die Unterschiede zwischen einer Supply Chain und ihrem Betrachtungsobjekt. So bezieht sich die Demand Chain nach VAN LANDEGHEMA & VANMAELE (VAN LANDEGHEMA & VANMAELE 2002, S. 769) auf die Marketing-, Vertriebs- und Service-Operationen des Netzwerkes und AL-MUDMIGHA ET AL. (AL-MUDMIGHA ET AL. 2004) beschreiben die Value Chain explizit als Erweiterung der Supply Chain um Operationen vor und vor allem nach der Auftragsabwicklung.

2.2 Verbesserung der unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit im Rahmen des Supply Chain Managements

SWAMINATHAN ET AL. (SWAMINATHAN ET AL. 1998, S. 607 f.) definieren die Supply Chain als ein Netz autonomer oder teilautonomer Unternehmen, die kollektiv für die Beschaffung, die Verarbeitung und die Distribution einer oder mehrerer Produktfamilien verantwortlich sind. Die unterschiedlichen Akteure der Supply Chain würden dabei nach unterschiedlichen Randbedingungen und Zielsetzungen agieren, seien jedoch voneinander abhängig, wenn die Leistung der gesamten Kette, z.B. hinsichtlich Termintreue, Qualität und Kosten, gesteigert werden solle. Somit sei die Leistungsfähigkeit eines einzelnen Unternehmens der Kette von der Leistungsfähigkeit der anderen Mitglieder sowie von deren Willen und Möglichkeiten zur Koordination der Aktivitäten entlang der Kette abhängig.

Nach HARRISON (HARRISON 2001, S. 413) ist eine Supply Chain eine Reihe von wertschöpfenden Aktivitäten, welche die Zulieferer eines Unternehmens mit dessen Kunden verbindet. Das Grundmuster der Kette beschreibt HARRISON dabei wie folgt: Input wird vom Zulieferer entgegengenommen, es wird der Wert des Gutes gesteigert und dieses wird an den Kunden geliefert. Hierbei sei es unerheblich, ob es sich um einen externen Lieferanten oder einen vorgelagerten Prozess bzw. um einen externen Kunden oder einen nachgelagerten Prozess handle.

Nach BHASKARAN (BHASKARAN 1998 S. 634) wiederum stellt eine Supply Chain eine Serie von Produktionsstätten dar, welche Rohmaterialien in fertige Produkte transformieren. Jede Fabrik in der Kette würde Material von der jeweils vorgelagerten Fabrik erhalten und dieses an die jeweils nachgelagerte Fabrik in der Kette senden. Die Supply Chain besteht laut BHASKARAN aus verschiedenen Pipelines, innerhalb derer der Strom von Informationen, Materialien, Komponenten und Montagegruppen, die zu einem Produkt oder einer eng abgegrenzten Produktfamilie gehören, fließt.

Allgemeiner definiert BALLOU (BALLOU 2001, S. 419) die Supply Chain als den gesamten Materialfluss von der Quelle bis zum Endverbraucher⁹. Diese Definition sei unabhängig von den Besitzverhältnissen der einzelnen Prozessschritte.

Verbindendes Merkmal der verschiedenen Definitionen ist eine auf Kooperation basierende, zeitlich und räumlich verteilte Leistungserbringung. Die beteiligten Akteure (Unternehmen, Standorte eines Unternehmens, Abteilungen innerhalb eines Standortes oder Personen) sind durch die verschiedensten Beziehungen

⁹ GRAF erweitert die Betrachtung um die so genannte Nachgebrauchsphase (Demontage und Aufbereitung) und definiert so das Erweiterte Supply Chain Management (GRAF 2005, S. 44 ff.).

2 Beschreibung der Ausgangssituation

miteinander verbunden und tauschen Material und Information aus. Nach den vorgestellten Definitionen umfasst die Supply Chain dabei alle Stufen von der Rohmaterialgewinnung bis hin zum Endkunden¹⁰.

Dem folgend wird die Supply Chain in dieser Arbeit als Reihe von wertschöpfenden Aktivitäten definiert, in der der Materialfluss stromabwärts, also vom Rohmaterial hin zum Endprodukt, und der Informations- und Geldfluss entgegengesetzt stromaufwärts erfolgt. Die einzelnen Akteure können dabei sowohl rechtlich unabhängig als auch rechtlich abhängig sein, z.B. als Standorte oder Abteilungen eines Unternehmens.

Im Zusammenhang mit der Optimierung der unternehmensübergreifenden Schnittstellen wird häufig der Begriff Supply Chain Management verwendet. Die nach AKKERMANS ET AL. (AKKERMANS ET AL. 1999, S. 567) inflationäre Verwendung dieses Begriffs bzw. von dessen Abkürzung SCM sei jedoch noch kein Anzeichen, dass bislang eine einheitliche und präzise Definition desselben existiere. Auch OTTO & KOTZAB (OTTO & KOTZAB 2003, S. 308) zeigen sich erstaunt über die Vielzahl verschiedener Interpretationen und Auffassungen des Begriffes Supply Chain Management, welche in der aktuellen Literatur anzutreffen seien.

So wählen DANGELMAIER ET AL. (DANGELMAIER ET AL. 2003, S. 70) als Definition die Aufzählung der Elemente des Supply Chain Managements. Diese seien die globale Optimierung innerhalb von Unternehmensverbänden, die Intensivierung der Datenerhebung und des Datenaustausches zwischen Kunden und Lieferanten in Echtzeit sowie die synchrone Planung über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg.

Nach KALUZA ET AL. (KALUZA ET AL. 2003 S. 7) umfasst das Supply Chain Management „sowohl die strategische als auch die operative Planung, Organisation, Steuerung und Koordination des gesamten unternehmensübergreifenden Material- und Dienstleistungsflusses und/oder des Wertschöpfungsprozesses, ein-

¹⁰ Hierzu ist anzumerken, dass viele Veröffentlichungen aus dem angelsächsischen Raum (z.B. BEAMON 1999, S. 276; CHRISTOPHER & TOWILL 2000, S. 210; BALLOU 2001, S. 418; SMĀROS ET AL. 2003, S. 342) auf den Teil der Kette ab dem OEM (Original Equipment Manufacturer), dem sogenannten "downstream part of the Supply Chain", fokussieren. Die Kette bzw. das Netz umfasst neben dem Hersteller des Endproduktes die verschiedenen Distributionsstufen wie z.B. Regionallager, Groß- und Einzelhändler bis zum Endverbraucher. DISNEY ET AL. (DISNEY ET AL. 2003, S. 365) bezeichnen diese als traditionelle Supply Chain.

2.2 Verbesserung der unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit im Rahmen des Supply Chain Managements

schließlich der damit verbundenen Informations- und Geldflüsse“ mit dem Ziel „wettbewerbsfähige Strukturen der Wertschöpfungsketten zu schaffen“.

VAN DER ZEE & VAN DER VORST (VAN DER ZEE & VAN DER VORST 2005, S. 66) definieren Supply Chain Management als die integrierte Planung, Koordination und Kontrolle aller logistischen Prozesse und Aktivitäten der Supply Chain, um bei verringerten Gesamtkosten und unter gleichzeitiger Einhaltung der Anforderungen anderer Interessengruppen, wie z.B. von staatlichen und nicht-staatlichen Organisationen, den Kundennutzen zu verbessern.¹¹

Integration ist auch nach HANDFIELD & NICHOLS (HANDFIELD & NICHOLS 1999, S. 2) das entscheidende Merkmal des Supply Chain Managements. Eine Supply Chain umfasst nach ihrer Definition alle Aktivitäten in Zusammenhang mit dem Fluss und der Transformation von Material und Information entlang der Kette und Supply Chain Management ist die Integration dieser Aktivitäten durch verbesserte Beziehungen entlang der Kette, um einen nachhaltigen Wettbewerbsvorteil zu erzielen.

Den verschiedenen Definitionen des Supply Chain Managements ist vielfach die Forderung nach simultaner Erhöhung des Kundennutzens und der Profitabilität der Kette gemein¹². Kundennutzen wird dabei u.a. mit Attributen wie erhöhte Liefertreue, verkürzte Lieferzeiten und sinkende Preise umschrieben. Steigender Kundennutzen führt den Autoren zufolge zu Umsatzwachstum, welches bei gleichzeitig sinkenden Kosten die Profitabilität der Kette erhöhe. Vereinzelt finden sich Forderungen nach der Reduktion der Unsicherheit und des Risikos innerhalb der Supply Chain (BILLINGTON ET AL. 2004, S. 61 f.) sowie der Bedarfschwankungen entlang der Kette¹³ (LEE ET AL. 1997A; LEE ET AL. 1997B; CROSON & DONOHUE 2003; WARBURTON 2004).

¹¹ Im Original “the integrated planning, coordination, and control of all logistic business processes and activities in the supply chain to deliver superior consumer value at less cost to the supply chain as a whole while satisfying requirements of other stakeholders in the supply chain (e.g., the government or NGOs [Non Governmental Organizations, nichtstaatliche Organisationen]).”

¹² Eine in diesem Zusammenhang häufig verwendete Phrase ist die der Win-win-Situation, welche ausdrückt, dass für die beteiligten Unternehmen die Zusammenarbeit vorteilhaft ist und die Verteilung von Risiko und Erlös als fair empfunden wird (vgl. hierzu CORSTEN & GÖSSINGER 2001A, S. 33 und die dort angegebene Literatur).

¹³ Unter dem Schlagwort des Bullwhip- oder Peitschenschlageffekts findet sich eine Vielzahl von Veröffentlichungen, die sich mit der Entstehung von Bedarfschwankungen entlang der Supply Chain sowie der Entwicklung geeigneter Strategien zur Verminderung derselben beschäftigen.

2 Beschreibung der Ausgangssituation

Dennoch ist es AKKERMANS ET AL. (AKKERMANS ET AL. 1999, S. 567) zufolge möglich, in der Vielzahl verschiedener Definitionen des Supply Chain Managements folgende Kernelemente zu finden:

- Das Supply Chain Management umfasst verschiedene Akteure, Prozesse und Funktionen wie beispielsweise Lieferanten, Einkauf, Produktion, Distribution, Marketing/Vertrieb und Kunden,
- fokussiert sich auf die Koordination und/oder Integration
- und zielt auf die simultane Erhöhung des Kundennutzens und der Profitabilität.

In der vorliegenden Arbeit wird Supply Chain Management daher definiert als die Koordination der wertschöpfenden Tätigkeiten verschiedener Wertschöpfungsstufen entlang einer Kette zur Erreichung eines nachhaltigen Wettbewerbsvorteils gegenüber anderen Wertschöpfungsketten. Für welche Art von Wertschöpfungsketten der vorgestellte Ansatz gedacht ist, wird im folgenden Abschnitt erläutert.

2.3 Einordnung und Eingrenzung der Arbeit

Weder gibt es „die“ Wertschöpfungskette noch „das“ Wertschöpfungsnetzwerk. Vielmehr finden sich im industriellen Umfeld mannigfaltige Formen von unternehmensübergreifenden Austauschbeziehungen. Ebenso vielfältig sind die Ansätze zu deren Beschreibung bzw. zu deren Typologisierung¹⁴, die sich zumeist in Form langer Listen beschreibender Merkmale und deren Attributen darbieten (JAGDEV & THOBEN 2001). Die möglichen Zusammensetzungen der Merkmalsausprägungen führen zu unzähligen Kombinationen, die alle, wenn auch nur marginal, verschiedenartige Netzwerke beschreiben. Zur Charakterisierung der für den zu entwickelnden Ansatz geeigneten Wertschöpfungsketten reichen im Wesentlichen die vier Gliederungsaspekte Netzwerkstruktur, Kundenentkopplungspunkt, ausgetauschtes Gut sowie Form der Kopplung der beiden Unternehmen aus.

¹⁴ Eine Übersicht zu Klassifikationen von Supply Chains bieten CHILDERHOUSE ET AL. (CHILDERHOUSE ET AL. 2002, S. 678 f.).

BEAMON & CHEN (BEAMON & CHEN 2001, S. 3195 ff.) klassifizieren Supply Chains anhand ihrer Struktur in konvergente, divergente, zusammengesetzte sowie generelle Netzwerke¹⁵. Im Sinne der Definition von CHOI & HONG (CHOI & HONG 2002, S. 471), nach der für die operative Steuerung und Kontrolle einzelne Stränge sequentieller Dyaden von Kunden und Lieferanten betrachtet werden müssen, bilden in dieser Arbeit, unabhängig von der übergeordneten Struktur, jedoch lineare Wertschöpfungsketten den Betrachtungsgegenstand. Des Weiteren sollen nur wertschöpfende Prozesse betrachtet werden, d.h. reine Lager- und Transportvorgänge werden ausgeklammert. Somit ergibt sich eine Betrachtung bis zum OEM (Original Equipment Manufacturer) ohne die nachgeschalteten Distributions- und Lagerstufen. Zudem wird die Struktur der Kette als gegeben angenommen, das Supply Chain Design ist somit abgeschlossen. Die Kette ist strukturstabil, d.h. die Zusammenarbeit erfolgt über einen längeren Zeitraum hinweg.

Der Kundenauftrags-Entkopplungspunkt, im Englischen customer order decoupling point (CODP)¹⁶, unterteilt die Wertschöpfungsprozesse der Akteure in kundenauftrags- und prognosegetriebene Prozesse (ZÄPFEL 2001, S. 10; YANG & BURNS 2003, S. 2078) bzw. ist der Übergang zwischen kundenanonymer und kundenspezifischer Produktion. Die Positionierung des Entkopplungspunktes¹⁷ ist eine entscheidende Determinante bei der Gestaltung einer Supply Chain (YANG & BURNS 2003, S. 2078).

In der Literatur wird meist zwischen vier (CHRISTOPHER & TOWILL 2000, S. 210; LOPITZSCH 2005, S. 12) oder fünf (ZÄPFEL 2001, S. 9; NAYLOR ET AL. 1999, S. 113; MEIER ET AL. 2001, S. 61 f.) Positionen des Kundenauftrags-Entkopplungspunktes entlang der Lieferkette und somit Strategien unterschieden.

¹⁵ Im Original convergent (assembly), divergent (arborescent), conjoined or general (network)

¹⁶ Weitere Synonyme sind der „order penetration point“ (OPP) nach SHARMAN 1984 S. 73 oder schlicht der „decoupling point“ (DP) nach YANG & BURNS 2003, S. 2078.

¹⁷ CHRISTOPHER & TOWILL (CHRISTOPHER & TOWILL 2000, S. 210) führen an, dass in realen Supply Chains tatsächlich zwei Entkopplungspunkte existieren. Dies sein zum einen jener, an dem der Bestand möglichst generischer Produkte gehalten wird, und zum anderen jener, bis zu welchem die Information des realen Endkundenbedarfs weitergegeben wird. Ersterer bezieht sich demnach auf das Material und sollte möglichst nahe am Endkunden liegen, letzterer bezieht sich auf die Information und sollte möglichst weit flussaufwärts liegen.

2 Beschreibung der Ausgangssituation

Beispielhaft ist in Tabelle 2.1 die Typologisierung nach ZÄPFEL (ZÄPFEL 2001, S. 10) dargestellt¹⁸.

CODP	Produktstruktur	Zentrales Gestaltungsprinzip
Make to stock end products	Standardisierte Produkte mit relativ genauer Prognostizierbarkeit des Bedarfs	Endprodukte werden im Lager vorgehalten, das Augenmerk liegt in einer möglichst exakten Prognose sowie der kosteneffizienten Abwicklung der Prozesse entlang der Lieferkette.
Make to stock generic products	Späte Variantenbildung basierend auf einem standardisierten Grundprodukt	Auch hier liegt der Schwerpunkt auf der Effizienz der Prozesse und der Exaktheit der Prognosen; zusätzlich spielt die Produktkonfiguration eine wichtige Rolle.
Assemble to order	Montage variantenreicher Produkte bestehend aus standardisierten Komponenten	Die Lieferkette kann gedanklich in zwei Teile zerlegt werden. Bis zur Montage erfolgt die Produktion auftragsanonym und der Fokus liegt auf der effizienten Gestaltung der Lieferkette, ab der Montage sind die Prozesse kundenauftragsgetrieben und das Augenmerk verschiebt sich auf die Gestaltung einer agilen Kette, die eine schnelle und flexible Reaktion auf Umfeldeinflüsse ermöglicht.
Make to order	Fertigung und Montage kundenindividueller Produkte	Der Kundenauftrags-Entkopplungspunkt liegt vor dem ersten Produktionsprozess, die Beschaffung erfolgt prognosegetrieben. Die Ausdehnung der auftragsgetriebenen Aktivitäten verlagert den Gestaltungsfokus hin zur Agilität.
Purchase and make to order	Erweiterung des make to order auf die gesamte Lieferkette	Produktion, Beschaffung und z.T. auch die Entwicklung erfolgen kundenauftragsgetrieben. Dies hat im Vergleich zu den anderen Lieferketten verlängerte Lieferzeiten zur Folge. Um so mehr rückt die Agilität als Gestaltungsrichtlinie in den Mittelpunkt.

Tabelle 2.1: Typologie von Lieferketten bzw. Liefernetzen nach ZÄPFEL (ZÄPFEL 2001, S. 10)

Die Extreme stellen in dieser Typologisierung die beiden Strategien "make to stock end products", also die rein prognosegetriebene Produktion verkaufsfähiger Produkte, und "purchase and make to order", also die Materialbeschaffung und Herstellung nach Eingang des Kundenauftrags, dar. Da Absatzprognosen im heutigen Marktumfeld immer schwieriger werden, birgt eine "make to stock end products"-Politik das Risiko der Obsoleszenz einerseits, falls die Prognosen zu optimistisch waren, und der Lieferunfähigkeit andererseits, im Falle zu niedriger Vorhersagewerte. Gerade in Wertschöpfungsketten mit mehreren aufeinanderfolgenden Akteuren, welche jeweils unabhängig voneinander Prognosen über zukünftige Nachfrageverläufe treffen, kommt es zur Amplifikation der Prognose-

¹⁸ NAYLOR ET AL. (NAYLOR ET AL. 1999, S. 113) benennen die fünf Ausprägungen z.T. unterschiedlich (Ship to stock, Make to stock, Assemble to order, Make to order und Buy to order).

fehler und folglich zu entsprechend hohen Fehlmengen bzw. Überbeständen¹⁹. Eine "purchase and make to order"-Politik ist hingegen oft nicht möglich, da die Durchlaufzeiten die am Markt geforderten Lieferzeiten übersteigen (YANG & BURNS 2003, S. 2075)²⁰.

Für die vorliegende Arbeit wird angenommen, dass sich die Akteure der Wertschöpfungskette auf eine "make to order"-Strategie festgelegt haben. Jede Stufe produziert also nach dem Eingang von Bestellungen bzw. Abrufen und nicht nach Prognosen. Ferner sei festgelegt, dass die in der Wertschöpfungskette vertriebenen Produkte in mittleren bis hohen Stückzahlen (größer 10^4 und kleiner 10^6 Stück pro Jahr) hergestellt werden, wobei der Bedarf zwischen Perioden schwanken kann. Diese Stückzahlschwankungen können durch organisatorische Maßnahmen wie z.B. Mehrarbeit bedingt abgefangen werden. Die Fertigung der einzelnen Wertschöpfungsstufen kann als Werkstatt, Insel oder Linie organisiert sein, die Kapazität ist für den durchschnittlichen Bedarf ausreichend dimensioniert und wird exklusiv für Aufträge der Wertschöpfungskette genutzt. Aufgrund der Anzahl der zu produzierenden Varianten (größer 10 und kleiner 500) sowie deren Beschaffenheit sei ein nicht unerhebliches Potenzial zur Ergebnisoptimierung durch eine lokale Reihenfolgeplanung und Rüstoptimierung vorhanden bzw. die Losbildung sei aufgrund von Kapazitätsrestriktionen notwendig.

Die Kopplung einer Dyade erfolge bedarfsgesteuert (push), d.h. die jeweils nachgelagerte Stufe (Kunde) ordert bei Bedarf mit entsprechendem Vorlauf bei der vorgelagerten Stufe (Lieferant). Bei der Entkopplung der Dyade durch Bestände und Einführung einer Verbrauchssteuerung (pull) ist jene Stufe, die an diesem Punkt den Kunden der Zweierbeziehung darstellt, die letzte Stufe, die in der zeitfensterbasierten Planung berücksichtigt wird. Die physische Entfernung zwischen zwei Stufen sei per gewähltem Transportmittel, z.B. LKW, innerhalb eines Tages zu überbrücken.

¹⁹ Siehe hierzu die Ausführungen von LEE ET AL. 1997A; LEE ET AL. 1997B; CROSON & DONOHUE 2003; WARBURTON 2004 zum so genannten Bullwhip-Effekt. Der Bullwhip-Effekt oder auch Peitschenschlag-Effekt beschreibt den häufig zu beobachtenden Umstand, dass die Amplitude der Nachfrageschwankungen in einer Wertschöpfungskette vom Kunden hin zum Rohmateriallieferanten zunimmt, ähnlich einer Peitsche, deren Ausschlag am Ende deutlich größer als in der Nähe des Griffes ist.

²⁰ In diesem Dilemma werden unterschiedliche Zwischenformen genutzt, deren Einsatzmöglichkeiten zumeist durch Produkteigenschaften determiniert sind (PAGH & COOPER 1998; BATTEZZATI & MAGNANI 2000; YANG & BURNS 2003; IOANNOU ET AL. 2004). Auch die Differenzierung innerhalb des Produktspektrums wird als Option genannt (YOUSSEF ET AL. 2004).

2 Beschreibung der Ausgangssituation

Kategorie	Determinante	Ausprägungen					
Ausgetauschtes Gut	Wert	hoch		mittel		gering	
	Nachfrageschwankungen	konstant		schwankend		stark schwankend	
	Nachfrage pro Jahr	<10 ²	<10 ³	<10 ⁴	<10 ⁵	<10 ⁶	>10 ⁶
	Anzahl Varianten	keine	<5	<50	>50	>500	
	Lebensdauer	Tage	Wochen	Monate	Jahre	unbegrenzt	
Beteiligte Unternehmen	Kundenauftrags-Entkopplungspunkt Lieferant	make to stock end / generic products		make / assemble to order		purchase and make to order	
	Fertigungsorganisation des Lieferanten	Baustellenfertigung	Werkstattfertigung	Inselfertigung	Linienfertigung		
	Stückzahlflexibilität	keine		begrenzt		unbegrenzt	
	Kundenauftrags-Entkopplungspunkt Kunde	make to stock end / generic products		make / assemble to order		purchase and make to order	
Kopplung der beteiligten Unternehmen	Fertigungsorganisation des Kunden	Baustellenfertigung	Werkstattfertigung	Inselfertigung	Linienfertigung		
	Entfernung Kundelieferant	Stunden	Tage	Wochen	Monate		
	Auslösung der Beschaffung Lieferant	pull (verbrauchsgeteuert)			push (bedarfsgeteuert)		
	Auslösung der Beschaffung Kunde	pull (verbrauchsgeteuert)			push (bedarfsgeteuert)		

Table 2.2: *Typologie der betrachteten Wertschöpfungsketten (in Anlehnung an ZÄH ET AL. 2004, S. 6)*

In Tabelle 2.2 sind die getroffenen Einschränkungen nochmals zusammengefasst. Die grau hinterlegten Ausprägungen der Determinanten beschreiben jene Wertschöpfungsketten²¹, die bei der Entwicklung des zeitfensterbasierten Planungssystems in dieser Arbeit im Fokus stehen. Bevor hierzu in Kapitel 4 der Stand der Forschung zu zeitfensterbasierten Planungssystemen dargestellt wird, erfolgt im nächsten Kapitel zunächst eine allgemeine Erläuterung des Begriffs der Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten, die Ableitung der Anforderungen an entsprechende Systeme sowie die Beschreibung und Bewertung zentralisierter und dezentralisierter Ansätze zur Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten.

²¹ Wertschöpfungsketten, die diese Kriterien erfüllen, sind unter anderem in der Automobilzulieferindustrie vorzufinden. Für modellspezifische Bauteile, wie z.B. Stoßfänger, Sitze oder Innenverkleidungen, sind Prozesse über mehrere Stufen auf eine Montagelinie ausgerichtet und die Kriterien Farbe und Form verursachen auf den einzelnen Stufen unterschiedliche Bearbeitungsreihenfolgen.

3 Ansätze zur Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten

3.1 Zum Begriff der Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten

3.1.1 Ebenen des Supply Chain Managements

THOMAS & GRIFFIN (THOMAS & GRIFFIN 1996) untergliedern das Supply Chain Management erstmals in die operative und die strategische Planung der Supply Chain²² und HARRISON (HARRISON 2001, S. 413) prägt als Bezeichnung für die beiden Ebenen die Begriffe Supply Chain Design²³ (SCD) und Supply Chain Execution (SCE). Supply Chain Design definiert der Autor als den Prozess der Gestaltung der Infrastruktur (Fabriken, Distributionscenter, Transportabwicklung und Produktionsprozesse), der in dieser Ausgestaltung strategischen Charakter besitze und einen Zeithorizont von mehreren Monaten bis Jahren habe. Supply Chain Execution im Gegensatz dazu sei eher operativer Natur und umfasse die Festlegung von z.B. Transport- und Produktionsplänen mit einem Zeithorizont von wenigen Tagen bis zu mehreren Wochen.

VAN LANDEGHEMA & VANMAELE (VAN LANDEGHEMA & VANMAELE 2002, S. 769) schließlich fügen eine dritte, die taktische, Hierarchieebene hinzu und nennen die typischen Entscheidungen auf den drei Ebenen²⁴ (vgl. Tabelle 3.1).

²² Erstere umfasst den Autoren nach verschiedene Arten der koordinierten Planung und Terminierung und fokussiert sich auf Themen wie die Festlegung von Losgrößen und Produktionsmengen oder die Wahl der Transportabwicklung. Auf der Ebene der strategischen Planung werden den Autoren zufolge Aktivitäten wie die Errichtung bzw. Schließung von Werken und Distributionscentern sowie die Allokation von Ressourcen und Produkten zu einzelnen Mitgliedern der Kette betrachtet.

²³ FINE (FINE 2000, S. 213) sieht im Supply Chain Design die Kernkompetenz einer Organisation, da in dieser Stufe die Entscheidungen getroffen würden, welche Fähigkeiten entlang der Wertschöpfungskette intern weiter zu entwickeln seien und welche den Zulieferern zur Entwicklung übergeben werden sollten. Für BALLOU (BALLOU 2001, S. 417 f.) hingegen ist Supply Chain Design ein Synonym für das unter Forschern lange bekannte "warehouse location problem" und umfasst im engsten Sinn die Festlegung der Anzahl, Größe und Lokation von Lagerhäusern und Fabriken.

²⁴ Ähnliche Untergliederungen finden sich bei FRIEDRICH & KAMPKER (FRIEDRICH & KAMPKER 2001, S. 10 f.) und KURBEL (KURBEL 2005, S. 361ff.). In Anlehnung an das am Forschungsinstitut für Rationa-

3 Ansätze zur Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten

Level	Typical name	What is typically being decided (not exhaustive)
Strategic	Supply network design business planning	Location of distribution centers, plants, buffer stocks, flexibility versus buffers, pull versus push, planning methods used, information systems adopted, ...
Tactical	Sales & operations planning	Production volumes per product family, target levels of stock (both operational and safety), transport parameters (TL or LTL mode) ²⁵ , average capacity utilization, cost and cash requirements for the next planning period
Operational	Master production scheduling, plant scheduling	Production volume and timing per product item (SKU) ²⁶ , transportation orders, purchase orders, detailed capacity usage per shift

Tabelle 3.1: Hierarchieebenen des Supply Chain Planning (nach VAN LANDEGHEMA & VANMAELE 2002, S. 770)

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass im Supply Chain Management mit der Gestaltung (SCD) und Ausführung (SCE) mindestens zwei Ebenen zu unterscheiden sind, wobei diese aufeinander abgestimmt sein müssen²⁷. Das Supply Chain Design umfasst dabei die längerfristige Konfiguration des Netzwerkes. Hierzu zählen Aufgaben wie die Auswahl und die Lokation der beteiligten Unternehmen, die Abstimmung von Regeln und Schnittstellen sowie die Verteilung von Aufgaben und Ressourcen.

Auf der operativen Ebene der Supply Chain Execution steht hingegen die Koordination räumlich und zeitlich verteilter Aktivitäten im Vordergrund. Die sich hieraus ergebenden Planungsprobleme auf der operativen Ebene des Supply Chain Managements, im Weiteren als Auftragskoordination bezeichnet, sind Fokus dieser Arbeit und werden im nachfolgenden Abschnitt näher erläutert.

lisierung entworfene Modell der Planungsebenen des Supply Chain Management (vgl. hierzu PILLEP & VON WREDE 1999) unterscheiden FRIEDRICH & KAMPKER die Ebenen Konfiguration, Planung sowie Ausführung und weisen diesen entsprechende Betrachtungshorizonte (strategisch, taktisch und operativ) zu. Kurbel nennt die drei Ebenen die strategische Ebene, die Planungsebene und die Ausführungsebene.

²⁵ Truck Load and Less than Truck Load, also die Optimierungentscheidung, ob immer nur volle LKW-Ladungen versendet und damit Fahrten eingespart werden oder ob auch Teilmengen verschifft und somit eine erhöhte Lieferfrequenz und geringere Bestände erzielt werden

²⁶ Stock Keeping Unit: Lagerartikel

²⁷ Wie eine Untersuchung europäischer Unternehmen durch das Cranfield Centre for Logistics and Transportation zeigt, ist dies für einen Großteil der Unternehmen in der betrieblichen Praxis noch nicht der Fall (HARRISON ET AL. 1999, zit. n. TOWILL & CHRISTOPHER 2002, S. 307).

3.1.2 Planungsprobleme auf der operativen Ebene des Supply Chain Management – Auftragskoordination

Auf der operativen Ebene des Supply Chain Management sind nach VAN LANDEGHEMA & VANMAELE (VAN LANDEGHEMA & VANMAELE 2002, S. 770) die Entscheidungen über die zu produzierende Menge und den Fertigungstermin je Produkt, die Auslösung von Transportaufträgen, den Abruf von Material sowie die Maschinenbelegung zu treffen (vgl. Tabelle 3.1 auf S. 20). KURBEL (KURBEL 2005, S. 34) spricht allgemeiner von den vier im Rahmen der Produktionsplanung und -steuerung zu lösenden bzw. zu optimierenden Planungsproblemen:

- **Mengenproblem:** In welchen Mengen und in welchen Losgrößen sollen End-, Zwischen- und Vorprodukte hergestellt bzw. beschafft werden?
- **Terminproblem ("Scheduling"):** Wann soll gefertigt bzw. beschafft werden?
- **Zuordnungsproblem:** Welche Betriebsmittel (Maschinen, Mitarbeiter, Werkzeuge etc.) sollen genutzt werden?
- **Reihenfolgeproblem ("Sequencing"):** In welcher Reihenfolge sollen Produktionsaufträge abgearbeitet werden?

Im Sinne der gesamtheitlichen Optimierung müssen die Akteure einer Wertschöpfungskette im Zuge ihrer Planung die Auswirkungen der jeweiligen lokalen Entscheidungen auf die anderen Stufen bzw. deren Anforderung beachten.²⁸ AGNETIS ET AL. (AGNETIS ET AL. 2001, S. 15) bezeichnen dies als Koordinierungsproblem auf der operativen Ebene des Supply Chain Management bzw. der Auftragskoordination in Supply Chains. Des Weiteren stellen sie fest, dass der Auftragskoordination bisher in der Forschung wenig Beachtung geschenkt wurde. Auch HALL & POTTS (HALL & POTTS 2003, S. 566) bemängeln, dass der Nutzen und die Herausforderungen einer koordinierten Terminplanung entlang einer Wertschöpfungskette noch nicht ausreichend untersucht worden seien.

²⁸ CHEN & HALL (CHEN & HALL 2000) demonstrieren anhand eines Beispiels einer Wertschöpfungskette aus der Automobilbranche, dass sowohl die Konflikte individuell optimaler Produktionspläne verschiedener Akteure im Falle mangelnder Koordination als auch die zu erzielenden Einsparungen durch eine Koordination der besagten Pläne in vielen Fällen substantiell sind.

3 Ansätze zur Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten

Bestehende Ansätze zur Auftragskoordination bewegen sich im Kontinuum zwischen vollständig zentral und vollständig dezentral²⁹. Nach SCHLÜTER (SCHLÜTER 2001, S. 32 f.)³⁰ zeichnen sich zentrale Planungs- und Steuerungskonzepte durch eine zentrale, hierarchisch übergeordnete Planungsstufe aus, deren Planungsergebnisse in Form umzusetzender Vorgaben an die ausführenden Stufen weitergegeben werden. In dezentralen Systemen würden alle dispositiven Aufgaben von der ausführenden Stufe übernommen, die Koordination erfolge dabei rein über die Mechanismen des Marktes. Zwischenformen bezeichnet SCHLÜTER als hybride Systeme. Als Hauptvorteil zentralisierter Strukturen nennen CHOI & HONG (CHOI & HONG 2002, S. 470 f.) die Regelmäßigkeit und Skaleneffekte, wohingegen Dezentralität die schnelle Reaktion auf lokale Veränderungen ermögliche und Freiräume für Kreativität einräume. Den Grad der Autonomie bezeichnen CHOI ET AL. (CHOI ET AL. 2001) dabei als direkt proportional zu Innovation und Kreativität.

Im folgenden Abschnitt werden zunächst Anforderungen an Konzepte zur Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten formuliert (Abschnitt 3.2), bevor in Abschnitt 3.3 Ansätze zur zentralen Auftragskoordination wie das Supply Chain Scheduling (SCS) und Advanced Planning Systeme (APS) sowie deren industrielle Nutzung beschrieben werden. Als Vertreter dezentraler Systeme werden in Abschnitt 3.4 Anreiz- und Multiagentensysteme vorgestellt, wobei auch hier jeweils der Stand der industriellen Nutzung beleuchtet wird. In einer Bewertung sind die häufigsten Kritikpunkte an zentralen bzw. dezentralen Systemen zusammengestellt (Abschnitt 3.5).

3.2 Anforderungen an Systeme zur Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten

Neben den rein funktionalen Anforderungen muss ein System zur Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten zwei wesentliche Kriterien erfüllen. Zum einen

²⁹ Die Begriffe der Zentralität bzw. Dezentralität beziehen sich dabei auf die Verteilung von Entscheidungsbefugnissen innerhalb der Organisationen. Ist nur ein einzelner Akteur einer Organisation autorisiert, Entscheidungen zu treffen, so spricht man von einer zentralen Struktur; ist die Entscheidungsautorisation hingegen auf viele Akteure verteilt, ist von einer dezentralen Struktur die Rede (MINTZBERG 1979).

³⁰ SCHLÜTER (SCHLÜTER 2001) definiert die innerbetrieblichen Planungs- und Steuerungssysteme in segmentierten Fertigungsstrukturen, die Definitionen können aber ohne Probleme auf Wertschöpfungsketten übertragen werden.

3.2 Anforderungen an Systeme zur Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten

muss es einfach in der Anwendung sein und durch seinen Einsatz darf keine weitere Komplexität erzeugt werden. So müssen nach BENDERS & RIEZEBOS (BENDERS & RIEZEBOS 2002, S. 505) entsprechende Informations- und Planungssysteme die effektive Koordination einzelner Produktionsstufen ermöglichen, anstatt einen hohen Koordinationsbedarf zu erzeugen.

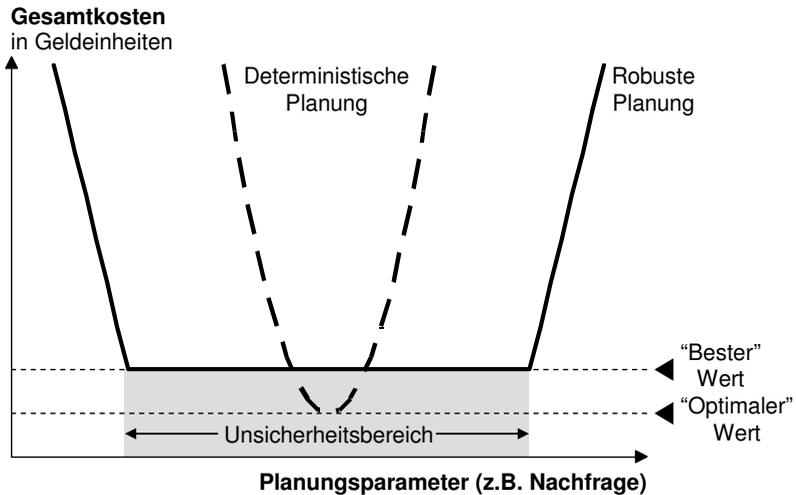


Abbildung 3.1: Kostenverläufe einer Wertschöpfungskette in Abhängigkeit der Variation der Eingangsparameter für deterministische und robuste Planung (VAN LANDEGHEMA & VANMAELE 2002, S. 774)

Zum anderen müssen die gewonnenen Pläne im volatilen Produktionsumfeld von Bestand sowie gegenüber Schwankungen in den Eingangsparametern unempfindlich sein. VAN LANDEGHEMA & VANMAELE (VAN LANDEGHEMA & VANMAELE 2002, S. 773) plädieren in diesem Zusammenhang für robuste Planungsansätze innerhalb einer Supply Chain. Robuste Pläne müssen den Autoren zufolge unter einer breiten Variation der Eingangsgrößen, z.B. des Nachfrageverlaufs, nahezu optimale Ergebnisse liefern, die Autoren sprechen vom "besten" Ergebnis, und die Anzahl der Umplanningvorgänge bei veränderten Eingangsgrößen reduzieren. Dies führe zu leicht erhöhten Kosten im Vergleich zu einer deterministischen Planung. Letztere erziele das optimale Ergebnis jedoch nur für einen bestimmten Zustand der Eingangsgröße, zumeist ein Mittelwert oder eine Prognose, und das Planungsergebnis verschlechtere sich deutlich bei einer Variation dieser Eingangsgröße. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

3.3 Zentralisierte Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten

3.3.1 Supply Chain Scheduling

Im Rahmen des Supply Chain Scheduling³¹ werden Ansätze zur gesamtoptimalen Abstimmung von Produktionsplänen verschiedener Stufen entlang einer Supply Chain³² erarbeitet. Trotz der umfangreichen Literatur zum Supply Chain Management sind der Nutzen und die Herausforderungen einer koordinierten Terminplanung entlang der Kette nach HALL & POTTS (HALL & POTTS 2003, S. 566) noch nicht ausreichend untersucht und nur wenige Arbeiten zu diesem Thema publiziert worden.

AGNETIS ET AL. (AGNETIS ET AL. 2001) untersuchen zwei aufeinander folgende Stufen einer Supply Chain, deren Bearbeitungssequenzen aufgrund mangelnder Zwischenlagermöglichkeit aufeinander abgestimmt werden müssen. In beiden Stufen ist für die Bearbeitung verschiedener Varianten Rüsten erforderlich, wobei die Rüstkriterien der beiden Stufen differieren. Beide Stufen haben zum Ziel, die eigenen Rüstkosten zu minimieren, die Ziele der beiden Stufen stehen dabei jedoch im Konflikt zueinander. Die Autoren vereinfachen das Problem durch Reduktion auf die Minimierung der Anzahl notwendiger Rüstvorgänge, indem sie gleiche Kosten für jeden Rüstvorgang beider Stufen annehmen. Sie schließen damit Reihenfolgeabhängigkeiten der Rüstkosten aus, obwohl deren Auftreten in der Praxis explizit erwähnt wird (AGNETIS ET AL. 2001, S. 16). Selbst das stark vereinfachte Minimierungsproblem erweist sich als NP-schwer³³ und macht somit die Entwicklung einer auf graphentheoretischen Ansätzen basierenden Heuristik³⁴ notwendig. Das Augenmerk der Autoren liegt jedoch eher auf der mathe-

³¹ Scheduling wird von GRAVES (GRAVES 1981, S. 646) definiert als die Allokation verfügbarer Produktionsressourcen über den Zeitverlauf zur Erfüllung bestimmter Zielkriterien. Typischerweise umfasst diese Aufgabe eine Gruppe von durchzuführenden Aktivitäten, und die Kriterien können sowohl Kompromisse zwischen der frühen oder späten Fertigstellung und zwischen dem Aufbau von Beständen oder häufigem Rüsten der Maschinen beinhalten.

³² Allen Arbeiten gemein ist jedoch die Einschränkung auf zwei Stufen, was jedoch nicht zwangsläufig eine Beschränkung auf zwei Akteure bedeutet.

³³ Zur Definition NP(nichtdeterministisch polynomial)-schwerer Probleme siehe u.a. SCHMITTING 2000, S. 15

³⁴ Zum Begriff Heuristik siehe SCHMITTING (SCHMITTING 2000, S. 37)

3.3 Zentralisierte Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten

matischen Güte³⁵ der entwickelten Heuristik und weniger auf den Implikationen für die Steuerung von Supply Chains. So werden die möglichen Einsparungen durch den Einsatz der Heuristik bzw. der Implementierung der entsprechenden Reihenfolgen nicht genannt.

In einer weiteren Arbeit untersuchen AGNETIS ET AL. (AGNETIS ET AL. 2002) zweistufige Ketten, bestehend aus einem Lieferanten und mehreren Abnehmern/Herstellern mit unterschiedlichen, jeweils lokal optimalen Produktionssequenzen. Das Vertauschen der Produktionsreihenfolge ist über Zwischenpuffer möglich. Es werden Lösungsalgorithmen präsentiert, die eine Entscheidung darüber ermöglichen, in welchen Fällen eine Koordination der Produktionspläne sinnvoll bzw. nicht sinnvoll ist. Wiederum liegt das Augenmerk nicht auf der praktischen Umsetzung.

LI & XIAO (LI & XIAO 2004) entwickeln und analysieren Mechanismen zur Koordination des Splittens von Losen³⁶ zwischen einem Hersteller und seinem Zulieferer. Es werden jedoch lediglich Transportlose definiert, die Produktionslose beider Akteure sind identisch und müssen, so die Einschränkung der Autoren, in einem Zug bearbeitet werden, ohne dass die jeweilige Maschine stillsteht. Beide Akteure werden als jeweils eine Maschine modelliert und zur Bewertung der verschiedenen Koordinationsmechanismen dienen die Gesamtkosten, bestehend aus fixen Transportkosten je Transport und Bestandskosten. Die Autoren zeigen, dass für ihr gewähltes Modell die Gesamtkosten einer koordinierten Lösung geringer sind als die Summe der Kosten der Akteure, falls diese sich jeweils lokal optimieren. Zudem wird beschrieben, wie die Einsparungen auf die Akteure zu verteilen sind, so dass beiden Parteien geringere Kosten als in der jeweils lokal optimierten Variante entstehen und so die Entscheidungen beider Akteure an der Performance des Gesamtsystems ausgerichtet sind.

HALL & POTTS (HALL & POTTS 2003) untersuchen eine Supply Chain, in der wiederum mehrere Hersteller von einem Zulieferer beliefert werden, und bewerten den Nutzen einer koordinierten Entscheidungsfindung. Sie demonstrieren, dass die Koordination der zwei Stufen zu einer Reduktion der Planungskosten

³⁵ Die Gütekriterien sind die Rechenzeit und der Prozentsatz der Probleme, für die ein dominierender Rundgang gefunden wurde.

³⁶ Im Original lot streaming, welches als lot splitting in mehrstufigen Systemen definiert wird und das Aufbrechen eines Produktionsloses in mehrere Teillöse mit dem Ziel der Durchlaufzeitreduktion beschreibt.

3 Ansätze zur Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten

von mindesten 20% bis hin zu beliebig nahe 100% führt, je nach dem betrachteten Planungsziel.

Eine zweistufige Kette, bestehend aus einem Hersteller und einem Distributor, untersuchen DAWANDE ET AL. (DAWANDE ET AL. 2006). Sie berechnen die zusätzlichen Kosten, die einer der beiden Parteien entstehen, wenn die jeweils andere Partei ihr den für sie optimalen Produktionsplan aufzwingt. Sie stellen fest, dass hierdurch erhebliche Mehrkosten entstehen bzw., im Umkehrschluss, erhebliche Potentiale durch die Koordination der jeweiligen Pläne vorhanden seien.

Den Ansätzen gemein ist die Erstellung eines zentralen Produktionsplans und die Formulierung eines Minimierungsproblems³⁷. Aus der Tatsache, dass immer nur zwei Stufen betrachtet werden, sowie den Einschränkungen und getroffenen Annahmen der Autoren lässt sich schließen, dass solche Minimierungsprobleme dazu neigen, sehr komplex und schwer lösbar zu werden. Obwohl der Nutzen bzw. im Speziellen die dargestellten theoretischen Einsparungspotenziale unbestreitbar sind, stehen die Forschungen auf diesem Gebiet noch am Anfang. An die industrielle Nutzung der entwickelten Heuristiken ist derzeit nicht zu denken.

3.3.2 Advanced Planning and Scheduling-Systeme (APS)

Im Rahmen der Produktionsplanung und -steuerung von Wertschöpfungsketten ist häufig³⁸ von so genannten Advanced Planning and Scheduling Systemen, kurz APS-Systemen, die Rede. In der Literatur (z.B. CORSTEN & GÖSSINGER 2001B; CORSTEN & GÖSSINGER 2001C) findet sich für die Abkürzung APS auch der Begriff Advanced Planning Systems, auf einen Wesensunterschied beider Systeme kann aufgrund der unterschiedlichen Begrifflichkeiten jedoch nicht geschlossen werden. Der Planungsansatz entspricht der hierarchischen Koordination und ist dadurch gekennzeichnet, dass der Gesamtplan in Teilpläne zerlegt wird. Wie in Abbildung 3.2 dargestellt, wird dabei zwischen zwei Planungsebenen unterschieden. Dies ist zum einen eine zentrale Netzwerkebene (Top-Ebene), welche im Sinne einer Grobplanung Aufgaben vorgibt, und zum anderen die Ebene der einzelnen Netzwerkpartner (Basis-Ebene), der dann die Detailplanung obliegt (CORSTEN & GÖSSINGER 2001B, S. 39).

³⁷ speziell eines Kostenminimierungsproblems mit den kumulierten Kosten beider Stufen als Zielgröße

³⁸ So z.B. in FINKLER 2006; BETGE & LEISTEN 2006; SCHMID 2006

3.3 Zentralisierte Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten

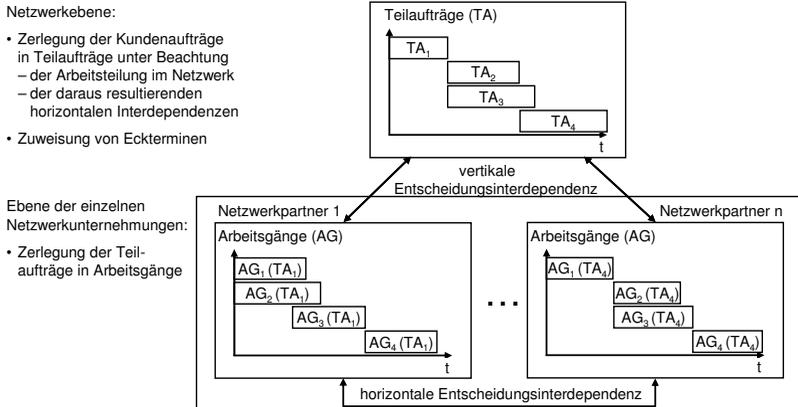


Abbildung 3.2: Hierarchische Planung in Unternehmensnetzwerken (CORSTEN & GÖSSINGER 2001B, S. 39)

Die Planung erfolgt somit schrittweise und es ergibt sich, dass neben dem ursprünglichen horizontalen Koordinationsproblem der Netzwerkpartner ein vertikales Koordinationsproblem, die sachliche und zeitliche Abstimmung der einzelnen Planungsebenen, zu lösen ist (CORSTEN & GÖSSINGER 2001B, S. 40).

FLEISCHMANN ET AL. (FLEISCHMANN ET AL. 2005, S. 84) nennen als die drei Hauptmerkmale von Advanced Planning and Scheduling Systems:

- **Integrierte Planung** entlang der gesamten Wertschöpfungskette, mindestens aber vom Zulieferer eines Unternehmens bis zu seinen Kunden, oder sogar eines umfangreicheren Netzwerkes von Unternehmen
- **Echte Optimierung** durch die Generierung von Alternativplänen, die Zieldefinition und das Einbeziehen von Randbedingungen sowie durch den Einsatz von Optimierungstechniken, entweder exakter oder heuristischer Natur
- **Hierarchischer Planungsansatz**³⁹, welcher als einziger Ansatz die Kombination der beiden erstgenannten Eigenschaften ermöglichen, da eine Simultanplanung nicht durchführbar sei und eine Sukzessivplanung hingegen nicht zu optimalen Ergebnissen führe

³⁹ Eine hierarchische Koordination baut nach CORSTEN & GÖSSINGER (CORSTEN & GÖSSINGER 2001B, S. 39) auf Über-/Unterordnungsbeziehungen zwischen Organisationsmitgliedern auf.

3 Ansätze zur Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten

In der Abkehr von der Sukzessivplanung, wie dem traditionellen Konzept des Material Requirements Planning (MRP), das in fast allen PPS-Systemen⁴⁰ und ERP-Systemen⁴¹ eingesetzt wird, sehen viele Autoren den entscheidenden Vorteil von APS-Systemen (z.B. FLEISCHMANN ET AL. 2005, S. 84; BETGE & LEISTEN 2006, S. 19; FINKLER 2006, S. 23 f.; SCHMID 2006, S 14)

KALUZA & BECKER (KALUZA & BLECKER 2001A; KALUZA & BLECKER 2001B) schlagen den Einsatz der stufenweisen, hierarchischen Produktionsplanung und -steuerung in Verbindung mit belastungsorientierten Steuerungsprinzipien auf der Ebene der Netzwerkpartner vor (s. Abbildung 3.3).

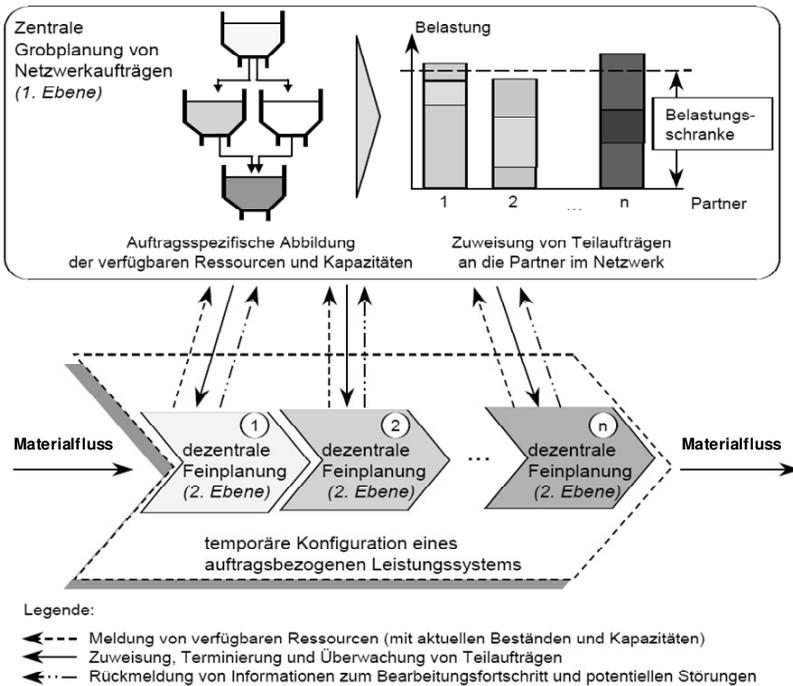


Abbildung 3.3: Vorgehensweise der stufenweisen Produktionsplanung und -steuerung (KALUZA & BLECKER 2001B, S. 52)

⁴⁰ PPS: Produktionsplanung und -steuerung

⁴¹ ERP: Enterprise Resource Planning

In dem beschriebenen Ansatz werden nach der Zerlegung des Netzwerkauftrages in Teilaufträge diese unter Berücksichtigung der Kapazitätsgrenzen der Partner durch eine zentrale Planungsinstanz terminiert und bei den jeweiligen Unternehmen eingesteuert. Hierzu sei eine Reihenfolgeplanung auf der Ebene der Teilaufträge, die Zuordnung von Teilaufträgen zu Ressourcen bzw. Partnern sowie die Vorgabe von Eckterminen notwendig (KALUZA & BLECKER 2001B, S. 51). Die einzelnen Partner sind daraufhin für die Auftragsdurchführung sowie die Feinplanung zuständig. Es ist dabei unklar, welche Freiheitsgrade den einzelnen Netzwerkpartnern für die dezentrale Feinplanung verbleiben. Da die zentrale Durchlaufterminierung mittels durchschnittlicher Durchlaufzeiten oftmals fehlerhaft sei, schlagen die Autoren belastungsorientierte Steuerungsprinzipien (KALUZA & BLECKER 2001A, S. 19) bzw. belastungsorientierte Algorithmen (KALUZA & BLECKER 2001B, S. 51) zur Grobplanung vor.

Gekoppelte ERP/APS-Systeme sind laut AKKERMANS ET AL. (AKKERMANS ET AL. 2003, S. 299) in der Lage, innerhalb des Unternehmens Prüfungen der Verfügbarkeit (Available to Promise, kurz ATP) sowie der Möglichkeiten zur Produktion (Capable to Promise, kurz CTP) in Echtzeit durchzuführen. Von Systemen, welche diese Überprüfungen auch über mehrere Glieder der Kette hinweg ermöglichen, berichtet KURBEL (KURBEL 2005, S. 378) und bezeichnet dies als "global ATP" im Gegensatz zum "local ATP", welches nur auf das eigene ERP-zurückgreift. Weit weniger optimistisch äußert sich STADTLER (STADTLER 2005, S. 585). Er stellt fest, dass Advanced Planning and Scheduling-Systeme und die Produktionsplanung und -steuerung derzeit noch nicht verbunden seien und das unternehmensübergreifende Advanced Planning and Scheduling noch in den Kinderschuhen stecke (STADTLER 2005, S. 586).

Bezüglich des Mehrwertes von APS bestehen darüber hinaus auch Zweifel. DUDEK ET AL. (Dudek et al. 2002, S. 52) kritisieren vor allem, dass APS überwiegend auf deterministischen Modellen basierten, die von der Annahme ausgehen, dass alle Daten mit Sicherheit bekannt sind. Vor dem Hintergrund steigender Unsicherheit in den Prognosen und in den operativen Prozessen einer Supply Chain sei die Anwendbarkeit einer deterministischen Planung jedoch in Frage zu stellen. Und CORSTEN & GÖSSINGER (CORSTEN & GÖSSINGER 2001C, S. 38) kommen nach eingehender Analyse zu der ernüchternden Einschätzung, dass derzeit als Verbesserungspotenzial der Advanced Planning and Scheduling-Systeme für die unternehmensübergreifende Zusammenarbeit allein verbleibe, dass die einzelnen Unternehmen auf einen einheitlichen Datenbestand zurückgreifen könnten und eine grobe Abstimmung der dezentralen Teilpläne erfolge.

3.4 Dezentralisierte Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten

3.4.1 Anreizsysteme

Wertschöpfungsketten bestehen in der Regel aus unabhängigen Agenten⁴² mit individuellen Präferenzen. Keiner der Agenten kontrolliert die vollständige Kette und kann somit die gesamte Kette optimieren. Es ist nach CACHON (CACHON 1999, S. 113) daher davon auszugehen, dass jeder Agent nach der Optimierung anhand seiner eigenen Kriterien oder Vorlieben streben wird, im Wissen, dass die anderen Agenten sich entsprechend verhalten. Die Antwort auf die Frage, ob dieses Verhalten zu einer optimalen Leistung der Supply Chain führe, lautet nach CACHON im Allgemeinen „nein“, da sich das Verhalten eines Agenten auf andere Agenten auswirkt. Wenn nun dieses Verhalten die Leistungsfähigkeit der Wertschöpfungskette beeinträchtigt, ist es allen Agenten möglich, von der Koordination der Leistungserbringung zu profitieren. Sie könnten vereinbaren, ihr Handeln auf das Wohl der Kette auszurichten. Neben dieser Vereinbarung bleiben die Anreize zum Handeln entsprechend der eigenen Ziele jedoch bestehen. Als typische Lösung dieses Dilemmas nennt CACHON (CACHON 1999, S. 113) die Vereinbarung von Ausgleichszahlungen (transfer payments), welche die Anreize der einzelnen Spieler und damit deren Verhalten verändern.

Zur Ermittlung der Höhe der Ausgleichszahlungen ist nach CACHON (CACHON 1999, S. 114) eine dreistufige Vorgehensweise üblich. Zunächst sei eine zentralistische Lösung zu bestimmen, bei der angenommen werde, ein Agent kontrolliere die gesamte Kette und maximiere den Gewinn der Kette. Danach sei die dezentrale Lösung zu untersuchen, in der jeder Agent versucht, seinen eigenen Gewinn zu maximieren. Differieren die beiden Lösungen, so seien die Ausgleichszahlungen der einzelnen Agenten solange zu verändern, bis die dezentralisierte der zentralisierten Lösung entspricht. Verschiedene auf diesen Prinzipien entwickelte Koordinationsmechanismen sind in der Literatur beschrieben und basieren auf einfachen, zweistufigen Systemen, die über ein Lager gekoppelt sind und zur Bedarfsübermittlung ein Bestellpunktverfahren einsetzen.

⁴² Agenten sind Instanzen eines Systems, so z.B. im Falle einer Supply Chain die einzelnen Unternehmen oder die Entscheidungsträger derselben (CHOI ET AL. 2001, S. 353).

3.4 Dezentralisierte Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten

So bestimmen CACHON & ZIPKIN (CACHON & ZIPKIN 1999) lineare Ausgleichszahlungen in einer zweistufigen Supply Chain, basierend auf der aktuellen Bestandshöhe und der Anzahl unbefriedigter Aufträge, so genannter Backorders. Der vorgeschlagene Vertrag sieht Transferzahlungen je Periode vom Zulieferer an den Händler vor, die sich aus den folgenden drei Elementen zusammensetzen (CACHON & ZIPKIN 1999, S. 945 ff.):

- **Teilweise Kompensation der Bestandskosten des Händlers (retailer holding cost subsidy):** Der Zulieferer trägt einen Teil der beim Händler auftretenden Kosten der Bestandsführung.
- **Strafe für Rückstand (retailer backorder penalty):** Kann der Händler die Kundennachfrage nicht oder nur unvollständig erfüllen, beteiligt sich der Zulieferer an den Kosten des Lieferrückstandes.
- **Entschädigung für Fehlbestände (supplier backorder penalty):** Kann der Zulieferer einen Auftrag des Händlers nicht oder nur unvollständig erfüllen, so entschädigt er den Händler entsprechend der Fehlmenge.

Für die drei Elemente werden Bestimmungsgleichungen entwickelt, die sicherstellen, dass trotz isolierten Festlegens ihres Bestellpunktes durch beide Parteien ein Gesamtoptimum erzielt wird.

Ebenfalls ein Anreizsystem basierend auf linearen Ausgleichszahlungen entwickelt CHEN (CHEN 1999). Anstelle der realen verwendet CHEN buchhalterische Bestände, also Lagerbestand zuzüglich avisierter Zugänge und abzüglich aktueller Bestellungen. Der Zulieferer übernimmt dabei die Lagerkosten und Pönalen des Händlers, welcher wiederum dem Zulieferer einen festgelegten Betrag je Einheit im buchhalterischen Bestand und Rückstand bezahlt. Diese Regelung vereinfacht die Berechnung der zu überweisenden Beträge, die so angepasst werden, dass der Händler den zu einem Gesamtoptimum führenden Bestellpunkt wählt und sein isoliertes Handeln mit einem koordinierten Handeln übereinstimmt. CACHON (CACHON 1999, S. 132) merkt hierzu an, dass in diesem Schema der Zulieferer die gesamte Supply Chain steuert und auf ein Gesamtoptimum ausrichtet, zugleich aber auch nur der Zulieferer von der Koordination profitiert.

PORTEUS (PORTEUS 2000) nennt sein Anreizschema responsibility tokens, was am besten mit Verpflichtungs-Gutschein übersetzt werden kann. Dabei sind die Gutscheine für den Händler äquivalent zu physischem Bestand. Wann immer der Zulieferer nicht in vollem Umfang die Bestellungen des Händlers erfüllen kann,

3 Ansätze zur Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten

werden fehlende Einheiten durch Gutscheine ersetzt. Dem Händler entstehen für die Gutscheine Bestandskosten und er kann mittels der Gutscheine Rückstandskosten ausgleichen, indem der Zulieferer die entsprechend anfallenden Kosten übernimmt. Im Gegenzug beteiligt der Händler seinen Lieferanten an den eingesparten Bestandskosten, da ja nicht Material, sondern nur Gutscheine gelagert wurden. Wiederum werden die Parameter der Transferzahlungen so eingestellt, dass beide Parteien die für ein Gesamtoptimum notwendige Einstellung des Bestellpunktes wählen.

LEE & WHANG beschreiben die Entwicklung eines, im Gegensatz zu den vorgeannten, nicht linearen Anreizsystems zur Koordination zweier dezentral geführter Standorte eines Unternehmens, bestehend aus den folgenden vier Bausteinen (LEE & WHANG 1999, S. 636 f.):

- **Verrechnungspreise (transfer pricing):** Es werden nur die tatsächlichen Kosten bezahlt, der liefernde Standort macht demnach keinen Gewinn.
- **Konsignation (consignment):** Die Bezahlung erfolgt nicht bei Empfang, sondern beim Verbrauch bzw. Weiterverkauf des angelieferten Materials. Zudem trägt der Lieferant einen Teil der Lagerhaltungskosten.
- **Zusätzliche Strafe für Rückstand (additional backlog penalty):** Gerät Standort 1 in Rückstand, so wird neben der Pönale für den Rückstand eine weitere Zahlung an Standort 2 fällig.
- **Entschädigung für Fehlbestände (shortage reimbursement):** Kann Standort 2 einen Auftrag von Standort 1 nicht vollständig erfüllen, so entschädigt er Standort 1.

Für das Funktionieren eines Anreizsystems notwendig sind aus Sicht der Autoren neben der genauen Kostenzuordnung die informatorische Dezentralisierbarkeit, d.h. das System darf allein auf lokal verfügbaren Informationen aufbauen, und die Kompatibilität der Anreize. Das entwickelte Anreizsystem weist den Autoren zufolge die drei geforderten Merkmale auf und führt im Fall stabiler Nachfrageverläufe zu gleichen Gesamtkosten wie die für mehrstufige Lagerketten unter

zentraler Planung und vollständiger Information als optimal geltende Order-up-to-Bestellpolitik⁴³ nach CLARK & SCARF (CLARK & SCARF 1960).

Die vorgestellten Ansätze bilden einen kleinen Ausschnitt der publizierten Arbeiten zu Anreizsystemen. Ihnen gemein ist die Einschränkung auf zweistufige Ketten, prognosegetriebene Produktion (make to stock, siehe Abschnitt 2.3), stabile Nachfrageverläufe und die Beschränkung der Betrachtung auf Lager- und Fehlbestandskosten zur Optimierung. Dies liegt darin begründet, dass für diese Fälle die mathematischen Formulierungen noch beherrschbar sind und entsprechende Bestimmungsgleichungen aufgestellt und gelöst werden können. Für größere Probleme, z.B. mehrere Stufen oder die Produktion nach Kundenaufträgen, würden die Gleichung schlicht zu komplex werden. Über den industriellen Einsatz entsprechender Anreizsysteme äußern sich die Autoren nicht.

3.4.2 Multiagentensysteme

Zur Produktionsplanung und -steuerung in dezentralen Systemen werden häufig so genannte Multiagentensysteme⁴⁴, kurz MAS, vorgeschlagen. Ein Multiagentensystem besteht dabei aus einer Menge von Agenten⁴⁵, welche kooperieren, um ein gemeinsames Ziel zu erreichen. Die (Software-)Agenten handeln dabei stellvertretend, entscheiden autonom, tauschen sich mit anderen Agenten aus und können sowohl voneinander als auch durch ihre Umwelt lernen, was eine Problemlösung ohne eine zentrale Koordinationsstelle ermöglicht.

In einer frühen Arbeit untersucht STIEFBOLD (STIEFBOLD 1998) die Möglichkeiten, durch den Einsatz eines Multiagentensystems die Reaktionsschnelligkeit innerhalb einer Logistikkette zu erhöhen sowie die Synchronisation von Produkti-

⁴³ Order-up-to-Bestellpolitik oder auch (s,S)-Politik: Bestellpunktverfahren mit variabler Bestellmenge. Bei Erreichen oder Unterschreiten einer festgelegten Bestandhöhe, des sogenannten Bestellpunktes *s*, wird genau jene Menge nachbestellt, dass der Bestand wieder die Höhe *S* erreicht.

⁴⁴ Synonym werden Begriffe wie Agentengesellschaften, Agentennetze oder nur Agentensystem verwendet (siehe STIEFBOLD 1998, S. 7 und S. 37). Zur Definition von Multiagentensystemen und Agenten siehe STIEFBOLD 1998, S. 6 f. und S. 29 ff.; FINK 2002, S. 47; DANGELMAIER ET AL. 2002, S. 555 f.; CARIDI & CAVALIERI 2004, S. 107 f. und KLEMENT 2005, S. 25 f. sowie die dort angeführte Literatur. Einen ausführlichen Überblick über Multiagentensysteme in der Produktionsplanung und -steuerung geben CARIDI & CAVALIERI (CARIDI & CAVALIERI 2004). Weitere Einsatzgebiete sind z.B. Steuerungssysteme (flexibel) verketteter Fertigungssysteme (POSSEL-DÖLKEN 2006).

⁴⁵ Häufig wird synonym von Software-Agenten gesprochen (z.B. STIEFBOLD 1998, S. 6; DANGELMAIER ET AL. 2002, S. 555; FINK 2002, S. 47; KLEMENT 2005, S. 25 f.)

3 Ansätze zur Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten

onsplänen gleichgestellter Systeme zu automatisieren. GJERDRUM ET AL. (GJERDRUM ET AL. 2001) stellen einen Ansatz vor, in dem Multiagentensysteme zur taktischen Koordination eines Netzwerkes Verwendung finden. Basierend auf der Materialverfügbarkeit verhandeln, jeweils als Agenten modelliert, ein Kunde und zwei Distributoren, welche wiederum ihre Bedarfe kostenminimal und termingerech durch zwei Fabriken bzw. auf dem freien Markt zu decken suchen.

DANGELMAIER ET AL. (DANGELMAIER ET AL. 2003) beschreiben den Aufbau eines Multiagentensystems zur Koordination der Beschaffung bzw. Belieferung von Sekundärbedarfen innerhalb einer Supply Chain. Die Agenten koordinieren hierbei die Abhol- und Anliefertermine zwischen einem Spediteur, einem Lieferanten und einem Abnehmer mit mehreren Werken.

Zur Auftragsplanung in dynamischen Netzwerken entwickeln AZEVEDO ET AL. (AZEVEDO ET AL. 2004) ein Multiagentensystem. Dazu definieren sie verschiedene Typen von Agenten, die zunächst aus den entsprechenden Informationssystemen innerhalb des Unternehmens das Kapazitätsangebot ermitteln und daraufhin in Verhandlungen mit Agenten der anderen Netzwerkpartner treten.

In der industriellen Fertigung befindet sich der Einsatz von Multiagentensystemen in Planungssystemen laut DANGELMAIER ET AL. (DANGELMAIER ET AL. 2002, S. 555) noch im Anfangsstadium und konnte auf der überbetrieblichen Ebene bislang noch nicht realisiert werden. Auch CARIDI & CAVALIERI (CARIDI & CAVALIERI 2004, S. 115) sehen die Phase des industriellen Einsatzes von Multiagentensystemen in der Produktionsplanung und -steuerung als noch nicht gekommen. Für den Bereich der Auftragsfeinplanung und -terminierung nennen sie zwei Hauptfaktoren für die mangelnde Einsetzbarkeit. Zum einen sei die Komplexität entsprechender Systeme aufgrund der Vielzahl einzusetzender Agenten sehr hoch. Zum anderen fehle bislang eine systematische und quantitative Untersuchung über die Leistungsfähigkeit von Multiagentensystemen im Vergleich zu konkurrierenden, verteilten oder nicht verteilten, Algorithmen. Auch KRESKEN & BAUMANN (KRESKEN & BAUMANN 2006, S. 272) sehen solche selbstorganisierende Systeme als noch nicht reif für den industriellen Einsatz.

3.5 Bewertung zentraler und dezentraler Ansätze zur Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten

Es ist unbestritten, dass zentrale Planungssysteme optimale Lösungen für Planungsprobleme im Rahmen der Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten liefern können (ALICKE 2002, S. 40). Allerdings ist nach FINK (FINK 2002, S. 47) „die Ableitung global optimaler Pläne [heute noch] nicht mit einem praktikablen Zeitaufwand möglich“. KRESKEN & BAUMANN (KRESKEN & BAUMANN 2006, S. 269) merken zudem an, dass ein in einer durch einen hohen Grad an Unbeständigkeit gekennzeichneten Produktionsumgebung zentral erstellter Plan in dem Moment, in dem er fertiggestellt wird, bereits wieder veraltet ist. Und laut VON STEINAECKER (VON STEINAECKER 1999, S. 29) muss der Versuch, ein „Netzwerk mit einem zentralen System zu koordinieren, [...] zwangsläufig an seiner eigenen Komplexität scheitern“. Zusammenfassend sind zentrale Planungsansätze aufgrund ihrer mangelnder Flexibilität (SCHULZE ET AL. 2006, S. 39), der erhöhten Komplexität (VON STEINAECKER 1999, S. 29, FINK 2002, S. 47, CHOI & HONG 2002, S. 480) und der wenig robusten Planungsergebnisse (KRESKEN & BAUMANN 2006, S. 269, VAN LANDEGHEMA & VANMAELE 2002, S. 773) derzeit noch keine echte Alternative zur Auftragsabwicklung in Wertschöpfungsketten.

Zusätzlich zu diesen technischen Schwierigkeiten nennen OVALLE & MARQUEZ (OVALLE & MARQUEZ 2003, S. 199) Gründe, warum die Entscheidungsträger der einzelnen Partner Nachteile in einer zentralen Steuerung sehen und deren Einführung behindern könnten. Dies sind u.a. folgende:

- Die Supply Chain bestehe aus unterschiedlichen Unternehmen mit eigenen und sich z.T. widersprechenden Zielsetzungen.
- Eine zentrale Kontrolle könne dem jeweiligen Unternehmen Auflagen bzgl. der Prozesse und Regeln auferlegen, die Kontrolle über interne bzw. lokale Prozesse werde somit vermindert.
- Nicht alle Unternehmen seien bereit, das finanzielle und operative Risiko zu teilen.

Die vorgestellten dezentralen Systeme sind hingegen in ihrem derzeitigen Entwicklungsstand nicht oder nur begrenzt für den industriellen Einsatz geeignet. Erst die Verwendung von relativ einfachen Modellen – diese bestehen i.d.R. aus zwei durch ein Lager entkoppelten Akteuren welche beide eine "make to stock"-

3 Ansätze zur Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten

Strategie verfolgen – und die Annahme stabiler Nachfrageverläufe sowie die Beschränkung auf die Bestandshöhe als einziges Optimierungskriterium ermöglicht den Autoren die mathematische Formulierung und exakte Lösung des Problems. Diese Einschränkungen gehen jedoch zu Lasten der Anwendbarkeit, da solche Restriktionen im industriellen Umfeld selten Bestand haben. Für größere Probleme, d.h. z.B. für mehrere Stufen bzw. Akteure der Wertschöpfungskette, welche nach Kundenaufträgen produzieren und in denen neben der Bestandshöhe auch die Auslastung der Stufen und die Durchlaufzeiten relevante Optimierungskriterien sind, würde die Problemformulierung erheblich schwieriger und eine exakte Lösung schlicht unmöglich werden.

Bezüglich eines Einsatzes von reinen Marktmechanismen zur Koordination weist FINK (FINK 2002, S. 48 f.) zudem darauf hin, dass die häufig verwendeten einfachen Auktionen in Produktionssystemen aufgrund der existierenden Komplementaritäten⁴⁶ keine optimalen Pläne liefern können und daher nicht geeignet sind. Kombinatorische Auktionen hingegen, bei denen Agenten nicht um Einzelaufträge, sondern um die möglichen Kombinationen der zu vergebenden Aufträge verhandeln, stellten hier einen Mechanismus zur optimalen Planung dar. Aufgrund der exponentiell mit der Anzahl der zu vergebenden Aufträge wachsenden Gebotszahl führten kombinatorische Auktionen jedoch „im Allgemeinen zu NP-schweren Problemen und sind damit nicht effizient lösbar“ (FINK 2002, S. 49). Aufgrund der in der Produktion typischerweise auftretenden Verbundeffekte und der daraus resultierenden Interdependenzen seien die derzeit verwendeten Verfahren der marktorientierten Koordination im Produktionskontext daher nicht zulässig.

Derzeit fehlen demnach Planungsansätze für die überbetriebliche Auftragskoordination, welche die Vorteile zentralisierter Konzepte, also das Erzielen optimaler Planungsergebnisse, und jene dezentralisierter Konzepte, nämlich die Robustheit und Lebensdauer der Planungsergebnisse, verbinden. Dies gilt es natürlich zu gewährleisten, ohne die Nachteile der jeweiligen Ansätze in Kauf nehmen zu müssen, also die mangelnde Flexibilität und limitierte Gültigkeitsdauer der Pläne bei zentralen Ansätzen einerseits und die stark eingeschränkte Anwendbarkeit

⁴⁶ Komplementär: sich in ihrem Nutzen ergänzend, d.h. der Nutzwert eines bestimmten Auftrages erhöht sich in Kombination mit einem anderen Auftrag, z.B. beim reihenfolgeabhängigen Rüsten. Es wird in diesem Zusammenhang auch von Verbundeffekten gesprochen (FINK 2002, S. 50).

3.5 Bewertung zentraler und dezentraler Ansätze zur Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten

auf vergleichsweise einfache und somit unrealistische Probleme dezentraler Ansätze andererseits.

Diese Verbindung der Vorteile beider Ansätze muss natürlich erfolgen, ohne die Nachteile der jeweiligen Ansätze in Kauf nehmen zu müssen, also die mangelnde Flexibilität und limitierte Gültigkeitsdauer der Pläne bei zentralen Ansätzen einerseits und die stark eingeschränkte Anwendbarkeit auf vergleichsweise einfache und somit unrealistische Probleme dezentraler Ansätze andererseits.

Eine vergleichbare Fragestellung ergab sich in der Vergangenheit im Rahmen der Einführung autonomer Fertigungssegmente innerhalb eines Fertigungsstandortes. Auch hier sind mehrere an der Wertschöpfung beteiligte Parteien zu koordinieren und mögliche Planungsansätze bewegen sich im Spannungsfeld zwischen starker zentraler Kontrolle einerseits und der Nutzung von dezentral verfügbarem Wissen und Problemlösungsfähigkeiten andererseits. Als Lösung dieses Dilemmas wurden häufig⁴⁷ zeitfensterbasierte Planungssysteme vorgeschlagen, was die Frage nahelegt, ob diese Lösung auch auf überbetriebliche Wertschöpfungsketten übertragen werden kann. Im folgenden Kapitel wird diese Frage näher beleuchtet.

⁴⁷ Vgl. z.B. WEMMERLOV & HYER 1987, ANSORGE ET AL. 1996, HAHN-DRODOFSKY 1999, LULAY 1999, SPATH ET AL. 2001, SPATH ET AL. 2002 sowie die in Abschnitt 4.3 näher vorgestellten Ansätze von BURBIDGE 1988, SÜER 1998, LÖLLMANN & FÄRBER 1998, BARRHO 2001, KLINKEL 2004 und BORNHÄUSER ET AL. 2005

3 Ansätze zur Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten

4 Zeitfensterbasierte Planungssysteme – Stand der Forschung

4.1 Übertragung zeitfensterbasierter Systeme auf überbetriebliche Wertschöpfungsketten

Auf der innerbetrieblichen Ebene führte die Erkenntnis, dass die Reduktion der organisatorischen Komplexität und ein Aufbrechen der zentralistischen Hierarchien eine notwendige Voraussetzung für erhöhte Flexibilität und Reaktionsfähigkeit sind, in den 1980er und 1990er Jahren zur Segmentierung der Produktionsstruktur⁴⁸ (HAHN-DRODOFSKY 1999, S. 17; LULAY 1999, S. 2 ff.). Ähnlich wie in den, in dieser Arbeit im Fokus stehenden, überbetrieblichen Wertschöpfungsketten verteilt sich die Wertschöpfung in segmentierten Produktionsstrukturen auf eine Vielzahl dezentraler und (teil-)autonomer Einheiten innerhalb eines Betriebes, den Produktionssegmenten, die sich intern optimieren und deren Aktivitäten zentral koordiniert werden müssen.

Durch das Aufbrechen zentralistischer Strukturen und die Schaffung dezentral und teilautonom agierender Einheiten werden nach LULAY (LULAY 1999, S. 2 ff.) den Mitarbeitern in den Produktionssegmenten Handlungs- und Entfaltungsspielräume gewährt und die vor Ort vorhandenen Problemlösungsfähigkeiten und das entsprechende Wissen der dezentralen Einheiten kann so für eine optimierte Planung genutzt werden⁴⁹. Mit der Dezentralisierung von Entscheidungsbefugnissen und der Abkehr von zentralen, monolithischen Planungsansätzen wurde auch planungsseitig ein Paradigmenwechsel propagiert (LULAY 1999, S. 2 ff.). So wurden immer wieder zeitfensterbasierte Planungssysteme zur Koordination der verschiedenen Produktionssegmente vorgeschlagen, da diese zugleich eine starke

⁴⁸ So entstanden in dieser Periode unter anderem das Konzept der Modularen Fabrik nach WILDEMANN (WILDEMANN 1988) sowie jenes der Fraktalen Fabrik nach WARNECKE (WARNECKE 1992). Dass diese Ideen bis heute nichts an Attraktivität verloren haben, zeigen neuere Arbeiten wie z.B. jene von BARRHO 2001; KLINKEL 2004 und LOPITZSCH 2005.

⁴⁹ Weiterer Hintergrund der Dezentralisierung waren arbeitspsychologische Aspekte. So versprach man sich eine gesteigerte Mitarbeitermotivation durch die größere Verantwortung (vertikale Erweiterung des Aufgabenspektrums, das sogenannte Job-Enrichment) und abwechslungsreichere Aufgaben (horizontale Erweiterung des Aufgabenspektrums, das sogenannte Job-Enlargement). Siehe hierzu u.a. HYER & WEMMERLOV 1982, WEMMERLOV & HYER 1987, WEMMERLOV & HYER 1989 und WEMMERLOV 1988.

4 Zeitfensterbasierte Planungssysteme – Stand der Forschung

zentrale Koordination sowie die Nutzung dezentraler Optimierungspotentiale in den Segmenten ermöglichen.

Die entsprechenden Planungsansätze sehen dabei die zentrale Koordination der Materialflüsse über die verschiedenen Produktionsstufen hinweg mittels der Vorgabe von Eckterminen vor, innerhalb derer die detaillierte Planung und Steuerung in den einzelnen Produktionsstufen erfolgt. Für den sich aus den Eckterminen ergebenden Freiraum⁵⁰, der die lokale Optimierung einer einzelnen Produktionsstufe ermöglicht, prägen ANSORGE ET AL. (ANSORGE ET AL. 1996) den Begriff Planungsfreiraum⁵¹. Dieser Handlungsfreiraum auf der Ebene der einzelnen Produktionssegmente ist nach BARRHO (BARRHO 2001, S. 2) die Voraussetzung zur Bewältigung des turbulenten Umfeldes mit sich stetig wandelnden Planungsparametern und damit für die Robustheit der Planung und Flexibilität der Unternehmung. Die Größe des Handlungsfreiraums bzw. die Länge der Planungszeitfenster einzelner Segmente beeinflusst die logistischen Kenngrößen der gesamten Produktion wie z.B. Durchlaufzeit, Bestand, Auslastung und Termintreue. Neben der lokalen Optimierung innerhalb eines Segments kann demnach auch eine globale Optimierung erfolgen.

Diese Eigenschaft machen zeitfensterbasierte Planungskonzepte für die Steuerung von Systemen mit verteilten Entscheidungsbefugnissen, wie z.B. in segmentierten Produktionsstrukturen, interessant. Der Gedanke liegt daher nahe, diese Ideen auf die Problemstellung der überbetrieblichen Auftragskoordination zu übertragen und ein zeitfensterbasiertes Planungssystem für Wertschöpfungsketten zu entwerfen. Das zu konzipierende System muss dabei den einzelnen Akteuren ausreichend Freiraum zur dezentralen Optimierung und Reaktion auf sich verändernde Planungsgrößen lassen, ohne die gesamthafte Optimierung der Wertschöpfungskette zu gefährden. Durch die Konfiguration der Länge der Planungsfreiräume der einzelnen an der Wertschöpfung Beteiligten kann eine globale Optimierung durch eine effektive unternehmensübergreifende Koordination

⁵⁰ Der Begriff Freiraum ist im Zusammenhang mit der Koordination von Wertschöpfungsketten nicht durchweg positiv besetzt. So führen KALUZA ET AL. (KALUZA ET AL. 2003, S. 2 f.) aus, dass es bei Vertragsverhandlungen zwischen zwei Akteuren einer Wertschöpfungskette „kaum möglich ist, alle denkbaren Situationen zu antizipieren“ und sich somit "fast immer Freiräume für opportunistisches Verhalten“ ergeben.

⁵¹ Weitere Bezeichnungen sind Dispositionsspielraum (KATH 1994, S. 19), Handlungsspielraum (BARRHO 2001, S. 13; KLINKEL 2004, S. 2 und S. 36), Handlungsfreiraum (BARRHO 2001, S. 2), Optimierungsspielraum (DANGELMAIER ET AL. 2003, S. 72) und Handlungsfreiheit (SCHULZE ET AL. 2006, S. 40).

4.1 Übertragung zeitfensterbasierter Systeme auf überbetriebliche Wertschöpfungsketten

der einzelnen Stufen der Wertschöpfungskette erreicht und zugleich die Flexibilität und Robustheit durch eine lokale Optimierung der einzelnen Wertschöpfungsstufen gewährleistet werden. Demzufolge erfüllt ein zeitfensterbasierter Koordinationsansatz die in Abschnitt 3.2 beschriebenen Anforderungen an ein Konzept zur Auftragskoordination in Wertschöpfungsketten.

In den folgenden Abschnitten sollen bestehende, für den Einsatz auf der innerbetrieblichen Ebene konzipierte zeitfensterbasierte Planungssysteme bzw. Period Batch Control⁵² vorgestellt werden. Zunächst seien die Funktionsweise und die zugrundeliegenden Prinzipien zeitfensterbasierter Planungssysteme in Abschnitt 4.2 vorgestellt. Im darauf folgenden Abschnitt 4.3 werden Planungsansätze verschiedener Autoren beschrieben, die sich im Wesentlichen durch unterschiedliche Begrifflichkeiten unterscheiden. Der Vergleich und die Bewertung der vorgestellten Ansätze erfolgt in Abschnitt 4.3.2.

Ansätze zur Auslegung der Länge einheitlicher Zeitfenster werden in Abschnitt 4.4 beschrieben. Darunter fallen Arbeiten mit explizitem Bezug zu zeitfensterbasierten Systemen wie auch Ansätze aus dem Bereich des sogenannten Common Cycle Scheduling. Dabei handelt es sich um Verfahren, bei denen, ohne den theoretischen Überbau einer Planungs- und Steuerungslogik, eine Losgrößenbestimmung über die Festlegung einheitlicher Produktionszyklen erfolgt. In Abschnitt 4.4.4 werden die untersuchten Ansätze einander gegenübergestellt und einer Bewertung unterzogen. Das Kapitel schließt mit der kritischen Würdigung der vorgestellten Konzepte zeitfensterbasierter Planungssysteme sowie der Beiträge zur Ermittlung der optimalen Größe der Zeitfenster.

⁵² In der englischsprachigen Literatur findet sich für zeitfensterbasierte Planungssysteme der Begriff Period Batch Control, beide Begriffe werden im Weiteren synonym verwendet. Die Literatur zu Period Batch Control ist nach dem Wissen des Autors rein englischsprachig, so dass weder das System an sich noch für die charakterisierenden Elemente dieses Planungssystems ein etablierter deutscher Begriff existiert. In den von der Redaktion verfassten Übersetzungen des Abstracts zweier Artikel im International Journal of Production Research findet sich der Begriff „periodisches Chargenfertigungssteuerungssystem“ (ZELENOVIC & TESIC 1988, S. 552) und „Periodenchargenüberprüfung“ (LEE 1985, S. 1113). Beide Übersetzungen sind wenig geeignet, daher werden im Weiteren die englischsprachigen Begriffe verwendet und beim ersten Auftreten eine möglichst treffende Übersetzung nachgestellt.

4.2 Prinzipielle Funktionsweise zeitfensterbasierter Planungssysteme

Zeitfensterbasierte Planungssysteme beruhen auf fixen Planungsperioden bzw. Zeitfenstern⁵³. Zu Beginn eines Zeitfensters wird der gesamte Auftragsvorrat der aktuellen Planungsperiode für die jeweilige Produktionsstufe freigegeben. Innerhalb des Zeitfensters der Länge T werden die entsprechenden Produkte produziert, um in der darauffolgenden Planungsperiode von der nachfolgenden Produktionsstufe weiterverarbeitet zu werden. Über die Gestaltung der Planungsperioden wird eine Koordination der einzelnen Produktionsstufen erreicht. Abbildung 4.1 zeigt schematisch die Bearbeitung verschiedener Lose in aufeinanderfolgenden Produktionsstufen über den Planungsperioden.

Periode Stufe	1	2	3	4	5
Endmontage			Los 3	Los 4	Los 5
Vormontage		Los 3	Los 4	Los 5	
Komponenten	Los 3	Los 4	Los 5		
Fertigung	Los 4	Los 5			

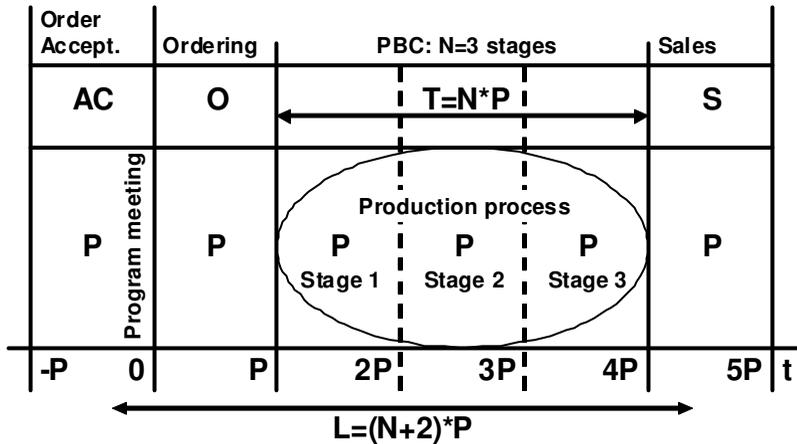
Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der Bearbeitung verschiedener Lose in aufeinanderfolgenden Produktionsstufen über den Planungsperioden (in Anlehnung an STEELE & MALHOTRA 1997, S. 422)

Die Länge des Zeitfensters hat dabei Auswirkungen auf die Gesamtdurchlaufzeit und damit die Bestandskosten sowie die Rüstkosten und die Aulastung des Produktionssystems. Die Durchlaufzeit ergibt sich nach RIEZEBOS (RIEZEBOS 2001,

⁵³ Die Begriffe Zeitfenster, Planungsperiode und Planungsfenster beschreiben den einer Wertschöpfungsstufe zur Verfügung stehenden Zeitraum zur Abarbeitung des zu Anfang des Zeitfensters bzw. der Planungsperiode freigegebenen Auftragsvorrats. Innerhalb dieses Zeitraums kann die Wertschöpfungsstufe autark planen und steuern, der Zeitraum stellt somit den Planungsfreiraum der Wertschöpfungsstufe dar. Im Folgenden werden die drei Begriffe Zeitfenster, Planungsperiode und Planungsfreiraum synonym verwendet.

4.2 Prinzipielle Funktionsweise zeitfensterbasierter Planungssysteme

S. 50) als Produkt aus der Anzahl der Produktionsstufen N und der Länge des einheitlichen Planungszyklus P . Zusätzlich müssen noch je ein Planungszyklus zur Auftrageinlastung und ein Planungszyklus als Wartezeit bis zur Auslieferung der Waren einberechnet werden (vgl. Abbildung 4.2).



P: Period length

T: Manufacturing throughput time

L: Customer order lead time

Abbildung 4.2: Durchlaufzeit im Fall einheitlicher Planungszykluslängen nach RIEZEBOS (RIEZEBOS 2001, S. 49)

Die Rüstkosten werden durch den sogenannten Losgrößeneffekt beeinflusst, der in der Literatur (NEW 1977, BURBIDGE 1988, STEELE 1998, RIEZEBOS 2001) wie folgt beschrieben wird: Die Länge eines Planungszyklus bestimmt die Anzahl der Produktionszyklen pro Jahr. Unter der Annahme, dass der Jahresbedarf gleichmäßig auf die Perioden verteilt ist, ergibt sich die Produktionslosgröße l_{ij} zu:

$$l_{ij} = d_i * T_j \tag{1}$$

d_i : Bedarf für das Produkt i je Standardzeiteinheit

l_{ij} : Produktionslosgröße des Produktes i in der Stufe j

T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j in Standardzeiteinheiten

Unter der Annahme eines konstanten Variantenmixes wird jede Variante in jedem Produktionszyklus, unabhängig von dessen Länge, produziert. Somit bleibt

4 Zeitfensterbasierte Planungssysteme – Stand der Forschung

die Rüstzeit je Zyklus konstant und die Nettokapazität verändert sich mit der Größe von T . In Abbildung 4.3 ist der beschriebene Effekt illustriert.

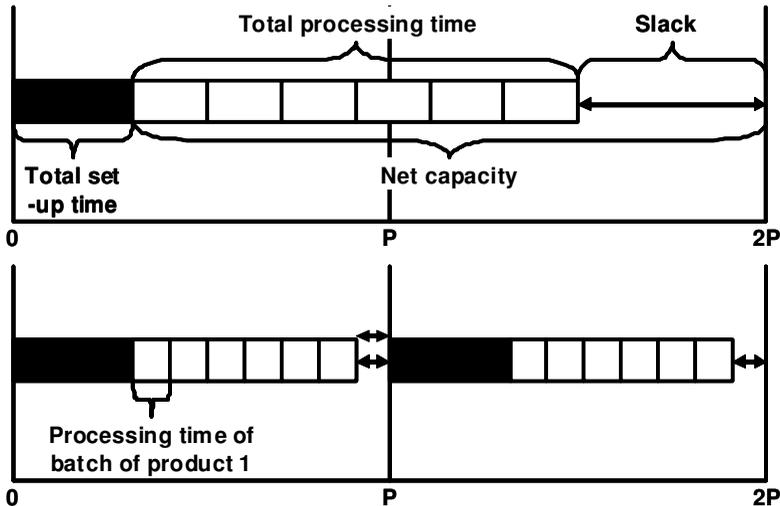


Abbildung 4.3: Rüstzeiteffekt nach RIEZEBOS (RIEZEBOS 2001, S. 87)

Im Vergleich zu anderen Planungsverfahren unterscheiden sich zeitfensterbasierte Planungssysteme bzw. Period Batch Control-Ansätze durch drei grundlegende Prinzipien (BENDERS & RIEZEBOS 2002, S. 499 f.; STEELE 1998, S. 310)⁵⁴:

- **Single Cycle Ordering (gleiche Freigabefrequenz)**⁵⁵ bezieht sich auf die Frequenz, in der Aufträge für die verschiedenen Produktionsstufen freigegeben werden: Jede Unterbaugruppe hat dieselbe Freigabefrequenz wie die Überbaugruppe.
- **Single Phase (Einphasigkeit)** bezieht sich auf den Zeitpunkt der Auftragsfreigabe: Jeder Auftrag wird zum gleichen Zeitpunkt im Produktionssystem freigegeben. Dieser Zeitpunkt definiert den Periodenbeginn.

⁵⁴ STEELE & MALHOTRA (STEELE & MALHOTRA 1997, S. 424 ff.) nennen ebenfalls diese drei Prinzipien mit leicht unterschiedlicher Bezeichnung (Single Cycle Order Frequency, Single Phase Order Release und Constant Planned Lead Time) und ergänzen darüber hinaus das Push Scheduling und das Policy Linking.

⁵⁵ GRAVES (GRAVES 1981, S. 662) sieht im Single Cycle Ordering das Hauptmerkmal von PBC.

4.2 Prinzipielle Funktionsweise zeitensterbasierter Planungssysteme

- **Single Offset Time (identische Planungsperioden)**, die sich auf die Durchlaufzeit⁵⁶ eines Auftrags in einer Produktionsstufe bezieht: Alle Aufträge haben die gleiche Durchlaufzeit.

In Kombination bedeuten das zweite und das dritte Prinzip, dass alle Aufträge innerhalb einer Wertschöpfungsstufe den gleichen Start- und Endtermin besitzen. Dies ermöglicht der Wertschöpfungsstufe erst die freie Wahl in der Planung der Bearbeitungsreihenfolge und bietet somit Raum für eventuelle Rüstzeitoptimierungen.

STEELE (STEELE 1998, S. 313) und STEELE & MALHOTRA (STEELE & MALHOTRA 1997, S. 424) betonen die einheitliche Länge der Planungsperioden der einzelnen Wertschöpfungsstufen. Diese Forderung ergibt sich nach STEELE & MALHOTRA (STEELE & MALHOTRA 1997, S. 426) aus dem Prinzip der gleichen Freigabefrequenz entlang aller Stufen (Single Cycle), welches wiederum durch die Einphasigkeit (Single Phase) bedingt sei. Letzteres Prinzip ermögliche dann auch erst eine rüstzeitminimale Reihenfolgebildung innerhalb einer Produktionszelle.

Für den Einsatz von zeitensterbasierten Planungssystemen nennen BENDERS & RIEZEBOS (BENDERS & RIEZEBOS 2002) zwei Voraussetzungen:

- Es liegen mehrere sequentielle und zu koordinierende Produktionsstufen vor⁵⁷.
- Durch die Entkopplung der einzelnen Produktionsstufen können Verbesserungen des Gesamtergebnisses erzielt werden. Dies kann zum Beispiel für Situationen gelten, in denen Reihenfolgeentscheidungen in unterschiedlichen Stufen zu unterschiedlichen optimalen Reihenfolgen führen.

Verschiedene Ausprägungen zeitensterbasierter Planungssysteme werden im folgenden Abschnitt vorgestellt.

⁵⁶ Zeit zwischen der Auftragsfreigabe in einer Produktionsstufe bis zur Weitergabe des Auftrags an die nachfolgende Produktionsstufe

⁵⁷ Es ist offensichtlich, dass PBC für eine einzelne Produktionsstufe nicht geeignet ist. Die Autoren merken zudem an, dass für eine zu große Anzahl von Produktionsstufen PBC aufgrund der sich ergebenden langen Durchlaufzeiten nicht geeignet sei.

4.3 Ausgestaltung zeitfensterbasierter Planungssysteme

4.3.1 Konzepte zeitfensterbasierter Planungssysteme

Die Urform zeitfensterbasierter Planungssysteme und das wohl am besten beschriebene Verfahren⁵⁸ ist das **Period Batch Control** System, kurz PBC, welches häufig BURBIDGE zugeschrieben wird⁵⁹. Den einzelnen Produktionsstufen N werden Planungsperioden mit einer einheitlichen und über den Zeitverlauf konstanten Länge P zugewiesen.

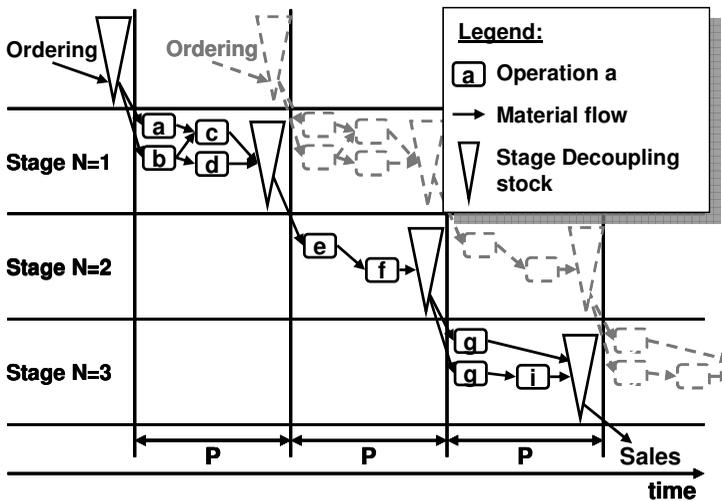


Abbildung 4.4: PBC-System mit drei Stufen (nach RIEZEBOS 2001, S. 48)

⁵⁸ Umso erstaunlicher ist es, dass dieser Ansatz in Deutschland bislang keine Beachtung gefunden hat. So findet Period Batch Control weder bei LÖLLMANN & FÄRBER 1998, SIHN ET AL. 1999, SIHN ET AL. 2000, BARRHO 2001, KUPPINGER 2001, FÄRBER ET AL. 2002, KLINKEL 2004 noch bei BORNHÄUSER ET AL. 2005 Erwähnung.

⁵⁹ Die Ursprünge des Period Batch Control (PBC) liegen im Dunklen, unbestritten ist jedoch das Bemühen von BURBIDGE (vgl. BURBIDGE 1957; BURBIDGE 1975; BURBIDGE 1978; BURBIDGE 1988; BURBIDGE 1989; BURBIDGE 1994 und BURBIDGE 1996) um die Verbreitung der Idee. Dies führt soweit, dass einige Autoren in ihm sogar den Begründer des PBC sehen (z.B. STEELE & MALHOTRA 1997, S. 422; HYER & WEMMERLOV 1982, S. 686; ASKIN & IYER 1998, S. 363). BURBIDGE (BURBIDGE 1994, S. 97) selbst sowie BENDERS & RIEZEBOS (BENDERS & RIEZEBOS 2002, S. 498) schreiben das Konzept R. J. Gigli zu, der es im Zweiten Weltkrieg zur Planung und Steuerung der Produktion von Flugzeugen der Royal Airforce einsetzte. Zur Geschichte von PBC siehe BENDERS 2002

Die Produktionsstufen sind durch Materialpuffer voneinander entkoppelt und können innerhalb der Länge der Planungsperiode frei und unabhängig voneinander die jeweiligen Aufträge bearbeiten (Abbildung 4.4). Das System erfüllt die drei grundlegenden Prinzipien (vgl. Abschnitt 4.2) der gleiche Freigabefrequenz, der Einphasigkeit und der identische Planungsperioden und wird von CHILDE (CHILDE 1997, S. 183) auch als "Standard" Period Batch Control bezeichnet. Bezüglich der Auslegung der Planungsperiodenlänge macht der Autor keine Angaben.

SÜER (SÜER 1998) nennt seinen Ansatz den **Time Bucket Approach**⁶⁰. Die einzelnen Operationen sind in Stufen zusammengefasst und der Planungshorizont ist in einzelne, gleichgroße Perioden (Time Buckets) unterteilt. Ein Fertigungslos wird in einer Stufe s in der Periode p eingelastet, in der folgenden Stufe $s+1$ in Periode $p+1$ und der übernächsten Stufe $s+2$ in der übernächsten Periode $p+2$ usw. Der Autor erwähnt die Einführung des beschriebenen Ansatzes bei einem Schmuckhersteller in Puerto Rico, gibt darüber hinaus aber keine konkreten Gestaltungshinweise.

Das so genannte **3Liter-PPS**[®]-Konzept geht auf LÖLLMANN & FÄRBER (LÖLLMANN & FÄRBER 1998) zurück und wurde als Gegenentwurf zu den mächtigen und starren, auf einer komplexen Planungsmethodik beruhenden PPS-Systemen entwickelt. Konzipiert für den Einsatz in dezentralen Organisationsformen, sollte ein schlankes und transparentes System geschaffen werden, das die flexible Reaktion auf Störungen ermöglicht.

Kerngedanke ist die hierarchische Planung, unterteilt in eine zentrale Grobplanung und eine dezentrale Feinplanung in den Fertigungssegmenten, die die Entwickler des Konzeptes als Organisationseinheiten bezeichnen. Auf Basis von sogenannten Produktkomponenten⁶¹ (Baugruppen, Halbfabrikate) werden Produktionspläne in grob vorgegebenen Zeitrastern zentral für die einzelnen Organisationseinheiten erstellt (vgl. Abbildung 4.5). Ausgehend vom Kundenwunsch

⁶⁰ Wörtlich den Zeiteimer-Ansatz, am besten wohl zu übersetzen mit Zeitfenster oder Kapazitätstöpfe. Was genau der Unterschied zu einem herkömmlichen Period Batch Control-Ansatz ist, ist nicht zu erkennen.

⁶¹ Produktkomponenten können dabei mehrere Prozesse, so genannte Prozessfolgen, umfassen, die komplett in einer dezentralen Organisationseinheit abgearbeitet werden. Durch das Zusammenfassen der Arbeitsfolgen einer Organisationseinheit wird die Komplexität der Planung reduziert, da nicht mehr auf der Stufe von Einzelteilen geplant wird.

4 Zeitfensterbasierte Planungssysteme – Stand der Forschung

termin werden, unter Berücksichtigung der verfügbaren Kapazität in den jeweiligen Segmenten, die im System durch so genannte Planungstöpfe repräsentiert wird, mittels Rückwärtsterminierung⁶² die Fertigungstermine für jede Organisationseinheit entlang des Produktdurchlaufs festgelegt und die Fertigungsaufträge in die Planungstöpfe der einzelnen Segmente eingelastet. Die Feinplanung und -steuerung erfolgt dezentral in den Organisationseinheiten, wobei das Zeitraster den Handlungsspielraum der entsprechenden Organisationseinheit festlegt (FÄRBER ET AL. 2002, S. 243).

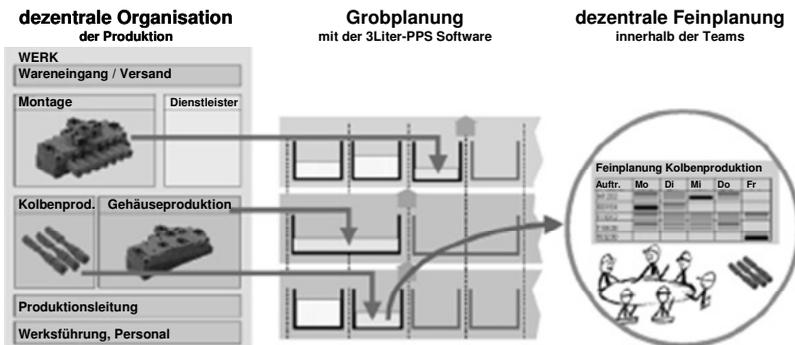


Abbildung 4.5: Entkopplung der Organisationseinheiten durch Trennung von Grob- und Feinplanung (FÄRBER ET AL. 2002, S. 243)

Das System wird seit Ende der 1990er Jahre kommerziell vermarktet und entsprechend groß ist die Anzahl von Veröffentlichungen in diversen Fachzeitschriften (siehe u.a. SIHN ET AL. 1999; SIHN ET AL. 2000; KUPPINGER 2001; FÄRBER ET AL. 2002). Trotz der Vielzahl der Arbeiten finden sich keine Hinweise bezüglich der Ausgestaltung der Zeitraster bzw. der Ermittlung der Größe der Planungstöpfe der einzelnen Organisationseinheiten bzw. der hierzu eingesetzten Verfahren, was die Vermutung nahe legt, dass ein solches Verfahren nicht existiert. Dies wird von den Entwicklern des Konzeptes bestätigt⁶³.

⁶² Ausgehend vom spätesten Ablieferungstermin werden Transport-, Liege-, Bearbeitungs- und Rüstzeiten rückwärtsschreitend abgetragen, um die Starttermine der einzelnen Arbeitsgänge zu ermitteln (vgl. KERNLER 1995, S. 170).

⁶³ Herr Ulrich Färber, einer der beiden Gründer, bestätigte dies in einem Telefonat am 05.01.2007. Bei Einführung des Systems in einem Unternehmen werde demnach sehr pragmatisch vorgegangen und gemeinsam mit den Mitarbeitern vor Ort in den Segmenten, basierend auf deren Erfahrungen, die Größe der Zeitfenster je Organisationseinheit festgelegt. Die Größen der Zeitfenster verschiedener Organisations-

Am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik der Universität Karlsruhe wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 346 der Ansatz der **zeitfenstergesteuerten Auftragsabwicklung** (SPATH ET AL. 2001, S. 12) bzw. zeitfenstergesteuerten Fertigung (SPATH ET AL. 2002, S. 132) entwickelt. In einer übergeordneten zentralen Grobplanung werden dabei die Aufträge auf die einzelnen Fertigungssegmente verteilt. Die Feinplanung erfolgt anschließend dezentral in den Segmenten, wo lokales Erfahrungswissen und aktuellste Informationen zum Status einzelner Aufträge und Betriebsmittel vorliegen.

Das Verfahren der zeitfenstergesteuerten Auftragsabwicklung ermögliche dabei die weitgehende Entkopplung der Grob- und Feinplanung (BARRHO 2001, S. 46). Ziel der Arbeit von BARRHO (BARRHO 2001) ist die Dimensionierung eines Auftragspools (Zeitfenster) als Handlungsrahmen für die Segmente, der die interne Optimierung, die Selbstregelung und die kurzfristige Reaktion unter Einhaltung übergeordneter Unternehmensziele ermöglicht (BARRHO 2001, S. 41).

Im Unterschied zu den vorgenannten Ansätzen variiert die Länge der Zeitfenster von Planungszyklus zu Planungszyklus. Zur Festlegung der Länge des Zeitfensters wird der Zeitfensternutzwert als gewichtete Summe der Zielerfüllungsgrade hinsichtlich der vier Kriterien Durchlaufzeit, Auslastung, Bestand und Rüstaufwand ermittelt. Ausgehend von einem Initialwert werden solange Aufträge aus einer priorisierten Auftragsliste ausgewählt und eingeplant, bis das Zeitfenster gefüllt ist (vgl. Abbildung 4.6). Die Auswahl zusätzlicher Aufträge erfolgt nach dem Kriterium der größten Verbesserung des Zeitfensternutzwertes und soll mit Hilfe einer nicht näher spezifizierten Heuristik realisiert werden⁶⁴. Der Zeitfensternutzwert wird daraufhin erneut bestimmt und mit dem Abbruchkriterium verglichen. Für die Wahl des Abbruchkriteriums gibt der Autor keine Empfehlung, er erwähnt lediglich zwei Möglichkeiten: zum einen die erstmalige Verschlechterung

einheit könnten dabei variieren, seien aber immer Vielfache voneinander, um die Synchronisation zu gewährleisten.

⁶⁴ Durch das sukzessive Hinzufügen einzelner Aufträge ist eine Optimalität der Belegung eines Zeitfensters jedoch nicht gewährleistet, da die in der Produktion typischerweise auftretenden Verbundeffekte und die daraus resultierenden Interdependenzen nicht berücksichtigt werden. Beispielsweise könnte der Zeitfensternutzwert durch die Einsteuerung der Aufträge B und C höher sein, als durch die Einsteuerung der Kombination des Auftrages A mit Auftrag B oder Auftrag C. Hätte Auftrag A aber im ersten Schritt, bei Betrachtung nur eines Auftrages, von allen drei Aufträgen die höchste Steigerung des Zeitfensternutzwertes zur Folge, würde die Auftragskombination B und C nie in Betracht gezogen werden. Anstelle der Sukzessivplanung wäre also eine Simultanplanung zur Bestimmung des optimalen Zeitfensters notwendig.

4 Zeitfensterbasierte Planungssysteme – Stand der Forschung

zung des Zeitfensternutzwerts, zum anderen die Einplanung aller Aufträge, um im Anschluss aus allen berechneten Nutzwerten den größten auswählen zu können. Mit dem zweiten Vorgehen soll verhindert werden, dass der Prozess an einem lokalen Minimum vorzeitig beendet wird.

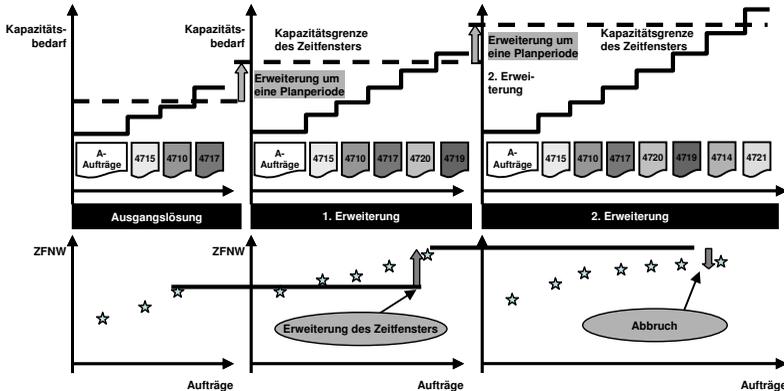


Abbildung 4.6: Erweiterung des Zeitfensters und Abbruchkriterium (aus BARRHO 2001, S. 70)

Bezüglich der Koordination einzelner Segmente bei segmentübergreifenden Fertigungsaufträgen sind die Aussagen des Autors vage (BARRHO 2001, S. 83 ff.). Er erwähnt einerseits die Möglichkeit einer Verbrauchssteuerung und des Einsatzes von Puffern, gibt aber weder Hinweise zur Dimensionierung⁶⁵, noch wird erläutert, wie das Konzept der zeitfenstergesteuerten Auftragsabwicklung und eine Bestandsregelung gekoppelt werden können. Zum anderen wird die bedarfs-gesteuerte Planung als Möglichkeit genannt. Hierfür sollen die einzelnen Arbeitsgänge mittels der maximalen Zeitfensterlänge der einzelnen Segmente rückwärts terminiert werden und so die spätesten Endtermine je Arbeitsgang ermittelt und die Arbeitsgänge entsprechend in die Segmente eingeplant werden. Der Autor gibt keinen Hinweis, wie die maximale Zeitfensterlänge zu berechnen sei, lässt aber nicht unerwähnt, dass es durch die Rückwärtsterminierung über mehrere Stufen mit maximaler Zeitfensterlänge zu hohen Liegezeiten kommt. Den sich daraus ergebenden Konsequenzen, hohe Bestände und Terminabweichungen, begegnet der Autor mit der Feststellung, dass sich das entwickelte

⁶⁵ Diese habe in Anlehnung an Erfahrungswerte bzw. die anfangs festgelegte maximale Durchlaufzeit zu erfolgen (BARRHO 2001, S. 84).

Konzept nicht für komplexe Produktionsabläufe eigne. Sinnvoll sei die zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung vielmehr für Produkte mit wenigen Segmentübergängen.

KLINKEL (KLINKEL 2004) entwickelt einen Ansatz zur multikriteriellen **Feinplanung in teilautonomen Produktionsbereichen**, basierend auf den durch die Nutzung von Zeitfenstern entstehenden Handlungsspielräumen. Die Bezeichnung multikriteriell wählt die Autorin, da bei der Ermittlung der Bearbeitungsreihenfolge mehrere Kriterien⁶⁶ berücksichtigt werden (KLINKEL 2004, S. 67). Zur Ausgestaltung der Zeitfenster gibt die Autorin keine Hinweise, ebenso wenig zur Koordination mehrerer Segmente. Vielmehr wird implizit von einer Komplettbearbeitung innerhalb eines Produktionsbereiches ausgegangen. Allein die Aussage im Anwendungsbeispiel – gezeigt wird die Feinplanung einer einzelnen Druckmaschine zur Herstellung von Dekorpapier –, dass „für die Feinplanung [...] die Aufträge durch die manuelle Angabe des zu betrachtenden Zeitraums ausgewählt“ werden (KLINKEL 2004, S. 96), lässt darauf schließen, dass die Länge des Zeitfensters beliebig festgelegt wird.

Für Werkstattfertiger, deren Produkte nach Kundenspezifikation auftragspezifisch hergestellt werden, schlagen BORNHÄUSER ET AL. (BORNHÄUSER ET AL. 2005) mit der **Taktorientierten Fertigungssteuerung** eine weitere zeitfensterbasierte Fertigungssteuerung vor. Für diese zumeist kleinen bis mittelständischen Unternehmen sei die Organisation nach dem Verrichtungsprinzip oftmals am wirtschaftlichsten (BORNHÄUSER ET AL. 2005, S. 396). Die Segmentierung der Produktion nach dem Verrichtungsprinzip in so genannte Fertigungsinseln, welche Arbeitsplätze und Ressourcen umfassen, die ähnliche Prozesse an ähnlichen Baugruppen durchführen, sei somit Grundlage des Verfahrens (BORNHÄUSER ET AL. 2005, S. 398).

Dazu wird der Taktgedanke aus der Fließfertigung auf die Werkstattfertigung übertragen, indem jeder Fertigungsinsel eine feste Taktdauer zugewiesen wird, innerhalb derer ein zentral festgelegter Arbeitsvorrat abgearbeitet werden muss. Alle Fertigungsaufträge durchlaufen eine Fertigungsinsel dabei mit derselben fixen Durchlaufzeit, der Taktdauer, innerhalb derer sich die Fertigungsinsel lokal optimieren kann. Der entsprechende Arbeitsvorrat wird der Fertigungsinsel am

⁶⁶ In ihrem Anwendungsbeispiel, der Herstellung von Dekorpapier, nennt die Autorin beispielhaft Farbe, Dekor und Breite des Papiers.

4 Zeitfensterbasierte Planungssysteme – Stand der Forschung

Anfang eines Taktes bereitgestellt und muss bis zum Taktende abgearbeitet werden.

Die übergeordnete, zentrale Produktionsplanung gibt je Takt und Segment den Arbeitsvorrat vor und umfasst dabei die Aufgaben der zentralen Terminplanung, des zentralen Kapazitätsabgleichs und der zentralen Reihenfolgeplanung. In der zentralen Terminplanung werden, basierend auf dem Kundenwunschtermin, zunächst zentral für jeden Prozessschritt Anfangs- und Endtermine (Taktbeginn und -ende) ermittelt.

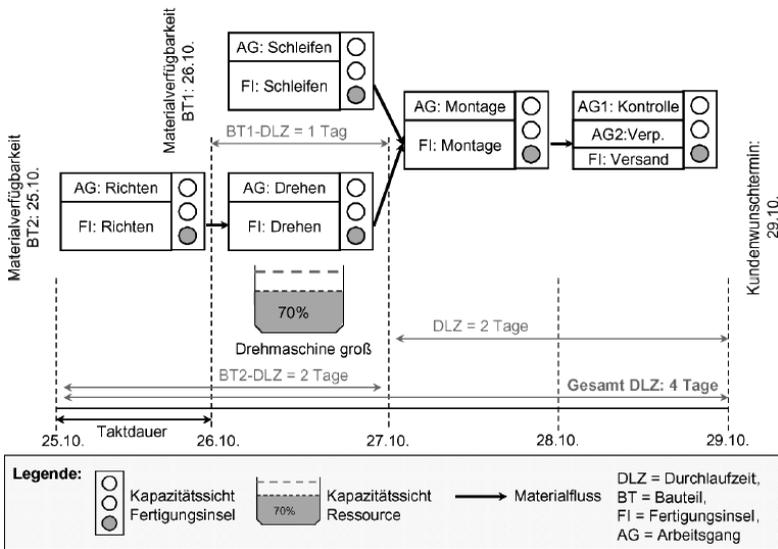


Abbildung 4.7: Durchlaufterminierung und Kapazitätsabgleich aus Auftrags-, Fertigungsinsel- und Ressourcensicht (BORNHÄUSER ET AL. 2005, S. 399)

Während des zentralen Kapazitätsabgleichs ermittelt der Planer je Ressource und Planungsperiode Kapazitätsangebot und -nachfrage (siehe Abbildung 4.7). Ein Kapazitätsabgleich, z.B. durch Vorziehen des Auftragsnetzes als Ganzes oder durch Splitting von Fertigungsaufträgen, ist nötig, wenn ein Fertigungsauftrag nicht mit ausreichenden Kapazitäten eingeplant werden kann. Auch die Erhöhung des Kapazitätsangebotes ist möglich und kann sowohl zentral, z.B. durch Priorisierung, Zusatzschichten oder Fremdvergabe, als auch lokal innerhalb einer

Fertigungsinsel, z.B. durch Überstunden oder den Einsatz von Springern, erfolgen.

Können trotz des zentralen Kapazitätsabgleichs und der lokalen Kapazitätsregelung Aufträge bis zu Beginn des nächsten Taktes nicht fertig gestellt werden, erfolgt eine zentrale Reihenfolgeplanung. Die Autoren nennen hierzu drei Optionen: Erstens die "geplante Aufholjagd", bei der Aufträge im Rückstand von den nachfolgenden Inseln vorgezogen werden, zweitens die "Umplanung", d.h. die erneute Durchlaufterminierung und der Kapazitätsabgleich der in Rückstand geratenen Fertigungsaufträge und drittens das Verschieben anderer Fertigungsaufträge⁶⁷.

Die Vorteile des Systems liegen den Autoren zufolge in der Einfachheit der Durchlaufterminierung, der schnellen Ermittlung des Zeitpunkts für die Materialbereitstellung, der schnellen und präzisen Abwicklung von Kundenaufträgen im Vertrieb inklusive einer frühzeitigen Aussage über Lieferzeiten sowie allgemein der Transparenz und der zu erzielenden Planungsgüte. Das Hauptziel des Konzeptes sei eine hohe Termintreue, welche durch die aus den fixen Durchlaufzeiten in den Segmenten resultierenden konstanten Auftragsdurchlaufzeiten gewährleistet sei (BORNHÄUSER ET AL. 2005, S. 403 f.).

Zur Bestimmung der Taktdauer bleiben die Aussagen vage, die Autoren merken hierzu an, dass sich eine "geeignete Taktdauer [...] aus der Analyse des Produktspektrums mit den jeweiligen Vorgabezeiten an den Fertigungsinseln und den -losgrößen" ergäbe (BORNHÄUSER ET AL. 2005, S. 398)⁶⁸. Die Taktdauer kann zwischen den Fertigungsinseln variieren, sollte den Autoren zufolge aber innerhalb einer Fertigung möglichst einheitlich gestaltet werden, da die Einfachheit der Verfahrensregeln und die Gesamtdurchlaufzeit durch eine inhomogene Taktzeitverteilung negativ beeinflusst würden. Daher sei eine homogene Taktzeitver-

⁶⁷ Wie die zentrale Reihenfolgeplanung sich mit den lokalen Freiheitsgraden vereinbaren lässt und wie sich die drei Interventionsoptionen von klassischen Ansätzen in zentralen MRP-Systemen (Terminjäger, Um- oder Neuplanung) unterscheiden, bleibt unbeantwortet. Gerade letzteres ist ein Hauptkritikpunkt in zentralen Systemen.

⁶⁸ Als Beispiele der Taktdauer nennen die Autoren eine Schicht, einen Tag oder eine Woche (BORNHÄUSER ET AL. 2005, S. 399). Für einen konkreten, nicht weiter spezifizierten Fall sei die Einhaltung der geforderten Termintreue bei einer Taktdauer von 2 Schichten je Fertigungsinsel simulativ nachgewiesen worden. Des Weiteren habe die Simulation einen hohen Bedarf an Kapazitätsflexibilität in den Fertigungsinseln aufgezeigt, dem durch Investitionen sowie ein neues Arbeitszeitmodell Rechnung getragen worden sei (BORNHÄUSER ET AL. 2005, S. 404).

teilung anzustreben, so dass sich die Gesamtdurchlaufzeit eines Produkts durch die Fertigung durch die Anzahl der Teilprozesse ergäbe. Von externen Unternehmen erbrachte Teilprozesse seien über feste Wiederbeschaffungszeiten im Planungsprozess zu berücksichtigen.

4.3.2 Vergleich und Bewertung der untersuchten Konzepte

Durch ihre Ausgestaltung ermöglichen zeitfensterbasierte Systeme zum einen eine straffe zentrale und globale Kontrolle des Gesamtprozesses und bieten zum anderen gleichzeitig den dezentralen Zellen die Möglichkeit der lokalen Optimierung im Rahmen der Planungsperiode (STEELE 1998, S. 314). Durch die Periodizität wird die Weitergabe von Entscheidungsbefugnissen an dezentrale Stellen gewährleistet, beschränkt diese Befugnisse aber auch aufgrund der Trennung der Produktionsstufen auf den jeweiligen Bereich (BENDERS & RIEZEBOS 2002, S. 503). Diese Eigenschaft macht sie für die Steuerung von Systemen mit verteilten Entscheidungsbefugnissen, wie z.B. Wertschöpfungsketten, interessant.

Der Einsatz standardisierter Produktionszyklen, in denen sich die Abfolge von Produkten und Maschinen zyklisch wiederholt, bietet diverse Vorteile gegenüber anderen Planungsansätzen. Dazu gehören die Erleichterung der Kommunikation entsprechender Pläne an die ausführenden Stellen und die Konsistenz mit der Just-In-Time Philosophie (LOERCH & MUCKSTADT 1994, S. 851 f.). HALL (HALL 1988, S. 459) nennt als zusätzlichen Vorteil die Möglichkeit zur kontinuierlichen Verbesserung von Produkt und Prozess aufgrund der sich wiederholenden Abläufe.

Einen weiteren entscheidenden Vorteil zyklischer Planungssysteme sehen verschiedene Autoren in der Einfachheit im Betrieb und der sich ergebenden Transparenz (HYER & WEMMERLOV 1982, S. 688; STEELE & MALHOTRA 1997, S. 423; STEELE 1998, S. 311). Durch die Festlegung fixer Planungsperioden wird das dynamisch-stochastische Planungsproblem der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung in ein statisch-deterministisches Planungsproblem überführt (SÜER 1998, S. 345). So ist vor Implementierung des Systems bzw. vor Anschaffung der Maschinen die genaue Abschätzung der benötigten Kapazitäten möglich (STEELE & MALHOTRA 1997, S. 444) und der Engpass ist in einem PBC System leicht zu identifizieren (STEELE ET AL. 1995, S. 15). Auf operativer Ebene steht die Reduktion der Rüstzeiten im Vordergrund (STEELE 1998, S. 315). Zudem sind die Systeme weniger anfällig für Nachfrageschwankungen und Verschiebungen im Produktionsmix (STEELE & MALHOTRA 1997, S. 425). Von positiven Effekten ent-

4.3 Ausgestaltung zeitfensterbasierter Planungssysteme

sprechend gestalteter Systeme auf die Liefertreue berichten STEELE & MALHOTRA (STEELE & MALHOTRA 1997) und YANG & JACOBS (YANG & JACOBS 1992).

Alle in Abschnitt 4.3 untersuchten Konzepte nutzen durch den Einsatz fixer Planungsperioden bzw. Zeitfenster die vorgenannten Vorteile. Allen Ansätzen gemein ist dabei die Wahrung der für zeitfensterbasierte Systeme grundlegenden Prinzipien der Einphasigkeit sowie der einheitlichen Planungsperiodenlänge für alle Produkte in einer Stufe. Die Beachtung dieser beiden Prinzipien ermöglicht, wie in Abschnitt 4.2 ausgeführt, die lokale Optimierung der Wertschöpfungsstufe. Das Prinzip der gleichen Freibabefrequenz in den einzelnen Wertschöpfungsstufen wird zusätzlich in vier der sechs Ansätze gewahrt (vgl. Tabelle 4.1), die somit nach RIEZEBOS (RIEZEBOS 2001, S. 40) als unicycle Systeme bezeichnet werden können.

Legende

- Kriterium erfüllt
- ◐ Kriterium teilweise erfüllt
- Kriterium nicht erfüllt

	Period Batch Control nach BURBIDGE	Time Bucket Approach nach SÜER	3Liter PPS® nach LÖLLMANN & FÄRBER	Zeitfenstergesteuerte Auftrags-einplanung nach BARRHO	Multikriterielle Feinplanung nach KLINKEL	Taktorientierte Fertigungssteuerung nach BORNHÄUSER ET AL.
Single Cycle Ordering (gleiche Freibabefrequenz)	●	●	◐	●	●	◐
Single Phase (Einphasigkeit)	●	●	●	●	●	●
Single Offset Time (identische Planungsperioden)	●	●	●	●	●	●
Zulassen nicht identischer Planungsperioden je Produktionsstufe zur Durchlaufzeitreduktion	○	○	◐	○*	○	◐
Ansätze zur Berechnung der optimalen Planungslänge	○	○	○	○	○	○

* Der Gesamtauftrag wird zentral nach der maximalen Länge der Planungsperiode rückwärts terminiert

Tabelle 4.1: Vergleichende Darstellung der untersuchten zeitfensterbasierten Planungsansätze

Gegen den Einsatz von zeitfensterbasierten Systemen spricht die sich ergebende lange Durchlaufzeit (STEELE 1998, S. 313; STEELE & MALHOTRA 1997, S. 424). Da jede Stufe die gleiche Periodenlänge besitzt und demnach jene Produktions-

4 Zeitfensterbasierte Planungssysteme – Stand der Forschung

stufe mit der längsten Durchlaufzeit die Gesamtdurchlaufzeit determiniert, sind zeitfensterbasierte Systeme nach BENDERS & RIEZEBOS (BENDERS & RIEZEBOS 2002, S. 505) für eine zu große Anzahl von Produktionsstufen nicht geeignet. Wie in Tabelle 4.1 zu sehen, räumen allein LÖLLMANN & FÄRBER (LÖLLMANN & FÄRBER 1998) und BORNHÄUSER ET AL. (BORNHÄUSER ET AL. 2005) die Möglichkeit verschieden großer Planungsperiodenlängen in ihren jeweiligen Ansätzen ein, ohne diese Möglichkeit jedoch genauer zu beschreiben.

Die größte Kritik an zeitfensterbasierten Systemen bzw. der Period Batch Control richtet sich jedoch nicht gegen das Konzept als solches, sondern gegen die mangelnden Vorgaben zur Auslegung eines solchen Systems, vor allem ein Verfahren zur Wahl der optimalen Periodenlänge wird vermisst (GRAVES 1981, S. 662; HYER & WEMMERLOV 1982, S. 688 f.; KAKU & KRAJEWSKI 1995, S. 79; STEELE & MALHOTRA 1997, S. 423). Im Gegensatz zum Betrieb wird die Auslegung entsprechender Systeme als kompliziert beschrieben (STEELE & MALHOTRA 1997, S. 423). Zur Bestimmung der optimalen Periodenlänge fänden sich allein Erfahrungswerte, welche von höchstens einer Woche (BURBIDGE 1988; BURBIDGE 1994; BURBIDGE 1996)⁶⁹ über zwei und vier Wochen bis hin zu sechs Wochen in Extremfällen (NEW 1977) reichen⁷⁰. Keines der vorgestellten Konzepte kann die beschriebene Lücke schließen, bietet doch keines ein Verfahren zur optimalen Auslegung der Planungsperiodenlänge (vgl. Tabelle 4.1).

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass von den in Abschnitt 4.3 untersuchten Konzepten zwar alle durch die Nutzung fester Planungszeitfenster die Vorteile zeitfensterbasierter Systeme aufweisen, aber keines der Konzepte den gravierenden Nachteil der sich durch gleich lange Planungsperioden entlang der Wertschöpfungskette ergebenden langen Durchlaufzeit beheben kann. Es fehlt demnach ein Konzept, das den verschiedenen Wertschöpfungspartnern jeweils optimale und unterschiedlich lange Planungszeitfenster ermöglicht und zugleich die zentrale Grobplanung der Wertschöpfungskette ermöglicht.

Weitere unbeantwortete Fragen, auf die keines der vorgestellten Konzepte eine Antwort gibt, existieren bezüglich der Auswirkungen reihenfolgeabhängiger Rüstvorgänge (STEELE ET AL. 1995, S. 31) und der Auswirkungen von Verände-

⁶⁹ In älteren Veröffentlichungen spricht BURBIDGE (BURBIDGE 1978) noch von vier Wochen.

⁷⁰ ZELENOVIC & TESIC (ZELENOVIC & TESIC 1988, S. 548) berichten in ihrer Studie, die 32 Unternehmen im ehemaligen Jugoslawien umfasste, von Werten für die Länge der Planungsperiode von ein bis zwei Wochen.

rungen im Variantenmix (HYER & WEMMERLOV 1982, S. 688 f.) auf die Effizienz der Wertschöpfungskette.

Zudem stellt keines der Konzepte ein Verfahren zur Bestimmung bzw. Optimierung der Länge der Planungsperioden der einzelnen Wertschöpfungsstufen zur Verfügung. Dieses Manko versuchen die Autoren der im folgenden Abschnitt vorgestellten Arbeiten zu beheben.

4.4 Ansätze zur Bestimmung optimaler Produktionszyklen

4.4.1 Ursprünge der untersuchten Ansätze

Aufgrund der geringen Anzahl von nur zwei Arbeiten zur Auslegung von Planungszeitfenstern in zeitenfensterbasierter Planungssystemem bzw. der Period Batch Control werden in diesem Abschnitt auch Ansätze aus dem Common Cycle Scheduling⁷¹ untersucht. Im Rahmen des Cyclic Scheduling bzw. des Common Cycle Scheduling werden die Losgrößen verschiedener Produkte berechnet, die auf einer gemeinsamen Ressource herzustellen sind, so dass die produzierte Menge eines jeden Produktes ausreicht, um die Nachfrage mindestens für jenen Zeitraum zu decken, in welchem die anderen Produkte auf derselben Ressource produziert werden. Das resultierende Problem bezeichnen EL-NAJDAMI & KLEINDORFER (EL-NAJDAMI & KLEINDORFER 1993, S. 872) als Common Cycle Scheduling Problem (CCSP).

4.4.2 Bestimmung der optimalen Planungsperiodenlänge im Rahmen des Period Batch Control

KAKU & KRAJEWSKI (KAKU & KRAJEWSKI 1995, S. 79) beklagen, dass es keine publizierten Ergebnisse gebe, die Richtlinien für die Auswahl der optimalen Planungsperiode bieten. Um diese Lücke zu schließen, ermitteln sie ein Modell zur Bestimmung der kostenoptimalen Länge einer Planungsperiode. Unter der Annahme, dass die einzelnen Produktionszellen definiert⁷² sind, formulieren die Au-

⁷¹ Übersetzt in etwa Fertigungssteuerung mit einheitlichen Produktionszyklen; zu den Vorteilen einheitlicher Produktionszyklen siehe z.B. HALL 1988

⁷² D.h. die Anzahl der Zellen wurde festgelegt und den Zellen wurden die zu produzierenden Teilefamilien und die entsprechenden Maschinen sowie das benötigte Personal zugeteilt.

toren ein Minimierungsproblem unter Einbeziehung von Lagerhaltungskosten und Kosten für Überstunden⁷³. Die Planungsperioden der einzelnen Fertigungsinseln sind gleich lang und die Gesamtnachfrage ist bekannt. Der Variantenmix ist konstant, so dass in jeder Planungsperiode, unabhängig von der jeweiligen Größe, alle Varianten produziert werden.

Die traditionelle Sichtweise, dass die Anzahl der Stufen und die Zuordnung einzelner Operationen bzw. Maschinen vor Implementierung des Period Batch Control-Verfahrens bereits abgeschlossen seien, wird von RIEZEBOS (RIEZEBOS 2001) in Frage gestellt. Er plädiert für eine simultane Auslegung des Produktions- und des entsprechenden Steuerungssystems. Als Entscheidungsvariable ergibt sich neben der Auslegung der Periodenlänge P die Anzahl der Stufen N , die bislang als gegeben betrachtet wurde. Das Optimierungsproblem lautet demnach nicht mehr, die einheitliche Periodenlänge für eine gegebene Anzahl von Stufen zu finden, bei der die Gesamtkosten am geringsten sind, sondern jene Kombination aus Periodenlänge und Stufenanzahl, die zu einem Kostenminimum führt. Hierzu wird eine Heuristik entwickelt, die iterativ Periodenlänge und Stationsanzahl variiert und optimiert.

Ein weiterer Untersuchungsparameter im Ansatz von RIEZEBOS ist die Bestimmung optimaler Transportlose zwischen Operationen derselben Stufe. Als Restriktion der Lösung dienen die Kapazitätsgrenzen der einzelnen Stationen, für die jedoch nur eine untere Grenze ermittelt wird. Nachfrageschwankungen werden durch Überstunden ausgeglichen, die sich in Form zusätzlicher Kosten auf die Gesamtkostenfunktion und damit auf die Einstellung der Systemparameter auswirken. Anhand eines Simulationsmodells werden die ermittelten Systemparameter getestet. Die Ergebnisse zeigen jedoch hohe Kosten für Überstunden, was den Autor zur Einführung eines Aufschlagfaktors für die minimale Periodenlänge veranlasst. Die mit diesem Aufschlagfaktor ermittelten Systemparameter erweisen sich in der Simulation als besser geeignet und resultieren in geringeren Kosten des Gesamtsystems (RIEZEBOS 2001, S. 198).

⁷³ Die Autoren argumentieren, dass durch die Konfiguration der Zellen deren Kapazität in der Regelarbeitszeit (regular time capacity) festgelegt sei. Die gewählte Länge der Planungsperiode führt darüber hinaus zu Unter- bzw. Überkapazitäten (bezogen auf die reguläre Arbeitszeit) in verschiedenen Planungsperioden. Die Normalkapazität wird demzufolge als „sunk costs“ bezeichnet und im Weiteren werden allein die Kosten für Überstunden betrachtet.

Es bleibt jedoch anzumerken, dass, obwohl mit dieser Arbeit die bis dato wohl detaillierteste Untersuchung zur Parametrisierung von zeitfensterbasierten Planungssystemen vorliegt, der Bedarf und der Variantenmix als konstant angenommen werden. Somit werden wiederum alle Produkte in jedem Zyklus hergestellt und die Rüstkosten je Zyklus sind ebenfalls konstant. Die vorgeschlagenen unteren Grenzen der Länge einer Planungsperiode erweisen sich zudem als wenig brauchbar, was auch im später eingeführten Korrekturfaktor zur Bestimmung der Systemparameter sichtbar wird. Aus der Verwendung identischer Planungsperiodenlängen für die einzelnen Stufen resultieren zudem lange Durchlaufzeiten.

4.4.3 Bestimmung der optimalen Planungsperiodenlänge im Rahmen des Common Cycle Scheduling Problem (CCSP)

Einen Ansatz zur Ermittlung eines kostenoptimalen Produktionszyklus in einer Wertschöpfungsstufe für mehrere Produkte (single-stage, multi-product) mit Hilfe des Wagner-Whitin-Algorithmus präsentieren JAMSHIDI & BROWN (JAMSHIDI & BROWN 1993). Zukünftige Bedarfe werden prognostiziert und der Planungshorizont auf zehn Perioden festgelegt, wobei die Gesamtnachfrage für alle Produkte in den zehn einzuplanenden Perioden als fix und der Nachfrageverlauf der einzelnen Produkte – die Autoren untersuchen insgesamt sechs verschiedene Nachfrageverläufe – als bekannt angenommen wird. Aus den deterministischen Nachfragedaten der Planungsperiode werden nun iterativ die einheitlichen Produktionszyklen für das Produktspektrum ermittelt. Hierzu generiert der Algorithmus zwei Alternativen A und B und vergleicht die resultierenden kumulierten Kosten, bestehend aus Bestands- und Rüstkosten. In Alternative A werden die Kosten ermittelt, die entstehen, wenn Bedarfe der Perioden n bis $n+i$ in der Basisperiode n produziert und anschließend gelagert werden. Alternative B bedeutet, dass die Bedarfe bis zur Periode $n+i-1$ in Periode n produziert werden und der Bedarf der Periode $n+i$ in der Periode $n+i$ produziert wird. Solange die Kosten der Variante A kleiner als jene der Variante B sind, wird die Laufvariable i um eins erhöht und damit der Produktionszyklus verlängert. Die entstehenden Produktionszyklen sind nicht zwangsläufig gleich lang, Kapazitätsrestriktionen werden nicht beachtet, die Rüstkosten sind reihenfolgenunabhängig und je Produkt identisch. Wie sich die Veränderung der Nachfragedaten in der folgenden Periode auswirkt, ob zum Beispiel die Prozedur von Anfang an noch einmal durchlaufen wird, wird nicht dargestellt.

RACHAMADUGU & TU (RACHAMADUGU & TU 1997) entwickeln, aufbauend auf den Arbeiten von JAMSHIDI & BROWN (JAMSHIDI & BROWN 1993), einen verbesserten Algorithmus zur Festlegung einheitlicher, kostenoptimaler Produktionszyklen für eine Wertschöpfungsstufe mit verschiedenen Produkten (single-stage, multi-product). Die getroffenen Annahmen und Restriktionen sowie die untersuchten Nachfrageverläufe und Kostenstrukturen werden von JAMSHIDI & BROWN übernommen. Der entwickelte Algorithmus liefert im Vergleich zu dem von JAMSHIDI & BROWN vorgestellten für geringe bis mittlere Rüstkosten identische Ergebnisse, nur für hohe Rüstkosten sind die entstehenden Gesamtkosten geringer.

Für das Problem, verschiedene Produkte mit statischem Bedarf über einen endlichen Planungshorizont auf verschiedenen Maschinen einer Produktionstufe einzuplanen (single-stage, multi-product), bedienen sich OUENNICHE & BOCTOR (OUENNICHE & BOCTOR 1998) ebenfalls des Ansatzes einheitlicher Planungszyklen für alle Produkte. Ziel ist die Ermittlung der kostenoptimalen⁷⁴ Länge eines Planungszyklus bzw. die kostenoptimale ganzzahlige Unterteilung des Planungshorizontes in gleichlange Planungszyklen. Ein Planungszyklus umfasst dabei immer die gleiche Stückzahl und die gleiche Reihenfolge. Die mathematische Formulierung macht restriktive Annahmen notwendig (OUENNICHE & BOCTOR 1998, S. 1127). So sind die Nachfrage und die Bearbeitungs- und Rüstzeiten deterministisch und über den gesamten Planungshorizont konstant. Rüstvorgänge und -kosten sind unabhängig von der Reihenfolge und der Losgröße. Die Weitergabe von Teilmengen ist nicht zulässig. Neben der exakten Formulierung als Minimierungsproblem entwickeln die Autoren auch zwei Heuristiken, basierend auf der Simulated Annealing Methode sowie dem Tabu Search Algorithmus. Eine Bewertung der Ansätze erfolgt nur als Vergleich der Leistungsfähigkeit der zwei Heuristiken (Rechnerzeit und erzielte Ergebnisse im Vergleich zur Lösung der exakten Formulierung des Minimierungsproblems). Die Auswirkungen verschiedener Längen der Planungsperioden auf Bestände und Rüstaufwand werden dagegen nicht dargestellt.

Für die drei vorgenannten Ansätze gilt, dass jeweils nur eine Stufe betrachtet wird. Damit die vorgestellten Algorithmen eine Lösung des Problems ermöglichen, muss dieses stark vereinfacht werden. So wird die Nachfrage als determi-

⁷⁴ Betrachtet werden Rüst- und Bestandskosten, letztere für Material in Bearbeitung (WIP) und Fertigbestände.

nistisch und der Variantenmix wird über die Perioden hinweg als Konstant angenommen. Zudem werden Kapazitätsrestriktionen nicht betrachtet und identische Prozesszeiten und Rüstzeiten für alle Produkte angesetzt. Die Rüstkosten sind demnach unabhängig von der gewählten Produktionsreihenfolge. Ungeklärt bleibt darüber hinaus, was passiert, wenn mit fortschreitender Zeit weitere Perioden in den Fokus rücken, ob zum Beispiel eine Neuplanung stattfindet und die Prozedur von Anfang an noch einmal durchlaufen wird. Zusammenfassend stellen beide Arbeiten damit eher ein Ansatz zur Ermittlung von Losgrößen dar.

Die Annahme einer konstanten Nachfrage und eines konstanten Variantenmixes ist nach LOERCH & MUCKSTADT typisch für Ansätze des Cyclic Scheduling (LOERCH & MUCKSTADT 1994, S. 852). Da diese Annahme in der Realität nicht oder nur selten zuträfe, müsse, um die Einhaltung der berechneten Planungszyklen im Fall von Störungen zu gewährleisten, kurzfristig zusätzliche Kapazität bereitgestellt werden. Die Autoren formulieren daher ein Minimierungsproblem mit dem Ziel, die Produktionskapazität kostenminimal temporär, d.h. durch Überstunden, Fremdvergabe bzw. den Zukauf von Teilen, zu erweitern, um Endtermine einhalten zu können. Das Modell umfasst eine Wertschöpfungsstufe für mehrere Produkte (single-stage, multi-product). Das zweistufige Vorgehen sieht im ersten Schritt den Einsatz eines Algorithmus zur Ermittlung des Fertigstellungszeitpunktes (S_d) eines bestimmten Produktes im Zyklus vor. Liegt S_d nach dem jeweiligen Liefertermin, so wird in einem zweiten Schritt ein Algorithmus verwendet, der den Einsatz von Überstunden oder den Zukauf von Teilen überprüft, um die gesetzten Liefertermine dennoch und kostenminimal zu realisieren. Der Fokus der Autoren liegt auf der Leistungsfähigkeit des entwickelten Algorithmus.

Zur Auslegung kostenoptimaler einheitlicher Produktionszyklen für die mehrstufige Fertigung mehrerer Produkte (multi-stage, multi-product) formulieren EL-NAJDAWI & KLEINDORFER (EL-NAJDAWI & KLEINDORFER 1993) aufbauend auf der Arbeit von SZENDROVITS (SZENDROVITS 1975) ein Minimierungsproblem. Die Besonderheit des Ansatzes ist neben der Betrachtung von Kapazitätsrestriktionen und des Zulassens von Überlappungen der einzelnen Operationen die detaillierte Modellierung der Wertsteigerung im Zuge der Produktion⁷⁵. Die Gesamtkosten ergeben sich wie folgt (EL-NAJDAWI & KLEINDORFER 1993, S. 876):

⁷⁵ Im Gegensatz zu vielen anderen Arbeiten werden die Bestandskosten nicht mittels eines fixen Produktwertes berechnet, sondern dieser steigt im Verlaufe des Produktionsprozesses.

$$TC = \sum_{i=1}^n \left\{ [\alpha V(i, m) * D_i * T / 2] + (S_i / T) \right. \\ \left. + \alpha \sum_{j=1}^m [V(i, j - 1) * D_i * (W(i, j) - F(i, j - 1))] \right. \\ \left. + \alpha \sum_{j=1}^m [V(i, j) * D_i * (F(i, j) - W(i, j))] \right\} \quad (2)$$

D_i	täglicher Bedarf (Demand) für Produkt i
$F(i, j)$	Fertigstellungszeitpunkt für Auftrag i auf Maschine j
m	Anzahl der Operationen
S_i	Rüstkosten (Setup Costs) für Produkt i auf allen Maschinen
T	Zykluszeit in Tagen
TC	Gesamtkosten (Total Costs)
$V(i, j)$	kumulierte Wertsteigerung (Value Added) je Produkt i bis zur Operation j
$W(i, j)$	Startzeitpunkt für Auftrag i auf Maschine j
α	Lagerhaltungskostenparameter

Ziel ist es, einen zulässigen, einheitlichen Produktionszyklus T zu finden, welcher die Gesamtkosten TC minimiert. Die Nachfrage wird dabei als bekannt vorausgesetzt und die Rüstkosten sind reihenfolgeunabhängig. Zudem wird jede Variante in jeder Planungsperiode unabhängig von deren Länge produziert.

4.4.4 Gegenüberstellung der untersuchten Ansätze zur Bestimmung optimaler Produktionszyklen

Die vorgestellten Ansätze zur Bestimmung optimaler Produktionszyklen sind in Tabelle 4.2 gegenübergestellt. Die Bewertung der Ansätze erfolgt dabei nach folgenden Kriterien:

- Bietet der Ansatz die Möglichkeit zur gesamthafter Auslegung einer Wertschöpfungskette, indem simultan die Periodenlänge für verschiedenen Planungsstufen untersucht wird?
- Sieht der Ansatz vor, durch die Einführung uneinheitlicher Periodenlängen das Manko langer Gesamtdurchlaufzeiten zeitfensterbasierter Planungssysteme zu beheben?
- Sind die Annahmen bezüglich Nachfrage und Variantenmix restriktiv oder werden Variationen in Nachfrage und Variantenmix zugelassen?

4.4 Ansätze zur Bestimmung optimaler Produktionszyklen

- Erlauben die Ansätze Rückschlüsse über die Effizienz der Wertschöpfungskette bei reihenfolgeabhängigen Rüstvorgängen?

Legende							
● Kriterium erfüllt							
◐ Kriterium teilweise erfüllt							
○ Kriterium nicht erfüllt							
	KAKU & KRAJEWSKI 1995	RIEZEBOS 2001	JAMSHIDI & BROWN 1993	RACHAMADUGU & TU 1997	OUENNICHE & BOCTOR 1998	LOERCH & MUCKSTADT 1994	EL-NAJDAWI & KLEINDORFER 1993
Ermittlung optimaler Periodenlängen für mehrere Wertschöpfungsstufen	●	●	○	○	○	○	●
Variable Periodenlängen für verschiedene Wertschöpfungsstufen	○	○	○	○	○	○	○
Nicht deterministische Nachfrageverläufe	●	●	○	○	○	●	○
Variabler Variantenmix (Nullbedarfe zulässig)	○	○	○	○	○	○	○
Betrachtung reihenfolgeabhängiger Rüstvorgänge	○	○	○	○	○	○	○

Tabelle 4.2: *Vergleichende Darstellung der untersuchten Ansätze zur Bestimmung optimaler Produktionszyklen*

Wie in Tabelle 4.2 zu sehen, ermöglichen nur die Ansätze von KAKU & KRAJEWSKI (KAKU & KRAJEWSKI 1995), RIEZEBOS (RIEZEBOS 2001) und EL-NAJDAWI & KLEINDORFER (EL-NAJDAWI & KLEINDORFER 1993) überhaupt die simultane Optimierung von Planungsperioden für mehrere Wertschöpfungsstufen. Keine der Arbeiten sieht uneinheitliche Planungsperiodenlängen für verschiedene Stufen der Wertschöpfungskette zur Reduzierung der Gesamtdurchlaufzeit vor. Die Kritik von LOERCH & MUCKSTADT (LOERCH & MUCKSTADT 1994, S. 852), dass die Ansätze des Cyclic Scheduling in Menge und Mix konstante Nachfrageverläufe voraussetzen, trifft für die untersuchten Arbeiten zum Cyclic Scheduling von JAMSHIDI & BROWN (JAMSHIDI & BROWN 1993), RACHAMADUGU & TU (RACHAMADUGU & TU 1997), OUENNICHE & BOCTOR (OUENNICHE & BOCTOR 1998) und EL-NAJDAWI & KLEINDORFER (EL-NAJDAWI & KLEINDORFER 1993) zu. Aber auch LOERCH & MUCKSTADT selber sowie KAKU & KRAJEWSKI sowie RIEZEBOS nehmen einen konstanten Variantenmix unabhängig von der Länge der Planungsperiode an, die Rüstkosten je Planungsperiode sind somit in allen Ansätzen deterministisch und konstant. Somit ist klar,

dass reihenfolgeabhängige Rüstvorgänge in keiner der vorgestellten Arbeiten untersucht werden.

4.5 Kritische Würdigung der beschriebenen Arbeiten

Den in Abschnitt 4.3 vorgestellten konzeptionellen Arbeiten ist gemein, dass keine das Potenzial zur Reduzierung der Gesamtdurchlaufzeit nutzt, welches sich aus dem Einsatz uneinheitlicher, also verschieden langer, Planungsperioden für die einzelnen Wertschöpfungsstufen ergibt. Des Weiteren bietet keiner der Ansätze ein Verfahren zur Auslegung bzw. Optimierung der Planungsperiodenlänge der an der Wertschöpfung beteiligten Stufen.

Mit den in Abschnitt 4.4 zitierten Arbeiten versuchen verschiedene Autoren diese Lücke zu schließen und formulieren Minimierungsprobleme in Abhängigkeit der Planungsperiodenlänge. Dabei dienen die Gesamtkosten, i. d. R. als Summe aus Bestands- und Rüstkosten, als Optimierungsgröße. Die getroffenen Annahmen sind hierbei jedoch sehr restriktiv. So setzen alle Autoren voraus, dass der Variantenmix und damit Art und Anzahl der je Periode zu produzierenden Varianten konstant ist. Dies bedeutet auch, dass eine Reihenfolgeoptimierung innerhalb einer Produktionsstufe nicht relevant ist, da, selbst wenn die Rüstkosten reihenfolgeunabhängig sind, immer die gleiche optimale Produktionsreihenfolge genutzt wird. Des Weiteren wird für alle Stufen, sofern der Ansatz überhaupt die simultane Betrachtung mehrerer Stufen erlaubt, die gleiche Planungsperiodenlänge angenommen. Dies vereinfacht die Problemformulierung, führt jedoch dazu, dass die gesamte Produktionskette nach dem Engpassprozess ausgelegt wird und somit die Durchlaufzeit unnötig verlängert wird.

Die Einschränkung auf einheitliche Periodenlängen stellt ein erhebliches Manko bisheriger Konzepte dar, führt sie doch zu unnötig langen Durchlaufzeiten. Existierende Verfahren zur Berechnung der Länge der Planungsperioden folgen dieser Beschränkung und sind daher für die Auslegung von Systemen mit je nach Stufe variierenden Planungszeitfenstern ungeeignet. Des Weiteren sind die getroffenen Annahmen, der konstante Prodktmix und die de facto reihenfolgeunabhängigen Rüstvorgänge, im industriellen Umfeld nicht haltbar. Diese Defizite bestehender Ansätze werden mit dem im folgenden Kapitel beschriebenen Konzept eines zeitfensterbasierten Planungssystems mit uneinheitlichen Planungsperioden beseitigt.

5 Zeitfensterbasiertes Planungssystem mit uneinheitlichen Planungsperiodenlängen

5.1 Allgemeines

Um die in Abschnitt 4.5 beschriebenen Defizite bestehender Konzepte zeitfensterbasierter Planungssysteme und untersuchter Ansätze zur Ermittlung der optimalen Planungsperiodenlänge zu beseitigen, wird in diesem Kapitel ein zeitfensterbasiertes Planungssystem mit uneinheitlichen Planungsperiodenlängen sowie ein entsprechender Ansatz zur Berechnung der sich aus der Wahl der Planungsperiodenlänge ergebenden logistischen Kenngrößen vorgestellt. Für die Berechnung der Wirkzusammenhänge zwischen Planungsperiodenlänge und den Kenngrößen Durchlaufzeit, Bestand, Auslastung und Termintreue werden Schwankungen der Nachfrage und des Variantenmixes sowie reihenfolgeabhängige Rüstzeiten untersucht.

In Abschnitt 5.2 werden zunächst der Systemaufbau und die zugrundeliegenden Annahmen dargestellt. Je nach Ausprägung des Nachfrageverlaufs, des Variantenmixes sowie der Rüstzeiten sind drei Fälle zu unterscheiden, die im weiteren Verlauf der Arbeit differenziert betrachtet werden.

Die Verwendung uneinheitlicher Planungsperiodenlängen erfordert die Einführung eines Startverzuges tv_j für einzelne Stufen j der Wertschöpfungskette. Diese Notwendigkeit sowie die Gleichungen zur Berechnung des Startverzuges tv werden in Abschnitt 5.3 hergeleitet.

Die Auswirkungen der Länge der Planungsperioden auf die logistischen Kenngrößen Durchlaufzeit, Bestand, Auslastung und Termintreue werden in den Abschnitten 5.4 bis 5.7 untersucht. Das Kapitel schließt mit Abschnitt 5.8, einer Zusammenfassung der Ergebnisse.

5.2 Systemaufbau und Annahmen

5.2.1 Aufbau der modellierten Wertschöpfungskette

Die betrachteten Wertschöpfungsketten bestehen aus m Gliedern beziehungsweise Stufen, welche gemeinsam einen OEM (Original Equipment Manufacturer) beliefern (vgl. Abbildung 5.1). Jedem der beteiligten Unternehmen j steht eine Planungsperiode der Länge T_j zur Verfügung, innerhalb derer intern frei optimiert werden kann. Die Konfiguration der Planungszeitfenster erfolgt zentral, die Länge der Planungsperiode kann zwischen den einzelnen Stufen der Kette jedoch variieren.

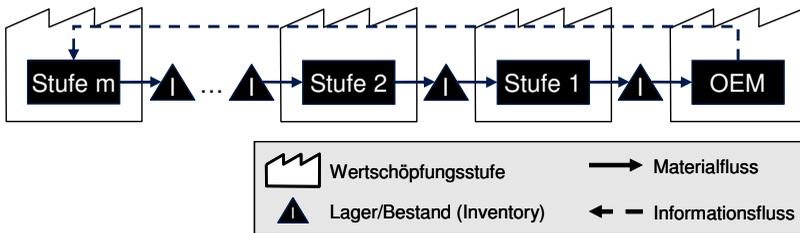


Abbildung 5.1: Grundkonfiguration der betrachteten Wertschöpfungsketten

5.2.2 Planung und Steuerung der Wertschöpfungskette

Die Planung der Wertschöpfungskette ist hierarchisch aufgebaut und unterteilt sich in eine zentrale Grobplanung und eine dezentrale Feinplanung in den Stufen der Lieferkette. Die Grobplanung erfolgt für die Lieferkette zentral, z.B. durch den OEM. Ausgehend vom Kundenwunschtermin werden die einzelnen Aufträge zentral in das vorgegebene grobe Zeitraster eingelastet. Das Raster entspricht dabei den für die Kette einheitlich festgelegten Standardzeiteinheiten⁷⁶ (Stunden, Schichten, Tage etc.) und umfasst mindestens den Zeitraum, der der maximalen Auftragsdurchlaufzeit entspricht. Die Zeitspanne, für die gesicherte Informatio-

⁷⁶ Eine Option besteht darin, das Zeitraster immer weiter zu verfeinern, je näher ein Ereignis rückt. So können z.B. Aufträge, die in 10 Tagen zur Auslieferung anstehen, zunächst in Mehr-Tages-Fenstern eingelastet werden, um dann, entsprechend der Bandbelegung des OEM, mit näher rückendem Auslieferungstermin in Tages- und Stundenfenster fixiert zu werden. Entscheidend hierbei ist jedoch, dass die gewählte Detaillierung den gewährten Planungsfreiräumen der jeweiligen Kettenglieder entspricht.

nen über zukünftige Aufträge vorliegen, sei als Planungshorizont H der Wertschöpfungskette bezeichnet.

Die Informationen zu den zentral eingelasteten Aufträgen werden im Rhythmus der Standardzeiteinheit aktualisiert und an die Beteiligten übermittelt. Entsprechend der Konfiguration der Planungsperioden entlang der Kette kann jede Stufe aus dem Auftragsstrom die relevanten Aufträge für die entsprechende Periode identifizieren. Die Feinplanung und -steuerung erfolgt dezentral in den einzelnen Unternehmen. Die entsprechende Planungsperiode T_j bestimmt den Planungsfreiraum der jeweiligen Stufe j .

5.2.3 Kapazität der einzelnen Stufen der Wertschöpfungskette

Generell kann unterschieden werden, ob eine Stufe als eine Maschine behandelt wird oder ob mehrere Maschinen innerhalb einer Stufe zulässig sind, und falls ja, ob eine feste Bearbeitungsreihenfolge besteht, ob eine Splitting von Losen zulässig ist oder nicht und ob paralleles Rüsten der Maschinen möglich ist oder nicht. In der vorliegenden Arbeit werden folgende Annahmen getroffen:

- In einer Stufe der Wertschöpfungskette besteht eine optimale Sequenz, in welcher die Aufträge abgearbeitet werden. Diese ist abhängig vom zu produzierenden Auftragsmix und kann somit von Planungszyklus zu Planungszyklus wechseln. Es sei festgelegt, dass diese Auftragsreihenfolge von nur einer Anlage bzw. Maschine der jeweiligen Stufe determiniert wird. Ist dies nicht der Fall und es existieren unterschiedliche optimale Auftragsreihenfolgen für zwei oder mehrere Anlagen derselben Stufe, so sind die Anlagen für die Planung zu trennen und als zwei oder mehrere Stufen getrennt zu beplanen.
- Es existiert in jeder Stufe ein dedizierter Engpass b_j , der nicht von der Auftragslosgröße abhängt. Es gilt demnach, dass die Bearbeitungszeit an der Engpassmaschine tp_b und die Rüstzeit an der Engpassmaschine ts_b jeweils größer oder gleich der Bearbeitungs- bzw. Rüstzeit tp_a und ts_a auf allen anderen Anlagen a_j der jeweiligen Wertschöpfungsstufe sind⁷⁷.

⁷⁷ Sei tp_1 die Bearbeitungszeit je Stück auf Maschine 1 und ts_1 die Rüstzeit auf Maschine 1 und sei weiter $tp_1 \geq tp_2$ und $ts_1 \leq ts_2$, dann würde in Abhängigkeit der in einer Periode zu produzierenden Menge der Engpass entweder die Maschine 1 oder die Maschine 2 sein. Daher muss gelten: $tp_b \geq tp_a \wedge ts_b \geq ts_a \forall a$.

5 Zeitfensterbasiertes Planungssystem mit uneinheitlichen Planungsperiodenlängen

- Die Reihenfolge der einzelnen Operationen auf den einzelnen Maschinen ist fix und für alle Varianten gleich, die jeweilige Operationszeit je Variante ebenfalls.
- Maschinen können, falls nötig, gerüstet werden, solange andere Maschinen arbeiten. Innerhalb einer Stufe erfolgt die Weitergabe im Einzelstückfluss (one-piece-flow).

5.2.4 Nachfrageverläufe

Die Nachfrage D (Demand) kann charakterisiert werden über Menge und Verlauf. Zu unterscheiden sind konstante und nicht konstante Nachfrageverläufe. Des Weiteren ist zu differenzieren, ob Nullwerte bei der Nachfrage in bestimmten Perioden zulässig sind oder nicht. Beispielhaft sind drei verschiedenen Nachfrageverläufe in Abbildung 5.2 dargestellt.

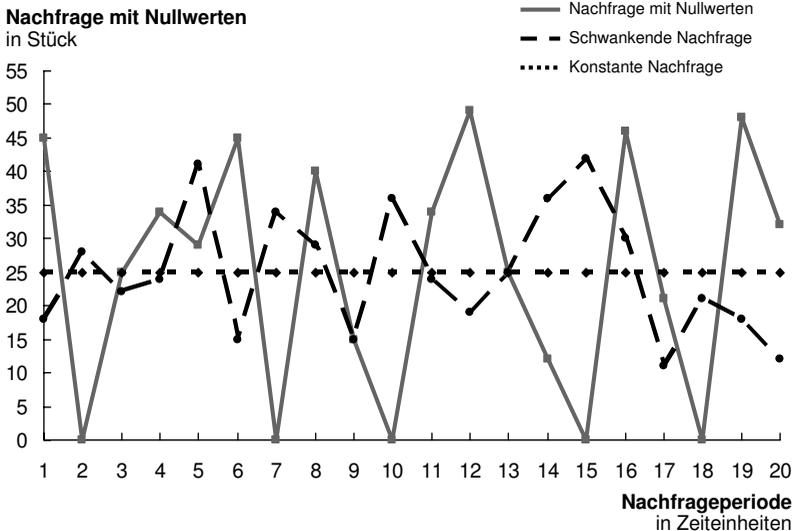


Abbildung 5.2: Im Rahmen der Arbeit betrachtete Nachfrageverläufe

Im Gegensatz zu vielen der in Kapitel 4 vorgestellten Arbeiten sollen schwankende Nachfrageverläufe mit Nullwerten für die einzelnen Varianten, z.B. für so genannte Exoten im Variantenspektrum, untersucht werden. Der Variantenmix kann sich also von Planungsperiode zu Planungsperiode verändern.

5.2.5 Rüstzeiten

Im Allgemeinen kann zwischen sequenzabhängigen und sequenzunabhängigen Rüstzeiten unterschieden werden. Für letztere ist der Ausgangsrüstzustand der Maschinen bzw. Anlagen für die Dauer bzw. die Kosten des Rüstvorgangs unerheblich. Unabhängig von der zuvor produzierten Variante fallen für jeden Rüstvorgang immer die entsprechenden Kosten bzw. Zeiten an, die jedoch von Variante zu Variante auch variieren können.

Für den Fall sequenzabhängiger Rüstzeiten hingegen ist der Rüstzustand der Maschine vor dem Umrüsten von Bedeutung, da die für den Rüstvorgang benötigten Zeiten bzw. die bei einem Rüstvorgang entstehenden Kosten von der zuvor auf dieser Maschine produzierten Variante abhängen. Die Darstellung der Rüstzeiten erfolgt in der Regel in Form einer Rüstmatrix.

5.2.6 Untersuchte Fälle

Aus den in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen möglichen Ausprägungen der Nachfrageverläufe, der Variabilität des Variantenmixes sowie sequenzabhängigen und -unabhängigen Rüstzeiten lassen sich acht verschiedene Kombinationen bilden, vgl. Tabelle 5.1.

Kombination	Variantenmix	Rüstzeiten	Nachfrage	Fall	
1	konstant	sequenzunabhängig	konstant	A	
2			nicht konstant	A	
3			sequenzabhängig	konstant	A
4			nicht konstant	A	
5	nicht konstant	sequenzunabhängig	konstant	B	
6			nicht konstant	B	
7			sequenzabhängig	konstant	C
8			nicht konstant	C	

Tabelle 5.1: Mögliche Ausprägungen von Nachfrageverlauf, Variantenmix und Rüstzeiten sowie die aus deren Kombination resultierenden Fälle

Kombination 1 ist die in der Literatur am häufigsten untersuchte Ausprägung, da die resultierenden mathematischen Formulierungen die Anwendung bekannter Heuristiken ermöglichen. Nachdem der Variantenmix in den Kombinationen 2 bis 4 ebenfalls konstant ist, verliert das Kriterium der sequenzabhängigen bzw. -unabhängigen Rüstzeiten für diese Kombinationen an Relevanz. Da in jeder

5 Zeitfensterbasiertes Planungssystem mit uneinheitlichen Planungsperiodenlängen

Planungsperiode jede Variante hergestellt wird, kann immer in derselben (optimalen) Sequenz produziert werden. Die Kombinationen 1 bis 4 werden im weiteren Verlauf der Arbeit als Fall A bzw. Basisfall bezeichnet. Die Fälle B und C unterscheiden sich vom Basisfall durch die Variabilität des Variantenmixes und untereinander durch die Ausrägung der Rüstzeiten. Im Weiteren werden diese drei Fälle gesondert betrachtet.

5.3 Startverzug bei uneinheitlichen Planungsperiodenlängen

Im Gegensatz zu Planungssystemen mit einheitlicher Länge der Planungsperiode für die verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette, in denen die Aufträge mit der gleichen Frequenz für die verschiedenen Produktionsstufen freigegeben werden (Single Cycle Ordering bzw. gleiche Freibabefrequenz, vgl. Abschnitt 4.2), unterscheiden sich in einem System mit uneinheitlichen Planungsperioden die Freibabefrequenzen der einzelnen Stufen (Multi Cycle Ordering). Damit wird die Einführung des Startverzugs t_v notwendig, dessen Bestimmungsgleichung im Folgenden hergeleitet wird.

Um eine unterbrechungsfreie Produktion in der gesamten Wertschöpfungskette sicherzustellen, muss zu jeder Zeit gewährleistet sein, dass die produzierte Menge A_j (Abgangsmenge) der Stufe j zum Zeitpunkt t größer oder gleich der abgerufenen Menge Z_{j-1} (Zugangsmenge) der Stufe $j-1$ ist.

$$A_j(t) \geq Z_{j-1}(t) \quad \forall t \quad (3)$$

$A_j(t)$: Nachgefragte Menge der Stufe j zum Zeitpunkt t

$Z_j(t)$: Produzierte Menge der Stufe j zum Zeitpunkt t

$A_j(t)$ und $Z_{j-1}(t)$ können dabei als Abgangs- bzw. Zugangskurven angesehen werden, die sich berühren, aber nicht schneiden dürfen. Beide Kurven sind Treppenfunktionen, die sich alle T_j um die Produktionslosgröße l_j erhöhen, wobei für l_j der in Gleichung (1) beschriebene Zusammenhang gilt.

Sind, wie in den in Kapitel 4 beschriebenen Systemen, die Planungsperioden entlang der Kette gleich lang, also $T_j = T$, so gilt $l_j = l$. Daraus folgt, dass die Abgangskurve der Stufe $j+1$ gleich der Zugangskurve der Stufe j ist und demnach Gleichung (3) für alle t erfüllt ist. Die einzelnen Planungsperioden können nahtlos aneinandergereiht werden, wobei das Ende einer Planungsperiode der Stufe j zugleich der Anfang der nächsten Planungsperiode der Stufe $j-1$ ist. Abbildung 5.3 zeigt diesen Zusammenhang.

5.3 Startverzug bei uneinheitlichen Planungsperiodenlängen

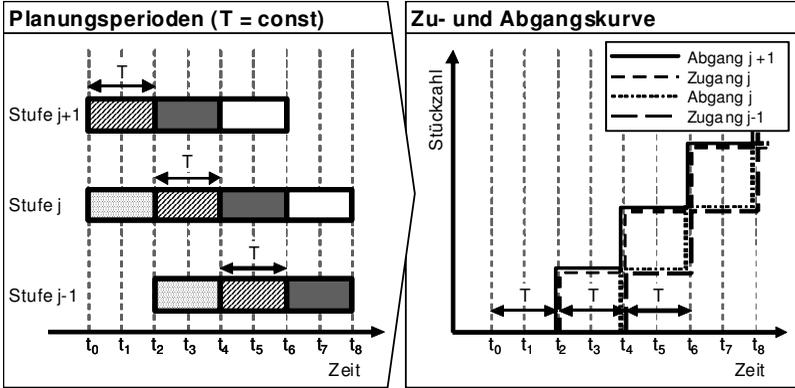


Abbildung 5.3: Zu- und Abgangskurve bei einheitlicher Planungsperiodenlänge

Sind die Planungsperioden T_j je Stufe j der Supply Chain unterschiedlich lang, ist das nahtlose Aneinanderreihen von Planungsperioden nicht möglich. Vielmehr sind zwischen dem Ende der Planungsperiode der Stufe $j+1$ und dem Beginn der Planungsperiode der Stufe j Übergangszeiten vorzusehen, um zu gewährleisten, dass die nachgefragte Menge der nachfolgenden Stufe zu keinem Zeitpunkt das Angebot der vorgelagerten Stufe übersteigt. Dies wird in der Systemgestaltung mittels des Startverzugs tv erreicht (vgl. Abbildung 5.4).

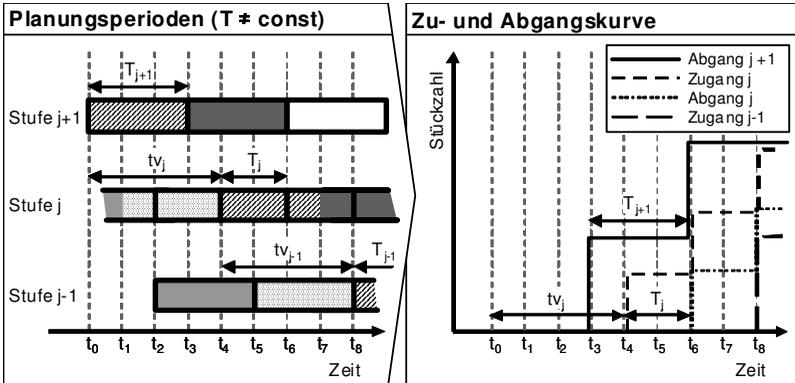


Abbildung 5.4: Zu- und Abgangskurve bei uneinheitlicher Planungsperiodenlänge

Für verschiedene Planungsperiodenlängen T_j entlang der Wertschöpfungskette gilt für die Abgangs- bzw. die Zugangskurve $A_j(t)$ und $Z_{j-1}(t)$:

5 Zeitfensterbasiertes Planungssystem mit uneinheitlichen Planungsperiodenlängen

$$A_j(t) = u(t) * T_j * d \quad (4)$$

$$Z_{j-1}(t) = s(t) * T_{j-1} * d \quad (5)$$

$A_j(t)$: Nachgefragte Menge der Stufe j zum Zeitpunkt t

d : Bedarf je Standardzeiteinheit

T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit

$u(t)$: Treppenfunktion der Abgangskurve

$s(t)$: Treppenfunktion der Zugangskurve

$Z_j(t)$: Produzierte Menge der Stufe j zum Zeitpunkt t

Sei $\left\lfloor \frac{a}{b} \right\rfloor$ der ganzzahlige Teil des Bruchs $\frac{a}{b}$, dann lauten die Funktionen $u(t)$

bzw. $s(t)$, die die Treppenfunktionen der jeweils produzierten bzw. nachgefragten Mengen darstellen:

$$u(t) = \left\lfloor \frac{t}{T_j} \right\rfloor \quad (6)$$

bzw.

$$s(t) = \left\lfloor \frac{t - tv_{j-1} + T_{j-1}}{T_{j-1}} \right\rfloor \quad (7)$$

mit tv_{j-1} als Startverzug zwischen dem Beginn des ersten Zyklus der Stufe j und des ersten Zyklus der Stufe $j-1$. Aus (3) wird somit:

$$u(t) * T_j \geq s(t) * T_{j-1} \quad (8)$$

bzw.

$$\left\lfloor \frac{t}{T_j} \right\rfloor * T_j \geq \left\lfloor \frac{t - tv_{j-1} + T_{j-1}}{T_{j-1}} \right\rfloor * T_{j-1} \quad \forall t \quad (9)$$

Wie sich leicht anhand der Abbildung der Abgangs- und der Zugangskurve $A_j(t)$ bzw. $Z_{j-1}(t)$ (Abbildung 5.4, rechts) zeigen lässt, sind die kritischen Zeitpunkte jene, an denen die Zugangskurve einen Sprung aufweist bzw. die Stufe $j-1$ neues Material nachfragt.

Ist die Ungleichung für diese Punkte erfüllt, so ist sie auch für alle anderen Zeitpunkte t erfüllt. Zwischen zwei aufeinander folgenden Sprüngen (im Abstand von T_j) bleibt die Zugangskurve $Z_{j-1}(t)$ konstant, wohingegen die Abgangskurve $A_j(t)$ entweder konstant bleibt oder steigt. Ist die Ungleichung also für die Zeit-

5.3 Startverzug bei uneinheitlichen Planungsperiodenlängen

punkte eines Sprunges erfüllt, so gilt dies auch für alle Zeiten t zwischen zwei Sprüngen.

Ein kritischer Punkt t_{krit} bzw. ein Sprung in $Z_{j-1}(t)$ tritt dann auf, wenn der Zähler der Funktion ein ganzzahliges Vielfaches von T_{j-1} ist und somit gilt:

$$t - tv_{j-1} + T_{j-1} = (n+1) * T_{j-1} \text{ mit } n \in \mathbb{N} \quad (10)$$

Daraus ergibt sich t_{krit} zu:

$$t_{krit} = n * T_{j-1} + tv_{j-1} \quad (11)$$

Nachdem $t - tv_{j-1} + T_{j-1}$ ein ganzzahliges Vielfaches von T_{j-1} ist, gilt weiter ebenfalls:

$$\left\lfloor \frac{t - tv_{j-1} + T_{j-1}}{T_{j-1}} \right\rfloor * T_{j-1} = \frac{t - tv_{j-1} + T_{j-1}}{T_{j-1}} * T_{j-1} = t - tv_{j-1} + T_{j-1} = (n+1) * T_{j-1} \quad (12)$$

Durch Einsetzen von t_{krit} ergibt sich die ursprüngliche Ungleichung (3) zu:

$$\left\lfloor \frac{n * T_{j-1} + tv_{j-1}}{T_j} \right\rfloor * T_j \geq (n+1) * T_{j-1} \quad (13)$$

Aus dieser geht durch Umformung folgende Ungleichung hervor:

$$0 \geq (n+1) * T_{j-1} - \left\lfloor \frac{n * T_{j-1} + tv_{j-1}}{T_j} \right\rfloor * T_j \quad (14)$$

Zur Lösung der Ungleichung sei zunächst $tv_{j-1} = 0$ angenommen und die maximale Differenz der zwei Terme der rechten Seite ohne die Berücksichtigung von tv_{j-1} ermittelt. Dabei gilt:

$$\max \left((n+1) * T_{j-1} - \left\lfloor \frac{n * T_{j-1}}{T_j} \right\rfloor * T_j \right) = \max \left(n * T_{j-1} - \left\lfloor \frac{n * T_{j-1}}{T_j} \right\rfloor * T_j \right) + T_{j-1} \quad (15)$$

Es kann gezeigt werden, dass der Term in Klammern der Gleichung (15) dem maximalen Rest R_{\max} der Division von $n * T_{j-1}$ durch T_j entspricht. Hierzu sei der Rest R der Division als Differenz aus Dividend und Divisor dargestellt:

$$R \left(\frac{n * T_{j-1}}{T_j} \right) = n * T_{j-1} - e * T_j \geq 0 \text{ mit } n, e \in \mathbb{N} \quad (16)$$

mit

5 Zeitfensterbasiertes Planungssystem mit uneinheitlichen Planungsperiodenlängen

$$\begin{aligned}
 n^*T_{j-1} &\geq e^*T_j \\
 \Rightarrow e &\leq n^* \frac{T_{j-1}}{T_j} \\
 e &= \left\lfloor n^* \frac{T_{j-1}}{T_j} \right\rfloor
 \end{aligned} \tag{17}$$

und damit

$$R_{\max} \left(\frac{n^*T_{j-1}}{T_j} \right) = \max \left(n^*T_{j-1} - \left\lfloor n^* \frac{T_{j-1}}{T_j} \right\rfloor * T_j \right) \tag{18}$$

Es gilt

$$0 \leq R \left(\frac{n^*T_{j-1}}{T_j} \right) < T_j, \tag{19}$$

da der Rest einer Division immer kleiner dem Divisor ist.

Des Weiteren gilt, dass die Differenz beliebiger Vielfacher zweier natürlicher Zahlen immer ein natürliches Vielfaches des größten gemeinsamen Teilers (ggT) der beiden Zahlen ist. Sei $ggT(T_j, T_{j-1})$ der größte gemeinsame Teiler von T_j und T_{j-1} , so ist

$$T_{j-1} = f^* ggT(T_j, T_{j-1}) \quad \text{mit } f \in \mathbb{N} \tag{20}$$

und

$$T_j = g^* ggT(T_j, T_{j-1}) \quad \text{mit } g \in \mathbb{N} \tag{21}$$

und somit gilt mit (20) und (21) in (16):

$$R \left(\frac{n^*T_{j-1}}{T_j} \right) = n^*T_{j-1} - e^*T_j = (nf - eg)^* ggT(T_j, T_{j-1}) \tag{22}$$

Nachdem die Variablen n und f sowie e und g aus der Menge der natürlichen Zahlen stammen, ist auch die Differenz der jeweiligen Produkte, $n^*f - e^*g$, eine natürliche Zahl. Der Rest R der Division von n^*T_{j-1} und T_j ist also ein ganzzahliges Vielfaches des größten gemeinsamen Teilers beider Planungsperioden. Der maximale Rest der Division beträgt demnach:

5.4 Auswirkung der Länge der Planungsperioden auf die Durchlaufzeit

$$R_{\max} \left(\frac{n * T_{j-1}}{T_j} \right) = T_j - ggT(T_j, T_{j-1}) \quad (23)$$

Die maximale Differenz der Gleichung (15) und damit der notwendige Startverzug tv der Stufe $j-1$ ergibt sich demzufolge zu:

$$tv_{j-1} = \max \left(n * T_{j-1} - \left\lfloor \frac{n * T_{j-1}}{T_j} \right\rfloor * T_j \right) + T_{j-1} = T_j - ggT(T_j, T_{j-1}) + T_{j-1} \quad (24)$$

T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit
 $ggT(x,y)$: Größter gemeinsamer Teiler von x und y
 tv_{j-1} : Startverzug der Stufe $j-1$

5.4 Auswirkung der Länge der Planungsperioden auf die Durchlaufzeit

Die Durchlaufzeit LT (lead time) der Wertschöpfungskette sei definiert als die Zeitspanne zwischen dem Bearbeitungsbeginn eines Auftrags durch das m -te Kettenglied stromaufwärts bis zur Auslieferung an den OEM durch das erste Glied der Wertschöpfungskette. Im als Basisfall bezeichneten Fall einheitlicher Planungsperioden entlang der Supply Chain ergibt sich die durchschnittliche Durchlaufzeit somit nach RIEZEBOS (RIEZEBOS 2001, S. 50) zu:

$$LT_{avg} = (m + 2) * T \quad (25)$$

LT_{avg} : Durchschnittliche Durchlaufzeit (Lead Time)
 m : Anzahl der Stufen der Wertschöpfungskette
 T : Einheitliche Länge der Planungsperiode für alle Stufen

Für die im Mittelpunkt dieser Arbeit stehenden Systeme mit uneinheitlicher Länge der verschiedenen Planungsperioden T_j je Stufe j der Supply Chain ist dieser einfache Zusammenhang nicht gültig. Die Durchlaufzeit eines Auftrages ist vielmehr abhängig von der Größe der Planungsfreiräume der einzelnen Stufen sowie vom Verhältnis der Planungsperioden der einzelnen Stufen zueinander. Diese Abhängigkeit erklärt sich durch den in Abschnitt 5.3 beschriebenen Startverzug tv_j .

Ausgehend von der m -ten Stufe sind die Planungsperioden der jeweiligen Stufe auf dem Zeitstrahl in einer Reihe anzuordnen. Die nachfolgende Stufe beginnt mit dem Startverzug tv_{m-1} und wiederum schließen die folgenden Planungsperi-

5 Zeitfensterbasiertes Planungssystem mit uneinheitlichen Planungsperiodenlängen

den nahtlos an die erste Planungsperiode der Stufe an. Dies wird bis zur ersten Stufe der Kette fortgesetzt. So entsteht je Stufe eine zusammenhängende Kette von Planungsperioden mit einem um den Startverzug tv_j zur vorgelagerten Stufe verschobenen Startpunkt. Der Versatz der Planungsperioden aufeinander folgender Stufen ist, bei unterschiedlicher Länge der jeweiligen Planungsperioden, variabel. Dies bedeutet auch, dass die Durchlaufzeit einzelner Aufträge unterschiedlich lang ist, da einzelne Aufträge entlang der Kette unterschiedlich lange auf die folgende Stufe warten. In wiederkehrenden Abständen wiederholen sich diese Muster jedoch und es existieren geschlossene Zyklen, in welchen die gleichen Aufträge in den zwei aufeinanderfolgenden Stufen bearbeitet werden.

Abbildung 5.5 zeigt die in Systemen uneinheitlicher Planungsfreiräume entstehenden, sich wiederholenden geschlossenen Zyklen. Die Zyklenlänge ist dabei durch das kleinste gemeinsame Vielfache der aufeinander folgenden Planungsperiodenlängen bestimmt. Wird die Periodenlänge der beiden Stufen vertauscht, ändern sich die Zyklen nicht (untere und obere Darstellung in Abbildung 5.5).

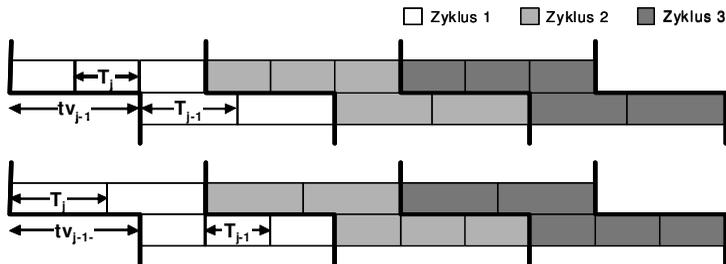


Abbildung 5.5: In der Abfolge der Planungsperioden zweier Stufen ergeben sich wiederkehrende, geschlossene Zyklen

Aus der Betrachtung eines geschlossenen Zyklus kann demnach auf das Verhalten der Kette im weiteren Zeitverlauf geschlossen werden. So ist aus der Darstellung eines geschlossenen Zyklus abzulesen, dass die maximale Auftragsdurchlaufzeit eines Auftrages gemessen ab der m -ten Stufe der Supply Chain bis zur Auslieferung

$$LT_{m,\max} = T_m + \sum_{j=0}^{m-1} tv_j \quad (26)$$

- $LT_{m,\max}$: Maximale Durchlaufzeit der Wertschöpfungskette ab Stufe m
- T_m : Länge der Planungsperiode der Stufe m
- tv_j : Startverzug der Stufe j

5.4 Auswirkung der Länge der Planungsperioden auf die Durchlaufzeit

beträgt und damit mit Gleichung (24) wie folgt berechnet werden kann:

$$\begin{aligned}
 LT_{m,\max} &= T_m + T_m - ggT(T_m, T_{m-1}) + T_{m-1} + T_{m-1} - ggT(T_{m-1}, T_{m-2}) + T_{m-2} + \dots + \\
 &\quad + \dots + T_2 - ggT(T_2, T_1) + T_1 + T_1 - ggT(T_1, T_0) + T_0 = \\
 &= T_m + \sum_{j=1}^m (T_j - ggT(T_j, T_{j-1}) + T_{j-1}) \tag{27}
 \end{aligned}$$

$$\text{mit } T_0 \equiv 1 \text{ und } ggT(T_1, T_0) \equiv 1$$

$ggT(x,y)$: Größter gemeinsamer Teiler von x und y

$LT_{m,\max}$: Maximale Durchlaufzeit der Wertschöpfungskette ab Stufe m

T_m : Länge der Planungsperiode der Stufe m

Durch Abzug der jeweiligen Länge der Planungsperiode der Stufe m ergibt sich die minimale Auftragsdurchlaufzeit ab der m -ten Stufe der Supply Chain aus der maximalen Auftragsdurchlaufzeit zu:

$$LT_{m,\min} = LT_{m,\max} - T_m = \sum_{j=1}^m (T_j - ggT(T_j, T_{j-1}) + T_{j-1}) \tag{28}$$

$ggT(x,y)$: Größter gemeinsamer Teiler von x und y

$LT_{m,\min}$: Minimale Durchlaufzeit der Wertschöpfungskette ab Stufe m

T_m : Länge der Planungsperiode der Stufe m

Die mittlere Durchlaufzeit der gesamten Wertschöpfungskette ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel der maximalen sowie der minimalen Durchlaufzeit zu:

$$\begin{aligned}
 LT_{m,\text{avg}} &= \frac{LT_{m,\max} + LT_{m,\min}}{2} = LT_{m,\max} - \frac{1}{2}T_m \\
 &= \frac{1}{2}T_m + \sum_{j=1}^m (T_j - ggT(T_j, T_{j-1}) + T_{j-1}) \tag{29}
 \end{aligned}$$

$LT_{m,\text{avg}}$: Durchschnittliche Durchlaufzeit der Wertschöpfungskette ab Stufe m

Die maximale, die minimale und die durchschnittliche Durchlaufzeit der gesamten Kette ergeben sich aus der Berechnung der jeweiligen Werte für die Durchlaufzeit von der letzten Stufe stromaufwärts bis zum Kunden.

Abbildung 5.6 zeigt den Verlauf der maximalen Durchlaufzeit in Abhängigkeit der gewählten Planungsperiodenlänge T für eine Wertschöpfungskette mit zwei Stufen. Deutlich zu erkennen sind ausgeprägte Minimalwerte auf der Diagonalen. Hier besitzen beide Stufen die gleiche Planungsperiodenlänge (den gleichen Planungsfreiraum), wodurch der Startverzug minimiert wird und Wartezeiten zwischen den Stufen entfallen. Mathematisch ist dies dadurch zu erklären, dass der größte gemeinsame Teiler maximal wird.

5 Zeitfensterbasiertes Planungssystem mit uneinheitlichen Planungsperiodenlängen

Maximale Durchlaufzeit

in Tagen

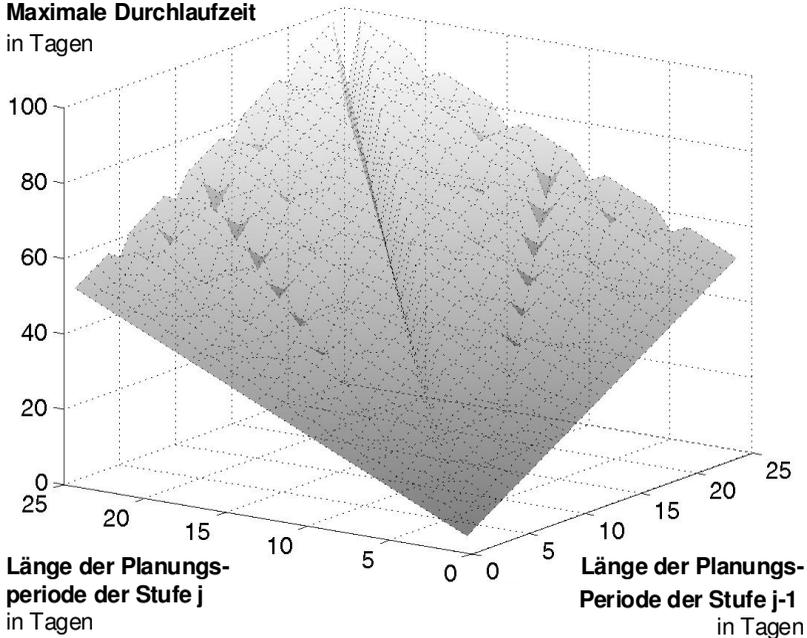


Abbildung 5.6: Maximale Durchlaufzeit über der Planungsperiodenlänge der Stufe j und Stufe $j-1$

Weitere Minima ergeben sich für Konstellationen, in denen z.B. die Länge der Planungsperiode der einen Stufe ein Vielfaches der Periodenlänge der darauf folgenden Stufe ist. In Abbildung 5.6 sind deutlich jene Werte zu erkennen, bei denen der Planungsfreiraum der einen Stufe doppelt so groß wie jener der anderen Stufe gewählt wurde.

Im Allgemeinen ist also bei der Auslegung auf die harmonische Gestaltung von Planungsfreiräumen entlang der gesamten Kette zu achten, da hiermit die Übergangszeiten reduziert werden können⁷⁸. Harmonisch bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die einzelnen Planungsfreiräume einen möglichst großen gemeinsamen Teiler besitzen (z.B. 3-6-3), im Idealfall alle gleich groß sind (z.B. 4-4-4). Letzteres sind Systeme des Basisfalls, für die oben genannte Gleichungen ebenfalls Gültigkeit besitzen.

⁷⁸ So ist z.B. die Konfiguration 8/4 Zeiteinheiten günstiger als 7/4 Zeiteinheiten, da die maximale Durchlaufzeit 20 statt 21 Zeiteinheiten und gleichzeitig die Produktivzeit 12 statt 11 Zeiteinheiten beträgt.

5.5 Auswirkung der Länge der Planungsperioden auf die Bestandshöhe

Bestände lassen sich im Allgemeinen untergliedern in den Lagerbestand an Roh- und Fertigwaren sowie in den WIP (Work in Progress oder Aufträge in Arbeit). Im Folgenden wird die Summe aus Lagerbestand und WIP als Bestand bezeichnet.

Zur Berechnung der Bestandshöhe wird der als Little's Law (LITTLE 1961, S. 383) bekannte Zusammenhang zwischen Durchlaufzeit, Produktionsrate und Bestandshöhe verwendet. Dieses Gesetz besagt, dass

$$L = \lambda * W \quad (30)$$

$1/\lambda$: Zugangsrate
 L : Anzahl Teile im System
 W : Zeit, die ein bestimmtes Teil im System verbringt

Little's Law stellt damit einen mathematischen Zusammenhang zwischen der Bestandshöhe und der Durchlaufzeit her, der als Grundlage der folgenden Überlegungen dient. Unter der Annahme, dass die Nachfrage zu jedem Zeitpunkt gedeckt wird, kann die durchschnittliche Zugangsrate des Systems durch den durchschnittlichen Bedarf ersetzt werden. Die durchschnittliche Durchlaufzeit für die gesamte Kette kann mittels der in Abschnitt 5.4 dargestellten Gleichungen berechnet werden. Somit gilt für den durchschnittlichen Bestand I (Inventory) entlang der Kette:

$$I_{avg} = LT_{avg} * d \quad (31)$$

d : Bedarf je Standardzeiteinheit
 I_{avg} : Durchschnittlicher Bestand (Inventory)
 LT_{avg} : Durchschnittliche Durchlaufzeit

Zur Bestimmung der Bestandskosten innerhalb der Kette ist jedoch nicht nur die Kenntnis des Gesamtbestandes entlang der Wertschöpfungskette, sondern auch über dessen Verteilung auf die verschiedenen Stufen erforderlich, da sich mit dem Eigentumsübergang von einer an die nächste Stufe i.d.R. das in den ausgetauschten Gütern gebundene Kapital erhöht⁷⁹. Damit erhöhen sich die Kapital-

⁷⁹ Solange sich diese im Besitz des Lieferanten befinden, ist Kapital in Höhe der Herstellkosten gebunden, nach dem Eigentumsübergang hingegen sind Mittel in Höhe der jeweiligen Einstandspreise gebunden. Diese sind im Allgemeinen höher als die Herstellkosten, da sie sich aus den Herstellkosten zuzüglich diverser Aufschläge ergeben.

5 Zeitfensterbasiertes Planungssystem mit uneinheitlichen Planungsperiodenlängen

bindungskosten mit dem Eigentumsübergang, was wiederum die Bestandskosten beeinflusst.

In der betrieblichen Praxis erfolgt der Eigentumsübergang in der Regel mit dem Transport zwischen zwei Stufen der Wertschöpfungskette und dem darauf folgenden, dem Materialfluss entgegengesetzten Geldfluss⁸⁰. Aufgrund der zuvor beschriebenen, mit dem Eigentumsübergang einhergehenden, erhöhten Kapitalbindungskosten ist im Sinne eines globalen Optimums ein möglichst später Eigentumsübergang ratsam. Daher wird festgelegt, dass die fertig gestellten Aufträge bis zum Start der Planungsperiode des Nachfolgers im Besitz und damit auch im Eigentum des Lieferanten verbleiben. Innerhalb einer Planungsperiode werden alle anstehenden Aufträge gemäß der lokal optimierten Reihenfolge abgearbeitet und nach Fertigstellung im Übergangslager des jeweiligen Kettenmittglieds eingelagert. Dort verbleiben diese mindestens bis zum Beginn der folgenden Planungsperiode des Nachfolgers⁸¹.

Der durchschnittliche Bestand je Stufe kann wiederum über die durchschnittliche Durchlaufzeit je Stufe ermittelt werden. Deren Bestimmung kann auf zwei verschiedenen Wegen erfolgen. Zum einen ergibt sich die mittlere Durchlaufzeit der Stufe j aus der Differenz der durchschnittlichen Auftragsdurchlaufzeit ab der j -ten und der durchschnittlichen Auftragsdurchlaufzeit ab der $j-1$ -ten Stufe der Supply Chain:

$$It_{j,avg} = LT_{j,avg} - LT_{j-1,avg} \quad (32)$$

$It_{j,avg}$: Durchschnittliche Durchlaufzeit der Stufe j

$LT_{j,avg}$: Durchschnittliche Durchlaufzeit der Wertschöpfungskette ab Stufe j

Mittels den in Abschnitt 5.4 beschriebenen Gleichungen (27), (28) und (29) kann der durchschnittliche Bestand der Stufe j ermittelt werden zu:

⁸⁰ Eine Ausnahme bilden so genannte Konsignationsvereinbarungen. In diesen ist geregelt, dass das Material bis zu seinem Verbrauch durch die nachfolgende Stufe der Wertschöpfungskette im Eigentum des Lieferanten verbleibt und eine Bezahlung erst zum Zeitpunkt des Verbrauchs erfolgt.

⁸¹ Mindestens, da aufgrund der Übergangszeiten Aufträge zum Teil erst in der übernächsten Planungsperiode des Nachfolgers bearbeitet werden.

5.5 Auswirkung der Länge der Planungsperioden auf die Bestandshöhe

$$\begin{aligned}
 lt_{j,avg} &= \frac{1}{2} * \left[(LT_{j,max} + LT_{j,min}) - (LT_{j-1,max} + LT_{j-1,min}) \right] = \\
 &= \frac{1}{2} * \left[\underbrace{LT_{j-1,max} + 2 * T_j - ggT(T_j, T_{j-1})}_{LT_{j,max}} + \underbrace{LT_{j-1,max} + T_j - ggT(T_j, T_{j-1})}_{LT_{j,min}} \right. \\
 &\quad \left. - \underbrace{LT_{j-1,max} - (LT_{j-1,max} - T_{j-1})}_{LT_{j-1,min}} \right] = \quad (33) \\
 &= \frac{1}{2} * \left[3 * T_j - 2 * ggT(T_j, T_{j-1}) + T_{j-1} \right] = \frac{3}{2} T_j + \frac{1}{2} T_{j-1} - ggT(T_j, T_{j-1})
 \end{aligned}$$

$ggT(x,y)$: Größter gemeinsamer Teiler von x und y

$lt_{j,avg}$: Durchschnittliche Durchlaufzeit der Stufe j

$LT_{m,max}$: Maximale Durchlaufzeit der Wertschöpfungskette ab Stufe m

$LT_{m,min}$: Minimale Durchlaufzeit der Wertschöpfungskette ab Stufe m

T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit

Zum anderen kann die mittlere Durchlaufzeit je Stufe über die maximalen und minimalen Durchlaufzeiten je Stufe ermittelt werden. Die maximale Auftragsdurchlaufzeit der j -ten Stufe der Wertschöpfungskette ergibt sich aus der maximalen Auftragsdurchlaufzeit eines Zyklus von $2 * tv_j$ zu:

$$lt_{j,max} = 2 * tv_{j-1} - T_{j-1} = 2 * T_j + T_{j-1} - 2 * ggT(T_j, T_{j-1}) \quad (34)$$

$lt_{j,max}$: Maximale Durchlaufzeit der Stufe j

tv_{j-1} : Startverzug der Stufe $j-1$

Auch die minimale Durchlaufzeit $lt_{j,min}$ eines Auftrags lässt sich im geschlossenen Zyklus (vgl. Abbildung 5.5) einfach zu T_j ablesen. Die mittlere Durchlaufzeit in einer Kettenstufe ergibt sich demnach zu:

$$lt_{j,avg} = \frac{lt_{j,max} + lt_{j,min}}{2} = \frac{3}{2} T_j + \frac{1}{2} T_{j-1} - ggT(T_j, T_{j-1}) \quad (35)$$

Der mittlere Bestand eines Kettengliedes kann nach (30) bzw. (31) somit wie folgt berechnet werden:

$$I_{j,avg} = lt_{j,avg} * d \quad (36)$$

$I_{j,avg}$: Durchschnittlicher Bestand in der Stufe j

$lt_{j,avg}$: Durchschnittliche Durchlaufzeit der Stufe j

d : Bedarf je Standardzeiteinheit

Neben der Werterhöhung zum Zeitpunkt des Eigentumsübergangs erfahren die Güter durch die Bearbeitung in einer Stufe in der Regel auch eine Wertsteigerung. Die Bearbeitung erfolgt dabei allein im Verlauf der Periode T , an deren Anfang die Güter zu Materialkosten und an deren Ende die Güter zu Herstellkos-

5 Zeitfensterbasiertes Planungssystem mit uneinheitlichen Planungsperiodenlängen

ten bewertet werden. Die Aufträge in Arbeit stellen dabei den WIP dar. Nach Abschluss der Bearbeitung über die Dauer von T liegt der Bestand als Fertigwarenbestand (FGI, finished goods inventory) vor und erfährt erst durch die Zuschläge bei Verkauf eine Werterhöhung. Beide Bestandsarten müssen daher wertmäßig getrennt bewertet werden. Hierzu lässt sich der mittlere Bestand einer Stufe nach Gleichung (36) folgendermaßen unterteilen:

$$I_{j,avg} = I_{t,avg} * d = \underbrace{T_j * d}_{WIP} + \underbrace{\left(1/2 * T_j + 1/2 * T_{j-1} - ggT(T_j, T_{j-1})\right) * d}_{FGI} \quad (37)$$

- d : Bedarf je Standardzeiteinheit
 $ggT(x,y)$: Größter gemeinsamer Teiler von x und y
 $I_{j,avg}$: Durchschnittlicher Bestand in der Stufe j
 $I_{t,avg}$: Durchschnittliche Durchlaufzeit der Stufe j
 T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit

Die Bestände innerhalb der Kette können demnach durch Länge und Anordnung der Planungsperioden bewusst beeinflusst werden. Gleichung (37) ermöglicht die Berechnung des mittleren Bestands, differenziert nach WIP und FGI für jede Stufe der Wertschöpfungskette. Die Bestandskosten ergeben sich dann aus den Lagerkosten und der Kapitalbindung, die beide aus der berechneten Bestandshöhe abzuleiten sind. Die Bestandskosten bilden zusammen mit den durch die Größe der Planungsperioden beeinflussten Optimierungspotenzialen die Grundlage zur kostenmäßigen Bewertung der getroffenen Einstellungen.

5.6 Auswirkung der Länge der Planungsperioden auf die Auslastung

5.6.1 Vorhandene Stellgrößen

Die effektive Nutzung von Maschinen und Anlagen ist eines der vier Hauptziele der Produktionsplanung und -steuerung. Abbildung 5.7 zeigt beispielhaft die OEE (Overall Equipment Effectiveness) bzw. den effektiven Maschinennutzungsgrad einer Anlage. Die beiden Eckpunkte des Graphen bilden zum einen die gesamte Maschinenzeit bzw. die theoretische Maximalkapazität⁸² und zum

⁸² 24 Stunden je Tag, 365 Tage pro Jahr bei maximaler Geschwindigkeit

5.6 Auswirkung der Länge der Planungsperioden auf die Auslastung

anderen der OEE bzw. die effektiv genutzte Maschinenzeit, die sich als Quotient der tatsächlichen Ausbringungsmenge zur theoretischen Maximalkapazität ergibt.

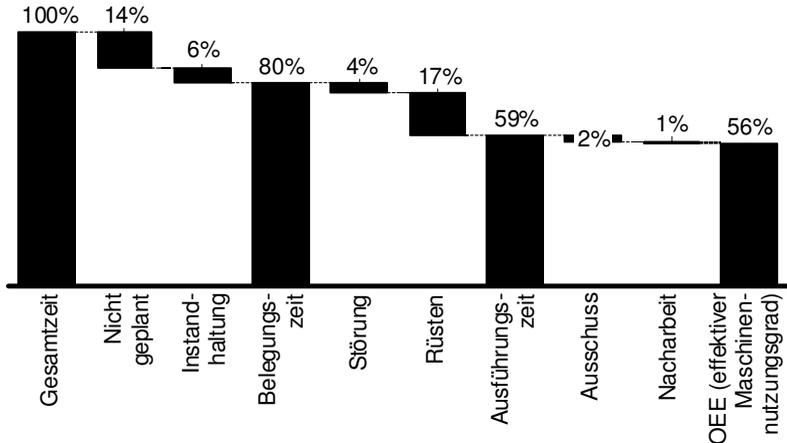


Abbildung 5.7: Wasserfalldiagramm zur Darstellung des effektiven Maschinen-nutzungsgrades

Zwischen diesen beiden Werten sind die verschiedenen Verluste aufgetragen, welche sich wiederum untergliedern lassen in:

- Verfügbarkeitsverluste aufgrund fehlender Belegung, z.B. durch mangelnde Nachfrage, durch Instandhaltungsarbeiten oder Betriebsschließungen an Sonn- und Feiertagen,
- Nutzungsverluste aufgrund von Maschinenausfällen und Rüstzeiten und
- Ausbringungsverluste durch fehlerhafte Teile oder erforderliche auf der Maschine auszuführende Nacharbeit.

Durch die Dimensionierung der Planungsfreiräume entlang der Wertschöpfungskette können vor allem Nutzungsverluste, im speziellen Rüstzeiten, reduziert werden. Abbildung 5.8 zeigt jene drei Faktoren, welche die Gesamtdauer der Rüstvorgänge pro Jahr beeinflussen und von der Länge der Planungsperiode T_j abhängen.

5 Zeitfensterbasiertes Planungssystem mit uneinheitlichen Planungsperiodenlängen

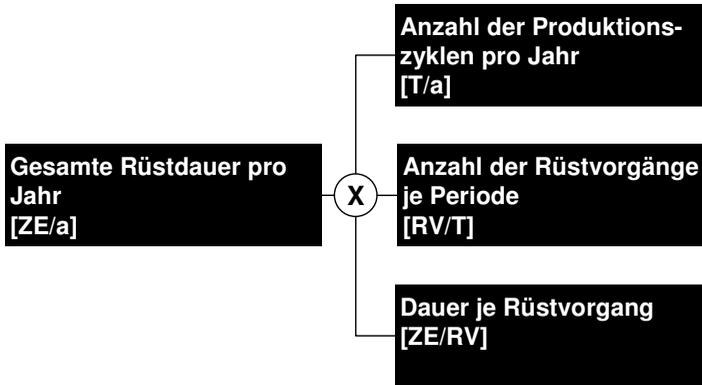


Abbildung 5.8: Beeinflussung der Rüstdauer pro Jahr durch die Planungsperiodenlänge T

Im Einzelnen sehen diese Abhängigkeiten wie folgt aus:

- **Anzahl der Produktionszyklen pro Jahr:** Mit zunehmender Länge der Planungsfreiräume nimmt die Anzahl der Produktionszyklen pro Jahr ab. Ceteris paribus nimmt damit auch die Anzahl der Rüstvorgänge pro Jahr ab.
- **Anzahl der Rüstvorgänge je Periode:** Werden nicht alle Produktvarianten regelmäßig nachgefragt, so beeinflusst die Länge der Planungsfreiräume die Anzahl der je Periode zu produzierenden Varianten.
- **Dauer je Rüstvorgang:** Rüstzeiten bzw. -kosten können durch eine optimierte Reihenfolgebildung reduziert werden. Allgemein gilt, dass die mögliche Einsparung mit der Länge des zur Verfügung stehenden Optimierungszeitraumes zunimmt. Eine Reihenfolgeoptimierung ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn Rüstzeiten sequenzabhängig sind und nicht zwangsläufig jede Variante in jeder Planungsperiode nachgefragt wird⁸³.

⁸³ Falls jede Variante in jeder Planungsperiode einzuplanen ist, so ergibt sich unabhängig von der Größe des Planungsfreiraums immer die gleiche optimale Reihenfolge und somit der gleiche Rüstaufwand pro Planungsperiode. Von der Größe des Planungsfreiraums beeinflusst wird allein die mögliche Losgröße.

5.6.2 Anzahl der Produktionszyklen pro Jahr

Unabhängig vom Nachfrageverlauf und davon, ob die Rüstzeiten sequenzabhängig oder -unabhängig sind, ist der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Rüstzeiteffekt zu beobachten. Treffender ist die Bezeichnung *Losgrößeneffekt*, da nicht die Zeit eines Rüstvorgangs, sondern die Anzahl der Rüstvorgänge reduziert wird. Die Länge einer Planungsperiode bestimmt die Anzahl der Produktionszyklen pro Jahr. Unter der Annahme einer gleichbleibenden Anzahl der zu produzierenden Varianten je Zyklus wird über das Jahr hinweg gesehen die Anzahl der Rüstvorgänge und damit auch die gesamte Rüstdauer pro Jahr reduziert.

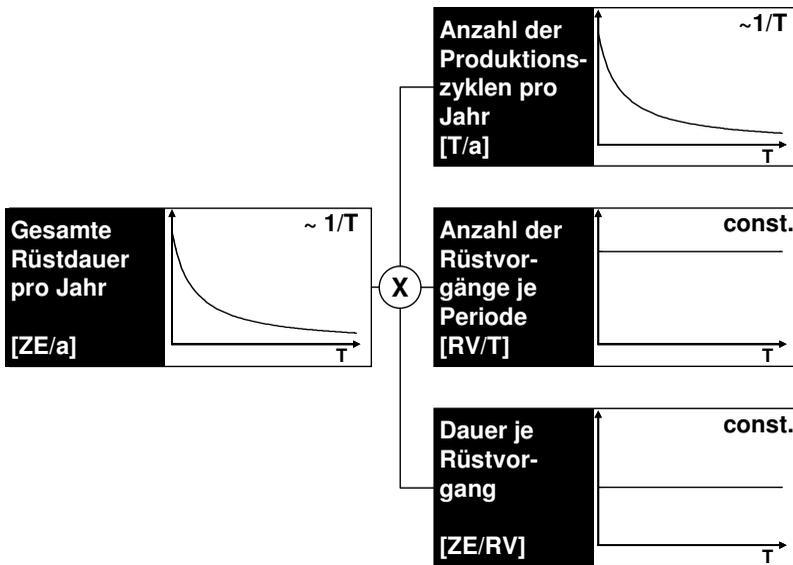


Abbildung 5.9: Beeinflussung der Rüstdauer pro Jahr durch die Planungsperiodenlänge T für den Fall A

Für den Fall A ist dies auch die einzige Stellgröße, mit der über die Dimensionierung der Planungsperiodenlänge die Maschinennutzung beeinflusst werden kann. Es gilt, dass die gesamte Rüstdauer und damit auch die Rüstkosten indirekt proportional zur Länge der Planungsperioden T_j sind:

5 Zeitfensterbasiertes Planungssystem mit uneinheitlichen Planungsperiodenlängen

$$\text{Rüstzeit der Stufe } j \sim \frac{1}{T_j} \quad (38)$$

T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit

Wie durch Gleichung (38) unschwer zu erkennen ist, wird durch die Bestimmung von T_j im Grunde die Produktionslosgröße festgelegt. Das zu lösende Minimierungsproblem reduziert sich demnach im Basisfall auf das Bestimmen der optimalen Losgröße. Die Länge der Planungsperiode T beeinflusst im Falle regelmäßiger Nachfrage für alle Varianten allein die Anzahl der Produktionszyklen und damit die Losgröße (Abbildung 5.9).

5.6.3 Anzahl der Rüstvorgänge je Planungsperiode

Die Anzahl der Rüstvorgänge je Periode ist nur dann von der Länge der Planungsperiode abhängig, wenn nicht jede Variante zwangsläufig in jeder Periode nachgefragt wird, sprich der Variantemix nicht konstant ist. Dies ist für die Fälle B und C gegeben.

Die Wahrscheinlichkeit $P(d_i > 0)$, dass eine bestimmte Variante bzw. ein bestimmtes Produkt i innerhalb einer Standardzeiteinheit nachgefragt wird ($d_i > 0$), sei mit der diskreten Zufallsvariablen $w_i \in]0;1]$ beschrieben. Damit kann die Wahrscheinlichkeit, dass für die Variante bzw. das Produkt i innerhalb einer Planungsperiode der Länge T Bedarf besteht ($D_i > 0$), als ein Experiment mit T Wiederholungen und den möglichen Ergebnissen 1 (Variante/Produkt wird nachgefragt) und 0 (Variante/Produkt wird nicht nachgefragt) dargestellt werden. Die mathematische Formulierung vereinfacht sich durch die Betrachtung des Gegenereignisses, dass die Variante bzw. das Produkt innerhalb des Zeitraums T nicht nachgefragt wird:

$$P(D_i = 0) = (1 - w_i)^{T_j} = q_i^{T_j} \Rightarrow P(D_i \neq 0) = 1 - q_i^{T_j} \quad (39)$$

D_i : Bedarf für das Produkt i je Planungsperiode T_j

q_i : Komplementäre Wahrscheinlichkeit der Variante bzw. des Produktes i

T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit

w_i : Auftrittswahrscheinlichkeit der Variante bzw. des Produktes i

Der Erwartungswert $E(k_j)$ der Anzahl verschiedener Varianten innerhalb der gewählten Periodenlänge kann als die Summe der einzelnen Ergebnisse der Experimente je Variante dargestellt werden:

5.6 Auswirkung der Länge der Planungsperioden auf die Auslastung

$$E(k_j) = \sum_{i=1}^{n_j} (1 - q_i^{T_j}) \quad (40)$$

- k_j : Anzahl der Varianten / Produkte je Planungsperiode in Stufe j
 n_j : Anzahl der Varianten / Produkte in Stufe j
 q_i : Komplementäre Wahrscheinlichkeit der Variante bzw. des Produktes i
 T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit

Mit $q_i < 1$ ist sofort erkennbar, dass der Erwartungswert der nachgefragten Varianten je Planungsperiode mit T_j ansteigt. Die durchschnittliche Anzahl der Rüstvorgänge RV innerhalb einer Planungsperiode steigt also mit der Länge von T_j . Es gilt:

$$RV_{j,avg} = E(k_j) = \sum_{i=1}^{n_j} (1 - q_i^{T_j}) \quad (41)$$

- q_i : Komplementäre Wahrscheinlichkeit der Variante bzw. des Produktes i
 RV_j : Anzahl der Rüstvorgänge je Planungsperiode in der Stufe j

Für große T_j nähert sich der Erwartungswert der Anzahl zu produzierender Varianten je Planungsperiode der Gesamtanzahl der Varianten der Stufe j an:

$$\lim_{T_j \rightarrow \infty} (E(k_j)) = \lim_{T_j \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=1}^{n_j} (1 - q_i^{T_j}) \right) = n_j \quad (42)$$

Dies bedeutet, dass bei zunehmender Länge der Planungsperiode T_j der Einfluss auf die Anzahl der Rüstvorgänge je Periode abnimmt und ab einer bestimmten Länge von T_j allein die Reduktion der Planungszyklen und somit der Losgrößeneffekt die Gesamtdauer der Rüstvorgänge weiter reduziert.

Für die Fälle der Gruppe B wird demnach, wie in Abbildung 5.10 dargestellt, neben der Anzahl der Produktionszyklen auch die Anzahl der Rüstvorgänge je Periode von der Länge der Planungsperiode T_j beeinflusst.

5 Zeitfensterbasiertes Planungssystem mit uneinheitlichen Planungsperiodenlängen

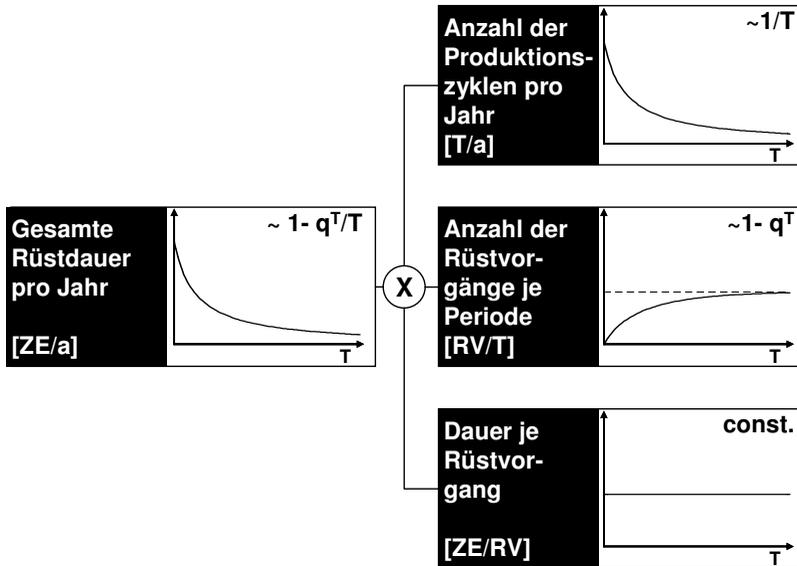


Abbildung 5.10: Beeinflussung der Rüstdauer pro Jahr durch die Planungsperiodenlänge T_j für den Fall B

5.6.4 Dauer je Rüstvorgang

5.6.4.1 Wirkprinzip

Die durchschnittliche Dauer je Rüstvorgang kann aus planerischer Sicht nur dann beeinflusst werden⁸⁴, wenn die Rüstzeiten je Variante vom Ausgangszustand, also der zuvor gerüsteten Variante, abhängen. D.h. es müssen sequenzabhängige Rüstzeiten vorliegen, wie für den Fall C spezifiziert.

Der eigentliche Effekt der Länge der Planungsperiode auf die durchschnittliche Dauer eines Rüstvorganges resultiert jedoch wiederum aus der Anzahl der in einem Produktionszyklus zu bearbeitenden Varianten. Um diesen Zusammenhang

⁸⁴ Neben der Reduktion von Rüstzeiten durch planerische Vorgaben, wie die Reduktion von Rüstvorgängen (Losgrößenbildung) oder die Reihenfolgeoptimierung, gibt es auch operative Maßnahmen zur Reduktion der Rüstzeiten durch Optimierung der Rüstabläufe, Modifikation der Anlagen etc., wie sie in der SMED-Methodik nach Shigeo Shingo (SHINGO 1985) beschrieben werden.

5.6 Auswirkung der Länge der Planungsperioden auf die Auslastung

zu veranschaulichen, sei zunächst die graphische Repräsentation der in der Rüstmatrix hinterlegten Rüstzeiten in einem normierten Rüstfeld⁸⁵, siehe Abbildung 5.11, eingeführt.

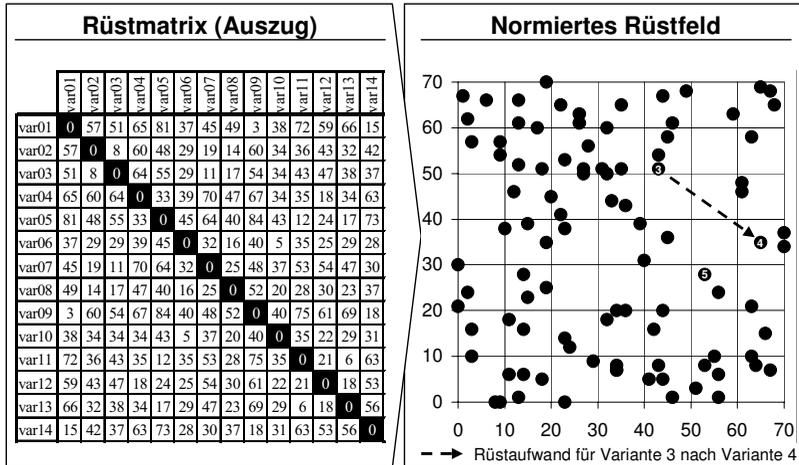


Abbildung 5.11: Rüstfeld zur Darstellung der normierten Rüstzeiten zwischen möglichen Varianten

Jeder Punkt im Rüstfeld stellt eine der möglichen Varianten i der Stufe j dar. Der Abstand zweier Punkte repräsentiert den Rüstaufwand⁸⁶ zwischen den beiden Varianten. Das zweiachsige Kennfeld erlaubt die Darstellung symmetrischer Rüstmatrizen, d.h. der Aufwand zum Umrüsten von z.B. Variante 3 auf Variante 4 ist ebenso hoch wie der Aufwand in umgekehrter Richtung. Ausgeprägte Richtungsabhängigkeiten, wie sie z.B. in einer Lackiererei (Farben von hell nach dunkel) oder einer Kaltwalzstraße (Coil von breit zu schmal) vorkommen, sind mit dem Kennfeld nicht darstellbar. Solche asymmetrischen Rüstmatrizen sind im Zusammenhang dieser Untersuchung jedoch bedeutungslos, da, sollten ausgeprägte Richtungsabhängigkeiten vorliegen, eine fixe, d.h. von den zu produzie-

⁸⁵ Normiert: die maximale Rüstzeit wird zu 100 gesetzt, alle weiteren Rüstzeiten werden entsprechend darauf bezogen.

⁸⁶ Der Aufwand kann fallabhängig in Zeit- oder in Geldeinheiten dargestellt werden. Letzteres ist dann sinnvoll, wenn neben Maschinenstillstandszeiten hohe sonstige Rüstkosten anfallen wie z.B. in Lackieranlagen, in denen hohe Kosten wegen Farbverlusten anfallen. Zur Bestimmung der Auslastung sind jedoch allein die Zeiteinheiten relevant.

5 Zeitfensterbasiertes Planungssystem mit uneinheitlichen Planungsperiodenlängen

renden Varianten unabhängige, optimale Reihenfolge existiert. Eine Reihenfolgeoptimierung ist in diesen Fällen also nicht notwendig. Des Weiteren muss die Rüstmatrix die so genannte Dreiecksungleichung erfüllen. Diese besagt, dass die Rüstzeit von einer beliebigen Variante A zu einer beliebigen anderen Variante B immer kleiner oder gleich der Summe der Rüstzeiten von der Variante A zu C und von C zu B sein muss.⁸⁷

Beide Bedingungen sind zudem Voraussetzung zur Anwendung verschiedenster Algorithmen, die zur Lösung des symmetrischen Handelsreisenderproblems entwickelt wurden. Als Handelsreisenderproblem oder Traveling Salesman Problem (TSP) wird allgemein die Bestimmung des optimalen (kürzesten) Weges über eine definierte Anzahl vorgegebener Punkte zurück zum Ausgangspunkt bezeichnet. Dies entspricht der Problemstellung der Reihenfolgebildung, wobei Rüstzeiten bzw. -kosten den Weglängen zwischen den Orten entsprechen.⁸⁸ Die graphische Repräsentation dient hier wiederum dem leichteren Verständnis (vgl. Abbildung 5.12).

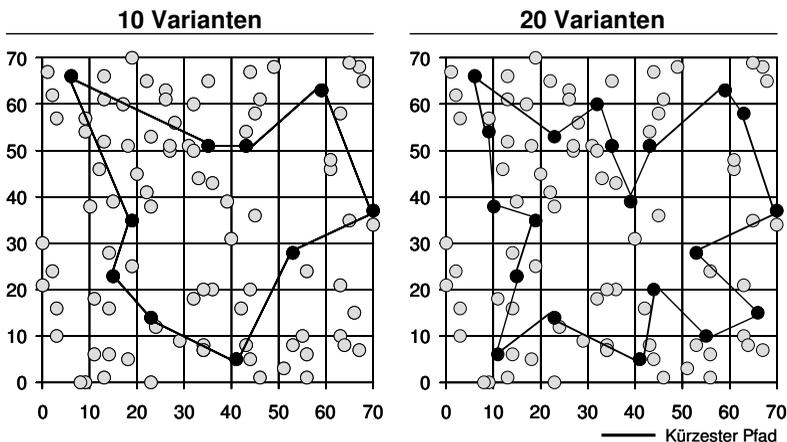


Abbildung 5.12: Vergleich der die gesamte Rüstzeit repräsentierenden Pfadlänge in Abhängigkeit der Anzahl der zu rüstenden Varianten

⁸⁷ Wobei C wiederum jede beliebige andere Variante ungleich A und B sein kann. Andernfalls wäre es besser, einen Auftrag C nach A zu rüsten, auch wenn dieser nicht vorhanden wäre, um im Anschluss daran den Auftrag B zu rüsten.

⁸⁸ Tatsächlich werden entsprechende Algorithmen zur Lösung des TSP (Traveling Salesman Problem) häufig zur Reihenfolgeoptimierung eingesetzt (vgl. hierzu SCHMITTING 2000, S. 92)

5.6 Auswirkung der Länge der Planungsperioden auf die Auslastung

So wird ersichtlich, dass mit einer zunehmenden Anzahl zu produzierender und damit zu rüstender Varianten (zu besuchender Orte) der zu durchlaufende Pfad zwar immer länger, die durchschnittlich zwischen zwei Varianten (Orten) zurückzulegende Strecke und damit die durchschnittliche Rüstzeit hingegen immer kürzer wird.

5.6.4.2 Rüstaufwandskennlinien

Um den beschriebenen Effekt quantifizieren zu können, wurden Versuchsreihen zur Bestimmung der mittleren Rüstzeit in Abhängigkeit der Länge der Planungsperiode und damit der Anzahl einzuplanender Varianten durchgeführt. Dazu wurden zufällig generierte Rüstmatrizen verwendet und die Rüstdauer der optimierten Rüstreihenfolge für verschiedene Teilmengen möglicher Varianten berechnet.

Die möglichen Teilmengen bzw. Kombinationen möglicher Varianten k je Planungsperiode aus der Menge der n Varianten ergibt sich aus der Summe der Kombination n über k mit $k \in [1, n]$ zu:

$$\text{Mögliche Kombinationen} = \sum_{k=1}^n \binom{n}{k} = \sum_{k=1}^n \frac{n!}{k!(n-k)!} \quad (43)$$

k : Anzahl der Varianten / Produkte je Planungsperiode

n : Anzahl der Varianten / Produkte insgesamt

Die Anzahl möglicher Kombinationen, für die jeweils die optimale Reihenfolge ermittelt werden muss, erreicht mit steigendem n schnell die Grenze, die noch mit vertretbarem Aufwand zu bewältigen ist (vgl. hierzu die Anzahl möglicher Kombinationen für verschiedene n in Tabelle 5.2).

n	10	20	30	40
Kombinationen	1.023	1.048.575	1.073.741.823	1.099.511.627.775

Tabelle 5.2: Anzahl möglicher Kombinationen gemäß Gleichung (43) in Abhängigkeit von n

Für jede der Kombinationen ist die optimale Reihenfolge und die durchschnittliche Rüstzeit zu bestimmen. Zur Ermittlung der optimalen Reihenfolge wurde auf einen 2-opt-Algorithmus zurückgegriffen. Dieses Verfahren gehört zur Gruppe der heuristischen Verfahren für das symmetrische Handlungsreisendenproblem

5 Zeitfensterbasiertes Planungssystem mit uneinheitlichen Planungsperiodenlängen

und hier wiederum zu den r -optimalen Verfahren⁸⁹. Ein 2-optimales Verfahren prüft in jedem Iterationsschritt, ob die Länge der Rundreise durch das Vertauschen zweier Kanten (die Verbindung zwischen zwei Punkten) verringert werden kann. Ist dies der Fall, so wird eine neue Rundreise gebildet und die Iteration beginnt von neuem. Der Algorithmus wird so lange ausgeführt, bis in einer kompletten Überprüfung aller paarweisen Vertauschungsmöglichkeiten keine Verbesserung erzielt wurde (vgl. NEUMANN & MORLOCK 2002, S. 452).

Für verschiedene Rüstmatrizen mit unterschiedlich großer Anzahl verschiedener Varianten ($n \in [20;100]$) wurden für eine zufällig generierte Stichprobe von jeweils 1000 Kombinationen Optimierungsläufe durchgeführt. Abbildung 5.13 zeigt links beispielhaft den normierten Rüstaufwand für eine Rüstmatrix mit möglichen 30 Varianten, rechts für mögliche 60 Varianten, gestrichelt dargestellt ist eine Logarithmusfunktion zur Basis e .

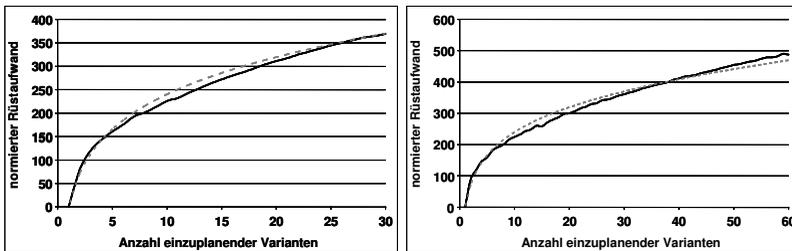


Abbildung 5.13: Rüstaufwand auf Basis normierter Rüstzeiten

Mittels Approximation der Rüstaufwandskurven durch die Logarithmusfunktion⁹⁰ kann die Kennlinie mathematisch beschrieben werden, wobei die Parametri-

⁸⁹ Heuristiken liefern im Gegensatz zu exakten Verfahren zwar nur Näherungslösungen, erzeugen jedoch nur einen polynomialen Rechenaufwand. Im Fall der Reihenfolgebildung benötigt die exakte Lösung n -Fakultät ($n!$) Rechenoperationen, wobei n die Anzahl der Orte/Varianten darstellt (exponentieller Rechenaufwand) und ist damit ein in der Praxis unlösbares Problem. R-opt-Verfahren hingegen erfordern mindestens n^2 Rechenoperationen. Die Lösungsgüte steigt mit zunehmendem r im Allgemeinen jedoch nur unwesentlich, so dass in der Praxis zumeist 2-opt- und 3-opt-Verfahren eingesetzt werden (vgl. NEUMANN & MORLOCK 2002, S. 440 ff.).

⁹⁰ Die Annäherung über eine Logarithmusfunktion ist naheliegend, da diese für 1 den Wert 0 annimmt (eine Variante entspricht keinem Rüstaufwand), monoton steigend (jede zusätzliche Variante verursacht zusätzlichen Rüstaufwand) und die zweite Ableitung der Logarithmusfunktion monoton fallend ist, somit zusätzliche Varianten bei vielen bereits vorhandenen Varianten eine immer geringer werdende Steigerung des Rüstaufwands hervorrufen.

5.6 Auswirkung der Länge der Planungsperioden auf die Auslastung

sierung über den Anpassungsparameter δ_j erfolgt, welcher wiederum von der zugrunde liegenden Rüstmatrix abhängig ist. Die mittlere Dauer je Rüstvorgang innerhalb einer Planungsperiode ergibt sich durch die Division der gesamten Rüstdauer durch die Anzahl der zu produzierenden Varianten. Mit steigender Länge der Planungsperiode T_j wird die mittlere Dauer je Rüstvorgang in der Stufe j demnach kleiner:

$$ts_{j,avg} \approx \delta_j * \frac{\ln\left(\sum_{i=1}^{n_j} (1 - q_i^{T_j})\right)}{\sum_{i=1}^{n_j} (1 - q_i^{T_j})} \quad (44)$$

- δ_j : Anpassungsparameter der Kennlinien zum Rüstaufwand
- q_i : Komplementäre Wahrscheinlichkeit der Variante bzw. des Produktes i
- T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit
- $ts_{j,avg}$: Mittlere Rüstzeit je Rüstvorgang in der Stufe j

Die Rüstdauer je Planungsperiode ergibt sich aus der Multiplikation der mittleren Rüstzeit je Rüstvorgang mit der Anzahl der Rüstvorgänge je Periode näherungsweise zu:

$$TS_{j,avg} \approx \delta_j * \ln\left(\sum_{i=1}^{n_j} (1 - q_i^{T_j})\right) \quad (45)$$

- δ_j : Anpassungsparameter der Kennlinien zum Rüstaufwand
- q_i : Komplementäre Wahrscheinlichkeit der Variante bzw. des Produktes i
- T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit
- $TS_{avg,j}$: Mittlere Rüstdauer je Periode in der Stufe j

5.6.4.3 Parametrisierung der Rüstaufwandskennlinien

Zur Parametrisierung der Kennlinien wurde die Kurvenanpassung (Curvefit) des Statistikprogramms SPSS[®] genutzt. Hierfür wurden 100 verschiedene Rüstmatrizen mit 16 Varianten vollständig enumeriert und die resultierenden Kennlinien mit nachstehendem logarithmischem Modell mit dem Anpassungsparameter δ angenähert.

$$TS(k) = \delta * \ln(k) \quad (46)$$

- δ : Anpassungsparameter der Kennlinien zum Rüstaufwand
- k : Anzahl der Varianten bzw. Produkte
- $TS(k)$: Rüstdauer für k Varianten bzw. Produkte

5 Zeitfensterbasiertes Planungssystem mit uneinheitlichen Planungsperiodenlängen

Fall	R ²	F	Sigf	δ	Fall	R ²	F	Sigf	δ
1	1,000	53693	0,000	93,89	51	0,998	6590	0,000	83,37
2	0,999	17245	0,000	112,84	52	0,999	19153	0,000	99,22
3	0,999	19004	0,000	87,65	53	0,999	11194	0,000	82,48
4	0,999	26095	0,000	78,16	54	0,997	4239	0,000	93,59
5	0,999	20846	0,000	90,51	55	1,000	32686	0,000	103,15
6	0,999	25175	0,000	102,68	56	1,000	83264	0,000	82,26
7	0,999	9825	0,000	93,55	57	0,996	3676	0,000	93,36
8	0,999	23307	0,000	89,80	58	0,999	24579	0,000	103,95
9	0,995	2598	0,000	87,29	59	0,999	26229	0,000	97,06
10	0,998	8008	0,000	86,12	60	0,998	7821	0,000	92,62
11	0,995	3023	0,000	87,84	61	0,998	6793	0,000	87,91
12	0,998	7903	0,000	100,67	62	0,996	3377	0,000	85,73
13	0,999	10774	0,000	89,56	63	0,999	9886	0,000	92,15
14	0,998	8213	0,000	90,94	64	0,997	4303	0,000	89,61
15	0,999	16186	0,000	94,75	65	0,999	10332	0,000	110,03
16	0,999	10045	0,000	87,94	66	0,999	16156	0,000	91,34
17	0,999	16038	0,000	95,36	67	0,998	7124	0,000	88,29
18	0,999	17669	0,000	98,79	68	0,999	12130	0,000	102,34
19	1,000	31148	0,000	93,57	69	0,995	3011	0,000	85,91
20	1,000	30500	0,000	95,45	70	0,999	19415	0,000	98,95
21	1,000	44455	0,000	102,87	71	1,000	30102	0,000	90,51
22	0,995	2822	0,000	86,37	72	0,999	16554	0,000	94,00
23	0,999	17043	0,000	93,00	73	0,999	16102	0,000	92,52
24	0,996	3356	0,000	88,24	74	1,000	31028	0,000	86,68
25	0,999	13130	0,000	86,27	75	0,999	23051	0,000	86,08
26	0,999	13869	0,000	86,59	76	1,000	121327	0,000	109,09
27	0,999	15766	0,000	92,21	77	0,999	14158	0,000	93,62
28	0,999	26665	0,000	93,87	78	0,999	14418	0,000	91,53
29	1,000	51338	0,000	93,28	79	1,000	58136	0,000	82,20
30	0,999	9642	0,000	79,94	80	0,999	12370	0,000	97,37
31	1,000	50636	0,000	91,32	81	0,996	3842	0,000	87,32
32	0,999	14440	0,000	99,71	82	0,997	5025	0,000	94,03
33	0,998	8820	0,000	96,19	83	0,998	9066	0,000	94,60
34	0,999	16999	0,000	97,79	84	1,000	65980	0,000	90,74
35	0,997	5582	0,000	100,37	85	0,999	19607	0,000	94,52
36	1,000	38160	0,000	96,19	86	0,999	12025	0,000	89,61
37	0,998	6036	0,000	93,74	87	0,999	13018	0,000	93,38
38	0,997	4971	0,000	106,88	88	0,999	11638	0,000	92,03
39	0,998	8953	0,000	79,84	89	0,999	27350	0,000	96,09
40	0,999	18039	0,000	97,19	90	0,998	5636	0,000	90,19
41	0,998	9140	0,000	87,64	91	0,999	9657	0,000	99,40
42	0,999	9837	0,000	81,96	92	0,999	20654	0,000	97,14
43	1,000	29605	0,000	88,47	93	1,000	29252	0,000	94,87
44	0,998	8346	0,000	92,97	94	0,998	7012	0,000	94,11
45	0,999	14239	0,000	89,85	95	0,996	3694	0,000	89,81
46	1,000	32783	0,000	93,43	96	0,999	22114	0,000	87,96
47	0,997	4524	0,000	90,19	97	0,998	8025	0,000	95,29
48	0,999	10715	0,000	86,84	98	0,998	6845	0,000	96,86
49	0,999	14101	0,000	80,29	99	0,999	10945	0,000	100,52
50	0,999	12356	0,000	99,95	100	0,998	7686	0,000	96,32

R² : Bestimmtheitsmaß oder Determinationskoeffizient
 F : F-Wert, Wert der Teststatistik
 Sigf : Signifikanzniveau
 δ : Anpassungsparameter der Kennlinien zum Rüstaufwand

Tabelle 5.3: Parametrisierung der Rüstaufwandkurven mittels Kurvenanpassung

Die Ergebnisse für den Anpassungsparameter δ sowie die statistischen Messgrößen Bestimmtheitsmaß⁹¹, F-Wert⁹² und Signifikanzniveau⁹³ für die 100 untersuchten Fälle sind Tabelle 5.3 zu entnehmen. Das gewählte Modell zeigt dabei durchgängig eine hochsignifikante Korrelation mit den ermittelten Kennlinien. Eine Parametrisierung der Kennlinien ist demnach über das beschriebene Modell einfach möglich.

5.6.4.4 Grenzwertbetrachtung

Für den Fall C kann neben der Verringerung der Anzahl der Rüstvorgänge durch größere Lose demnach auch die durchschnittliche Dauer je Rüstvorgang durch die Länge der Planungsperiode beeinflusst werden (vgl. Abbildung 5.14).

Wiederum gilt, dass sich die Anzahl der zu produzierenden Varianten für große T_j der Gesamtanzahl der Varianten der Stufe j annähert, und damit ergibt sich:

$$\lim_{T_j \rightarrow \infty} (ts_{j,avg}) \approx \delta_j * \frac{\ln(n_j)}{n_j} \quad (47)$$

Dies bedeutet, dass bei zunehmender Länge der Planungsperiode T_j der Einfluss der Rüstoptimierung abnimmt, da alle Varianten in jedem Produktionszyklus produziert werden und eine fixe optimale Reihenfolge etabliert werden kann. Eine Vergrößerung von T_j reduziert die Gesamtdauer der Rüstvorgänge dann allein durch die Reduktion der Anzahl von Planungszyklen und somit den Losgrößeneffekt.

⁹¹ Das Bestimmtheitsmaß gibt an, in welchem Maße die Varianz der abhängigen Variablen durch die Varianz der erklärenden Variablen bestimmt wird. R^2 kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Je größer R^2 desto höher die Vorhersagegenauigkeit für die abhängige Variable (HAIR ET AL. 1995, S. 143).

⁹² Der F-Wert ist das Verhältnis von Summe der Fehlerquadrate der Regression zur Summe der Fehlerquadrate der Mittelwertschätzung. Je größer F, desto besser erklären die Regressionsparameter die abhängige Variable (HAIR ET AL. 1995, S. 181 f.).

⁹³ Das Signifikanzniveau bezeichnet die Wahrscheinlichkeit, dass die Nullhypothese, welche besagt, dass der beobachtete Zusammenhang rein zufällig ist, zu Unrecht abgelehnt wird. Bei einem Signifikanzniveau kleiner 0,05 bzw. kleiner 5% spricht man i.d.R. von signifikanten Ergebnissen, ist dieses kleiner 0,01 bzw. kleiner 1% so spricht man i.d.R. von hochsignifikanten Ergebnissen (HAIR ET AL. 1995, S. 327 ff.).

5 Zeitfensterbasiertes Planungssystem mit uneinheitlichen Planungsperiodenlängen

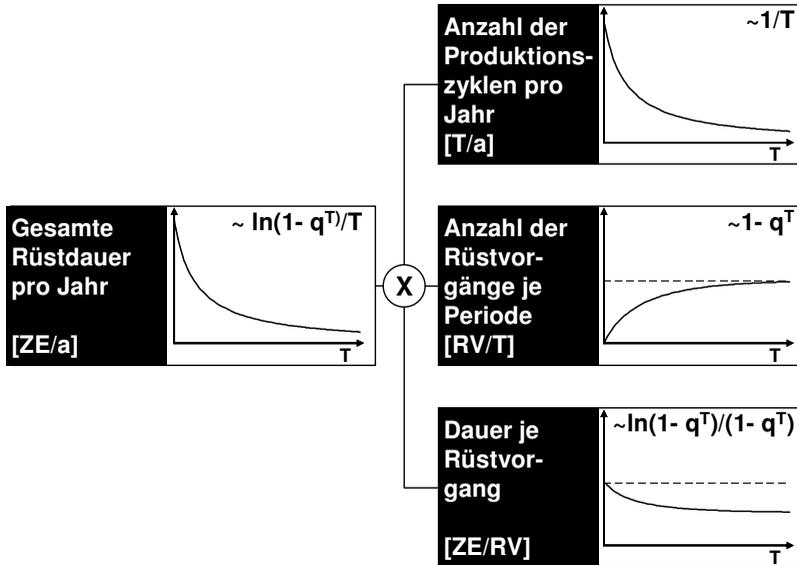


Abbildung 5.14: Beeinflussung der Rüstdauer pro Jahr durch die Planungsperiodenlänge T für den Fall C

5.7 Auswirkung der Länge der Planungsperioden auf die Termintreue

Termintreue bezeichnet die Fähigkeit eines Unternehmens, die gegenüber seinen Kunden zugesagten Termine einzuhalten. Werden Aufträge nicht zum zugesagten Termin, d.h. zu früh oder zu spät⁹⁴, geliefert, oder entspricht die gelieferte Menge nicht der vereinbarten Liefermenge, so ist das Unternehmen lieferuntreu. Im Weiteren werden ausschließlich zu späte Lieferungen oder die Lieferung zu geringer Mengen betrachtet. Verfrühte Lieferungen lassen sich in der Praxis durch entsprechend verzögerten Versand der Ware jederzeit einfach verhindern⁹⁵.

⁹⁴ Je nach Branche ist "zu früh" bzw. "zu spät" durchaus unterschiedlich definiert. So sind in der Automobilindustrie Lieferungen Just-in-Sequence (JIS) üblich und die Erfassung erfolgt minutengenau. In der Stahlindustrie hingegen werden z.T. Lieferungen innerhalb eines Zeitraums einer Woche vereinbart, die Genauigkeit der Erfassung der Anlieferzeit liegt demnach bei $\pm 2-3$ Tagen.

⁹⁵ Langfristig führt dies allerdings intern zu hohen Beständen.

5.7 Auswirkung der Länge der Planungsperioden auf die Termintreue

Eine zu späte Auslieferung von Aufträgen kann prinzipiell zwei Gründe haben:

- Der geplante Liefertermin und somit der Produktionsplan war von Anfang an nicht realisierbar oder
- Abweichungen in den der Planung zugrunde liegenden Annahmen haben die Durchführung des Plans soweit verhindert, dass die zugesagte Menge zum zugesagten Termin nicht fertig gestellt werden konnte.

Im ersten Fall wurden Termine zugesagt, die nicht zu realisieren waren, sei es aus Unwissen der zugrunde liegenden Restriktionen⁹⁶ oder wissentlich, um Aufträge zu erhalten. Letzteres kann von der Produktionsplanung nicht beeinflusst werden. Ersteres lässt sich mittels Planungsperioden insofern verbessern, als die Einfachheit des Planungsansatzes eine höhere Transparenz der verfügbaren Kapazität ermöglicht.

Lässt die Planung eines Produktionsauftrages hingegen zunächst die geforderten Termine als realisierbar erscheinen, können unvorhergesehene Ereignisse die termingetreue Auslieferung dennoch verhindern. Zu diesen Ereignissen zählen unter anderem jegliche Störungen im Betriebsablauf wie z.B. Maschinenausfälle, Streiks, ungeplante Instandhaltungsarbeiten, Engpässe in der Materialversorgung oder Qualitätsprobleme, welche wiederum zur Verlangsamung der Maschinen oder zu Ausfällen führen, Zweitläufe notwendig machen oder zur Verschrottung und damit Nacharbeit führen. Diese Ereignisse vermindern den Durchsatz des Produktionssystems. Ist es nicht möglich, entsprechende Ersatzkapazitäten, z.B. durch Fremdvergabe oder Überstunden, bis zur Auslieferung der entsprechenden Aufträge bereitzustellen, so kommt es zu Terminverzug. Solche stochastischen Einflüsse werden nicht durch die Ausgestaltung der Planungsfreiräume beeinflusst⁹⁷. Es ist jedoch anzunehmen, dass aufgrund der geringeren Belegungszeiten der Maschinen für größere Planungsfreiräume eher die Möglichkeit besteht, diese stochastischen Ereignisse abzufedern⁹⁸. Dies kann aber nicht der Grund für die

⁹⁶ Mögliche Restriktionen können z.B. die Verfügbarkeit von Materialien, Kapazitäten und Fähigkeiten sein.

⁹⁷ So werden z.B. Maschinenausfälle unabhängig von der Größe des Planungsfreiraums auftreten.

⁹⁸ Simulationsuntersuchungen von STEELE & MALHOTRA 1997 sowie YANG & JACOBS 1992 zeigen in der Tat einen positiven Effekt der Länge der Planungsperioden auf die Termintreue. So berichten STEELE & MALHOTRA 1997 über die Simulation eines mehrstufigen Produktionssystems mit fünf verschiedenen Periodenlängen (drei bis sieben Tage). Die Autoren beschreiben, dass mit steigender Länge der Planungsperiode die durchschnittliche Verspätung (mean tardiness) rapide sinkt, die Termintreue also steigt. Eben-

5 Zeitfensterbasiertes Planungssystem mit uneinheitlichen Planungsperiodenlängen

Einführung von Planungsfreiräumen sein, da sonst die Fehlerursachen, z.B. mangelnde Wartung oder fehlerhafte Bedienung, auf Dauer fortbestehen und deren Auswirkungen verschleiert werden würden. In der Auslegung der Planungsperiodenlänge für die einzelnen Stufen der Wertschöpfungskette, die im folgenden Kapitel beschrieben wird, spielt die Termintreue demnach keine Rolle.

5.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

In den vorangegangenen Abschnitten wurde ein zeitfensterbasiertes Planungssystem mit variablen Planungsperiodenlängen vorgestellt. Des Weiteren wurden die Abhängigkeiten zwischen Planungsperiodenlänge und den logistischen Kenngrößen Durchlaufzeit, Bestand, Auslastung und Termintreue untersucht und für die drei erstgenannten entsprechende mathematische Formulierungen zur Quantifizierung der entsprechenden Effekte hergeleitet.

Durch die Verwendung uneinheitlicher Planungsperiodenlängen wird die Einführung eines Startverzuges tv_j für einzelne Stufen j der Wertschöpfungskette notwendig, der sich nach Gleichung (24) wie folgt ergibt:

$$tv_{j-1} = \max \left(n * T_{j-1} - \left\lfloor \frac{n * T_{j-1}}{T_j} \right\rfloor * T_j \right) + T_{j-1} = T_j - ggT(T_j, T_{j-1}) + T_{j-1} \quad (24)$$

- T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit
 $ggT(x,y)$: Größter gemeinsamer Teiler von x und y
 tv_{j-1} : Startverzug der Stufe $j-1$

Die Auswirkung der Länge der Planungsperiode auf die mittlere Durchlaufzeit der gesamten Wertschöpfungskette ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel der maximalen sowie der minimalen Durchlaufzeit nach Gleichung (29) zu:

$$LT_{m,avg} = \frac{1}{2} T_m + \sum_{j=1}^m (T_j - ggT(T_j, T_{j-1}) + T_{j-1}) \quad (29)$$

- $ggT(x,y)$: Größter gemeinsamer Teiler von x und y
 $LT_{m,avg}$: Durchschnittliche Durchlaufzeit der Wertschöpfungskette ab Stufe m
 T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit
-

falls in einer Simulationsstudie zeigen YANG & JACOBS 1992, dass, unter Beibehaltung aller anderen Systemvariablen, mit steigender Länge der Planungsperiode die Terminabweichung im Mittel sowie deren Standardabweichung und der Anteil verspäteter Lieferungen signifikant kleiner werden. Die Autoren merken jedoch an, dass die Verbesserung der Termintreue zu Lasten einer verlängerten Lieferzeit gehe.

Der Bestand je Wertschöpfungsstufe, unterteilt in WIP und FGI, wird durch die Planungsperiodenlänge entsprechend Gleichung (37) beeinflusst:

$$I_{j,avg} = I_{j,avg} * d = \underbrace{T_j}_{WIP} * d + \underbrace{(1/2 * T_j + 1/2 * T_{j-1} - ggT(T_j, T_{j-1}))}_{FGI} * d \quad (37)$$

- d : Bedarf je Standardzeiteinheit
- $ggT(x,y)$: Größter gemeinsamer Teiler von x und y
- $I_{j,avg}$: Durchschnittlicher Bestand in der Stufe j
- $h_{j,avg}$: Durchschnittliche Durchlaufzeit der Stufe j
- T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit

Die Auswirkungen der Planungsperiodenlänge auf die Auslastung resultieren aus der Rüstdauer pro Jahr und Wertschöpfungsstufe und sind für die drei untersuchten Fälle A, B und C unterschiedlich. Die Rüstdauer pro Jahr ergibt sich als Produkt aus der Anzahl der Produktionszyklen pro Jahr, der Anzahl der Rüstvorgänge je Planungsperiode und der Dauer je Rüstvorgang. Für die drei Fälle ergeben sich unterschiedliche Abhängigkeiten, die in Tabelle 5.4 zusammengefasst sind:

Fall	Anzahl der Produktionszyklen pro Jahr	Anzahl der (durchschnittlichen) Rüstvorgänge je Planungsperiode	Durchschnittliche Dauer je Rüstvorgang
A	$PZ_j = \frac{1}{T_j}$	$RV_j = const.$	$ts_{j,avg} = const.$
B	$PZ_j = \frac{1}{T_j}$	$RV_{j,avg} = \sum_{i=1}^{n_j} (1 - q_i^{T_j})$	$ts_{j,avg} = const.$
C	$PZ_j = \frac{1}{T_j}$	$RV_{j,avg} = \sum_{i=1}^{n_j} (1 - q_i^{T_j})$	$ts_{j,avg} \approx \delta_j * \frac{\ln\left(\sum_{i=1}^{n_j} (1 - q_i^{T_j})\right)}{\sum_{i=1}^{n_j} (1 - q_i^{T_j})}$

- PZ_j : Anzahl der Produktionszyklen pro Jahr in der Stufe j
- q_i : Komplementäre Wahrscheinlichkeit der Variante bzw. des Produktes i
- RV_j : Anzahl der Rüstvorgänge je Planungsperiode in der Stufe j
- T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit
- $ts_{j,avg}$: Durchschnittliche Rüstzeit je Rüstvorgang in der Stufe j

Tabelle 5.4: *Beeinflussung der Rüstdauer pro Jahr durch die Länge einer Planungsperiode für die Fälle A, B und C*

5 Zeitfensterbasiertes Planungssystem mit uneinheitlichen Planungsperiodenlängen

Mit Hilfe der hergeleiteten Gleichungen kann im folgenden Kapitel ein Minimierungsproblem für die Gesamtkosten der Wertschöpfungskette in Abhängigkeit der verschiedenen Planungsperiodenlängen formuliert werden. Dieses bildet den Kern des Verfahrens zur optimierten Auslegung der Planungsperiodenlänge in zeitfensterbasierten Planungssystemen für Wertschöpfungsketten.

6 Verfahren zur Auslegung der Planungsperiodenlänge

6.1 Allgemeines

Nach der Herleitung der Wirkzusammenhänge zwischen der Planungsperiodenlänge und den logistischen Kenngrößen Durchlaufzeit, Bestand, Auslastung und Termintreue in Kapitel 5 können diese zur Auslegung der Länge der Planungsperiode der einzelnen an der Wertschöpfung beteiligten Stufen genutzt werden. Hierfür wird in Abschnitt 6.2 das zentrale Minimierungsproblem für die Gesamtkosten der Wertschöpfungskette formuliert. In den beiden Abschnitten 6.3 und 6.4 sind die Nebenbedingungen des Minimierungsproblems dargestellt und für die einzelnen betrachteten Fälle differenziert.

Abschnitt 6.5 und Abschnitt 6.6 sind der Herleitung der zwei Bestandteile der Gesamtkosten, also der Bestands- sowie der Rüstkosten in der Wertschöpfungskette, gewidmet. Im Anschluss daran werden in Abschnitt 6.7 beide Elemente in den Bestimmungsgleichungen für die Gesamtkosten in Abhängigkeit der Länge einer Planungsperiode für die Fälle A, B und C (siehe Abschnitt 5.2.6) zusammengefasst.

Der Lösungsalgorithmus und das darauf basierende Rechnerwerkzeug werden in Abschnitt 6.8 vorgestellt. Es folgt eine Beschreibung der Leistungsfähigkeit des Prototyps hinsichtlich des möglichen Umfangs des zu lösenden Problems sowie der hierfür benötigten Rechenzeiten bevor das Kapitel in Abschnitt 6.9 mit einem Fallbeispiel zur Optimierung anhand einer Wertschöpfungskette aus der Automobilindustrie schließt.

6.2 Formulierung des Minimierungsproblems

Als Optimierungskriterium für die Wertschöpfungskette sind die logistischen Zielgrößen Durchlaufzeit, Bestand und Auslastung monetär zu bewerten. Das Optimierungsproblem lässt sich anschließend, wie in Gleichung (48) dargestellt, als Minimierungsproblem formulieren.

Bestände und Durchlaufzeiten werden über die Bestandskosten erfasst, die Auslastung ist über die Rüstkosten berücksichtigt. Wie in Abschnitt 5.7 dargelegt,

6 Verfahren zur Auslegung der Planungsperiodenlänge

lässt sich die Termintreue mathematisch nicht abbilden, eventuell durch einen Mangel derselben entstehende Kosten⁹⁹ bleiben daher unbeachtet. Die Gesamtkosten ergeben sich demnach als Summe aus Rüst- und Bestandskosten entlang der Kette und das Optiierungsproblem lautet:

$$\text{Minimiere } TC = \sum_{j=1}^m SC_j + \sum_{j=1}^m IC_j \quad (48)$$

IC_j : Bestandskosten (Inventory Costs) der Stufe j
 m : Anzahl der Stufen der Wertschöpfungskette
 SC_j : Rüstkosten (Setup Costs) der Stufe j
 TC : Gesamtkosten (Total Costs)

Folgende Nebenbedingungen sind bei der Lösung des Minimierungsproblems zu beachten:

$$T_j \geq 1, \quad T_j \in \mathbb{N} \quad (49)$$

$$LT_{\max} \leq H \quad (50)$$

$$T_j \geq TS_j + TP_j \quad (51)$$

H : Planungshorizont der Wertschöpfungskette
 LT_{\max} : Maximale Durchlaufzeit der Lieferkette
 TP_j : Gesamte Bearbeitungszeit einer Planungsperiode in der Stufe j
 TS_j : Gesamte Rüstzeit (Setup) einer Planungsperiode in der Stufe j

Die erste Nebenbedingung, Ungleichung (49), stellt sicher, dass die einzelnen Zeitfenster ganzzahlige Werte größer null annehmen. Ob als Zeiteinheit Tage, Schichten oder Stunden gewählt werden, ist dabei unerheblich, solange diese konsequent für alle Zeitfenster Verwendung finden.

Die Informationsverfügbarkeitsnebenbedingung (50) bedeutet, dass die maximale Auftragsdurchlaufzeit ab der j -ten Stufe kleiner oder gleich jener Zeitspanne ist, für welche die relevanten Planungsdaten vorliegen, der so genannten "frozen zone"¹⁰⁰. Die maximale Auftragsdurchlaufzeit darf diese Zeitspanne nicht überschreiten, da sonst zu Beginn der Produktion im entsprechenden Fenster der j -ten Stufe der Wertschöpfungskette nicht feststehen würde, was zu produzieren ist.

⁹⁹ Mögliche Kosten wären z.B. Pönalen, die in den in dieser Arbeit betrachteten Wertschöpfungsketten jedoch allenfalls an den Endkunden zu entrichten wären.

¹⁰⁰ Im Falle der deutschen Automobilindustrie sind dies in der Regel minimal zehn Tage vor der Endmontage des Fahrzeuges (vgl. z.B. SEMMELROGGEN 1999, S. 9).

Mit der dritten Nebenbedingung, der Kapazitätsnebenbedingung aus Gleichung (51), wird sichergestellt, dass innerhalb eines Zeitfensters die nachgefragte Menge produziert werden kann, bzw. dass ausreichend Kapazitäten vorhanden sind¹⁰¹. In den folgenden Absätzen werden die Nebenbedingungen (50) und (51) näher untersucht.

6.3 Informationsverfügbarkeitsnebenbedingung

Die Informationsverfügbarkeitsnebenbedingung besagt, dass die maximale Auftragsdurchlaufzeit den fixierten Planungshorizont der Supply Chain nicht überschreiten darf, da der deterministische Planungsansatz eine Produktion basierend auf Prognosen verbietet.

Die sich aus der Kombination der Planungsfreiräume der einzelnen Stufen ergebende maximale Auftragsdurchlaufzeit kann nach den in Abschnitt 5.4 dargelegten Gleichungen berechnet werden. Hierzu sind die verschiedenen Permutationen der Ausgestaltung der Planungsfreiräume entlang der Kette zu berechnen und zu überprüfen. Der theoretische Lösungsraum beträgt dabei:

$$\text{Anzahl der Permutationen} = H^m \quad (52)$$

H : Planungshorizont der Wertschöpfungskette

m : Anzahl der Stufen der Wertschöpfungskette

Zur Einschränkung der Anzahl der zu untersuchenden Lösungen müssen geeignete untere und obere Schranken definiert werden. Die untere Schranke wird durch die minimale Planungsperiodenlänge der einzelnen Stufen bestimmt, welche die Kapazitätsnebenbedingung erfüllt.

Zur Abschätzung der oberen und unteren Grenze der Planungsperiode je Stufe bei gegebenem Planungshorizont H wird der Begriff der Produktivzeit eingeführt. Die Produktivzeit sei die Summe aller Planungsfreiräume entlang der Kette und stellt jenen Anteil der Auftragsdurchlaufzeit dar, in dem der Auftrag bearbeitet werden kann¹⁰².

¹⁰¹ HAHM & YANO (HAHM & YANO 1995, S. 116) bezeichnen dies als capacity constraint

¹⁰² Kann deshalb, da jeder Auftrag nur für einen gewissen Abschnitt der Planungsperiode wirklich bearbeitet wird, den Rest der Planungsperiode jedoch auf Bearbeitung bzw. auf den Weitertransport zu nächsten Stufe wartet.

6 Verfahren zur Auslegung der Planungsperiodenlänge

Es gilt:

$$P = \sum_{j=1}^m T_j \quad (53)$$

P : Produktivzeit

Die Differenz von Auftragsdurchlaufzeit und Produktivzeit ist Wartezeit, die sich aufgrund der Konstellation der einzelnen Planungsperioden ergibt:

$$W_{avg} = LT_{avg} - P = LT_{avg} - \sum_{j=1}^m T_j \quad (54)$$

W_{avg} : Mittlere Wartezeit

Mit den beiden neu eingeführten Größen kann die mittlere Durchlaufzeit der Wertschöpfungskette nach Gleichung (29) nun wie folgt interpretiert werden:

$$LT_{avg} = \underbrace{\sum_{j=1}^m (T_j)}_{\text{Produktivzeit}} + \frac{1}{2} T_m + \underbrace{\sum_{j=1}^m (T_{j-1} - ggT(T_j, T_{j-1}))}_{\text{Mittlere Wartezeit}} \quad (55)$$

$ggT(x,y)$: Größter gemeinsamer Teiler von x und y

LT_{avg} : Durchschnittliche Durchlaufzeit der Wertschöpfungskette

T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe m

Abbildung 6.1 stellt den Zusammenhang zwischen den einzelnen Komponenten der Auftragsdurchlaufzeit dar.

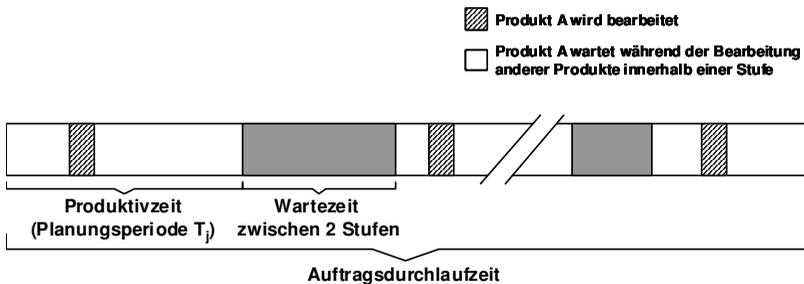


Abbildung 6.1: Zusammensetzung der Auftragsdurchlaufzeit

Aus Gleichung (55) ist ersichtlich, dass bei gegebener Produktivzeit die minimale Auftragsdurchlaufzeit dann erzielt wird, wenn die jeweiligen Planungsperioden der Stufen der Supply Chain identisch sind, also $T_j = T \forall T_j$ ist. In diesem Fall gilt:

$$\sum_{j=1}^m T_j = m * T \quad \text{da } T_j = T \quad \forall T_j \quad (56)$$

T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe m
 T : Länge der Planungsperiode aller Stufen der Wertschöpfungskette
 m : Anzahl der Stufen der Wertschöpfungskette

Aus Gleichung (27) folgt damit:

$$\begin{aligned}
 LT_{m,\max} &= LT_{m-1,\max} + 2T - ggT(T, T) = LT_{m-1,\max} + T \\
 LT_{m-1,\max} &= LT_{m-2,\max} + 2T - ggT(T, T) = LT_{m-2,\max} + T \\
 &\vdots \\
 LT_{1,\max} &= T + T - ggT(T, T) - T = 2T
 \end{aligned} \quad (57)$$

$$\text{mit } ggT(T, T) = T$$

$ggT(x,y)$: Größter gemeinsamer Teiler von x und y
 $LT_{m,\max}$: Maximale Durchlaufzeit der Wertschöpfungskette ab Stufe m
 T : Länge der Planungsperiode aller Stufen der Wertschöpfungskette

und somit ergibt sich die minimale Auftragsdurchlaufzeit:

$$\min(LT) = (m + 1) * T \quad (58)$$

LT : Durchlaufzeit der Wertschöpfungskette
 m : Anzahl der Stufen der Wertschöpfungskette

Für den allgemeinen Fall uneinheitlicher Längen der Planungsperioden ergibt sich, unter Einbeziehung des Zusammenhangs nach Gleichung (58), die untere Schranke der Auftragsdurchlaufzeit für minimale Planungsperiodenlängen je Stufe zu:

$$\min(LT) \geq (m + 1) * T_{avg} = (m + 1) * \frac{\sum_{j=1}^m T_{j,\min}}{m} = \frac{(m + 1)}{m} * \sum_{j=1}^m T_{j,\min} \quad (59)$$

LT : Durchlaufzeit der Wertschöpfungskette
 m : Anzahl der Stufen der Wertschöpfungskette
 $T_{j,\min}$: Minimale Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit

Sollte die minimale Auftragsdurchlaufzeit größer als der Planungshorizont H sein, so existiert für die untersuchte Kette keine zulässige Lösung. Zur Überwindung dieses Problems bieten sich drei Möglichkeiten:

1. Erhöhung der Kapazität in einer oder mehreren Stufen und damit die Reduktion von $T_{j,\min}$,

6 Verfahren zur Auslegung der Planungsperiodenlänge

2. Reduktion der in der deterministischen Planung berücksichtigten Kettenglieder m , Entkopplung vorgelagerter Stufen durch Lagerbestände und prognosegetriebene Produktion in diesem Teil der Supply Chain und/oder
3. Erhöhung der Informationsdurchlaufzeit durch ein früheres Einfrieren der Kundenaufträge.

Die obere Grenze für die einzelnen Planungsperioden T_j kann ebenfalls über das Verhältnis von Produktivzeit zu Auftragsdurchlaufzeit, den Produktivgrad μ , ermittelt werden. Der Produktivgrad sei definiert als:

$$\mu = \frac{P}{LT_{avg}} = \frac{\sum_{j=1}^m T_j}{LT_{avg}} = \frac{LT_{avg} - W_{avg}}{LT_{avg}} = 1 - \frac{\frac{1}{2}T_m + \sum_{j=1}^m T_{j-1} - \sum_{j=1}^m ggT(T_j, T_{j-1})}{LT_{avg}} \quad (60)$$

- $ggT(x,y)$: Größter gemeinsamer Teiler von x und y
 LT_{avg} : Durchschnittliche Durchlaufzeit der Wertschöpfungskette
 P : Produktivzeit
 T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe m
 W_{avg} : Mittlere Wartezeit
 μ : Produktivgrad

Aus Gleichung (60) geht hervor, dass der Produktivgrad maximal wird, wenn die Summe der $ggT(T_j, T_{j-1})$ (größter gemeinsamer Teiler der Planungsperioden) maximal ist. Dies entspricht wiederum dem Fall identischer Planungsperioden für alle Stufen der Kette. Die minimale Auftragsdurchlaufzeit ergibt sich nach Gleichung (59) in diesem Fall zu:

$$\min(LT) = \frac{(m+1)}{m} * \sum_{j=1}^m T_{j,\min} \quad (61)$$

- LT : Durchlaufzeit der Wertschöpfungskette
 m : Anzahl der Stufen der Wertschöpfungskette
 $T_{j,\min}$: Minimale Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit

und somit der maximale Produktivgrad zu:

$$\mu_{\max} = \frac{\sum_{j=1}^m T_j}{(m+1) * \sum_{j=1}^m T_j} = \frac{m}{(m+1)} \quad (62)$$

- m : Anzahl der Stufen der Wertschöpfungskette
- T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit
- μ_{\max} : Maximaler Produktivgrad

Demzufolge ist der maximale Produktivgrad nur von der Anzahl der Kettenglieder abhängig. Im Falle einer dreistufigen Supply Chain beträgt demnach das maximale Verhältnis von Produktivzeit zur Auftragsdurchlaufzeit 75%. Abbildung 6.2 zeigt beispielhaft die Produktivzeit über der Auftragsdurchlaufzeit für eine dreistufige Kette bei unterschiedlichen Kombinationen der jeweiligen Planungsperiodenlängen T_j .

Produktivzeit
in Zeiteinheiten

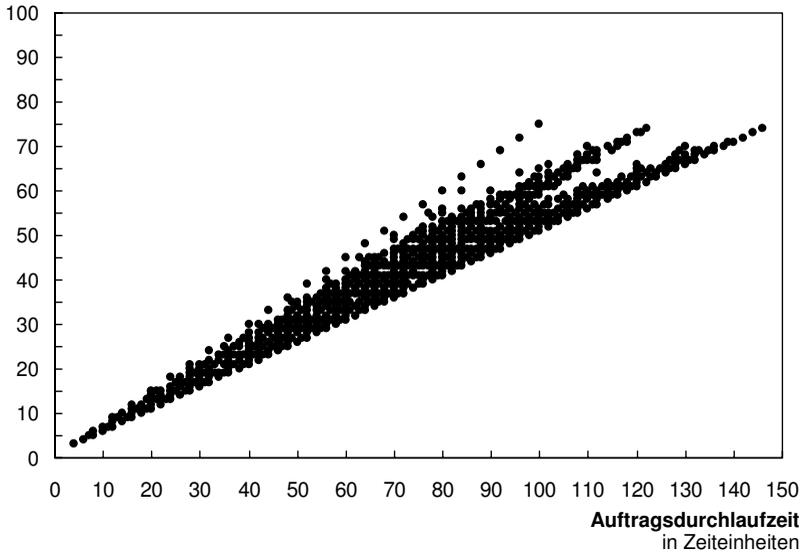


Abbildung 6.2: Produktivzeit über Auftragsdurchlaufzeit am Beispiel einer dreistufigen Kette bei unterschiedlichen Kombinationen der T_j

6 Verfahren zur Auslegung der Planungsperiodenlänge

Als obere Grenze der Produktivzeit und damit der Summe der einzelnen Planungsperioden kann daher folgende Gleichung gesetzt werden:

$$P_{\max} = \sum_{j=1}^m T_j \leq \frac{m}{(m+1)} * H = \mu_{\max} * H \quad (63)$$

H : Planungshorizont der Wertschöpfungskette

m : Anzahl der Stufen der Wertschöpfungskette

P_{\max} : Maximale Produktivzeit

T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit

μ_{\max} : Maximaler Produktivgrad

Als untere Grenze der Produktivzeit P , also P_{\min} , ergibt sich aus der Summe der minimalen Planungsperioden der einzelnen Stufen:

$$P_{\min} = \sum_{j=1}^m T_{j,\min} \quad (64)$$

P_{\min} : Minimale Produktivzeit

$T_{j,\min}$: Minimale Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit

Für die maximale Länge der Planungsperiode einer einzelnen Stufe f , $T_{f,\max}$, gilt, dass diese maximal so groß wie die maximale Produktivzeit P_{\max} abzüglich der minimalen Planungsperiodenlänge der anderen Stufen sein kann. Damit gilt:

$$\begin{aligned} T_{f,\max} &\leq P_{\max} - \left(\sum_{j=1}^{f-1} T_{j,\min} + \sum_{j=f+1}^m T_{j,\min} \right) = \\ &= \frac{m}{(m+1)} * H - \sum_{j=1}^m T_{j,\min} + T_{f,\min} \quad \text{mit } f \in [1, m] \end{aligned} \quad (65)$$

H : Planungshorizont der Wertschöpfungskette

m : Anzahl der Stufen der Wertschöpfungskette

P_{\max} : Maximale Produktivzeit

$T_{j,\min/\max}$: Minimale/maximale Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit

6.4 Kapazitätsnebenbedingung

6.4.1 Kapazitätsnebenbedingung im Basisfall

Für den Fall A, vergleiche hierzu Abschnitt 5.2.6, kann nach HAHM & YANO (HAHM & YANO 1995, S. 116) folgende Formulierung verwendet werden:

$$T_j \geq \underbrace{\sum_{i=1}^{n_j} ts_{ij}}_{\text{Rüstzeit}} + \underbrace{\sum_{i=1}^{n_j} tp_{ij} * d_i}_{\text{Bearbeitungszeit}} * T_j \quad (66)$$

- d_i : Bedarf für das Produkt i je Standardzeiteinheit
- n_j : Anzahl der Varianten bzw. Produktvarianten in der Stufe j
- T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit
- tp_{ij} : Bearbeitungszeit pro Stück des Produkts i in der Stufe j
- ts_{ij} : Rüstzeit je Rüstvorgang für das Produkt i in der Stufe j

Die Lösung ist trivial, da jede Variante innerhalb eines Zeitfensters produziert wird und somit, unabhängig von der Größe des Zeitfensters, die Summe der Rüstzeiten zusätzlich zur Bearbeitungszeit anfällt. Letztere wird als Produkt der Bearbeitungszeit je Stück mal der nachgefragten Menge berechnet. Die Menge wiederum ist von der Länge der Planungsperiode abhängig. Durch Umformen ergibt sich als Bedingung für die Länge der Planungsperiode T der Stufe j für den Fall A:

$$T_j \geq \frac{\sum_{i=1}^{n_j} ts_{ij}}{1 - \sum_{i=1}^{n_j} tp_{ij} * d_i} \quad (67)$$

- d_i : Bedarf für das Produkt i je Standardzeiteinheit
- n_j : Anzahl der Varianten bzw. Produktvarianten in der Stufe j
- T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit
- tp_{ij} : Bearbeitungszeit pro Stück des Produkts i in der Stufe j
- ts_{ij} : Rüstzeit je Rüstvorgang für das Produkt i in der Stufe j

Durch Einführung des Nutzungsgrades κ_j , definiert als das Verhältnis von Bearbeitungszeit zur Gesamtzeit einer Planungsperiode, vereinfacht sich die Ungleichung (67) zu:

6 Verfahren zur Auslegung der Planungsperiodenlänge

$$T_j \geq \frac{\sum_{i=1}^{n_j} ts_{ij}}{1 - \kappa_j} \quad \text{mit} \quad \kappa_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} tp_{ij} * d_i * T_j}{T_j} \quad (68)$$

κ_j : Nutzungsgrad einer Planungsperiode in der Stufe j

Für einen Nutzungsgrad kleiner 100% (κ_j kleiner eins) existiert immer ein T_j , für welches die Ungleichung erfüllt ist. Daraus resultiert eine weitere Nebenbedingung:

$$\kappa_j < 1 \quad (69)$$

κ_j : Nutzungsgrad einer Planungsperiode in der Stufe j

Nebenbedingung (69) stellt sicher, dass die Kapazitätsnutzung durch Bearbeitung Raum für Rüstvorgänge lässt. Wird diese Nebenbedingung verletzt, so reicht die vorhandene Kapazität der Stufe j unter keinen Umständen zur Befriedigung der Nachfrage, unabhängig von der gewählten Planungsperiodenlänge.

6.4.2 Kapazitätsnebenbedingung im Fall von variablem Variantenmix

Im Falle zulässiger Nullbedarfe für bestimmte Varianten innerhalb einer Planungsperiode, der in Abschnitt 5.2.6 als Fall B klassifiziert wurde, ist neben der Bearbeitungszeit auch die Rüstzeit von der Länge der Planungsperiode abhängig. Die Kapazitätsschranke ergibt sich zu:

$$T_j \geq \underbrace{\sum_{i=1}^{n_j} (1 - q^{T_j}) * ts_{ij}}_{\text{Rüstzeit}} + \underbrace{\sum_{i=1}^{n_j} tp_{ij} * d_i * T_j}_{\text{Bearbeitungszeit}} \quad (70)$$

d_i : Bedarf für das Produkt i je Standardzeiteinheit

n_j : Anzahl der Varianten bzw. Produktvarianten in der Stufe j

q_i : Komplementäre Wahrscheinlichkeit der Variante bzw. des Produktes i

T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit

tp_{ij} : Bearbeitungszeit pro Stück des Produkts i in der Stufe j

ts_{ij} : Rüstzeit je Rüstvorgang für das Produkt i in der Stufe j

Die Bearbeitungszeit ergibt sich analog zum ersten Fall. Die Rüstzeit hingegen ist abhängig von der Anzahl der innerhalb der Planungsperiode zu erwartenden Varianten. Der Erwartungswert $E(n)$ der Anzahl der zu produzierenden Varianten in T kann, wie in Abschnitt 5.6.3 gezeigt, über die Eintrittswahrscheinlichkeit w_i je Variante berechnet werden. Durch Einsetzen der mittleren Rüstzeit $ts_{avg,j}$ und unter der Annahme gleicher Eintrittswahrscheinlichkeiten w_i der einzelnen Varianten, also $w_i = w$ für alle i , lässt sich die Ungleichung (70) vereinfachen zu:

$$T_j \geq n_j * (1 - q^{T_j}) * ts_{avg,j} + \sum_{i=1}^{n_j} tp_{ij} * d_i * T_j \quad \text{mit} \quad ts_{avg,j} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} ts_{ij}}{n_j} \quad (71)$$

- d_i : Bedarf für das Produkt i je Standardzeiteinheit
 n_j : Anzahl der Varianten bzw. Produktvarianten in der Stufe j
 q_i : Komplementäre Wahrscheinlichkeit der Variante bzw. des Produktes i
 T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit
 tp_{ij} : Bearbeitungszeit pro Stück des Produkts i in der Stufe j
 $ts_{avg,j}$: Mittlere Rüstzeit in der Stufe j
 ts_{ij} : Rüstzeit je Rüstvorgang für das Produkt i in der Stufe j

Durch Einsetzen des in der Ungleichung (68) definierten Nutzungsgrades κ_j lässt sich die Ungleichung (71) vereinfachen zu:

$$T_j \geq n_j * (1 - q^{T_j}) * ts_{avg,j} + \kappa_j * T_j \quad (72)$$

- κ_j : Nutzungsgrad einer Planungsperiode in der Stufe j

Für Fall B lautet die Bestimmungsgleichung für die minimale Länge der Planungsperiode der Stufe j in ihrer kompaktesten Form somit:

$$\beta_j T_j + q^{T_j} - 1 \geq 0 \quad \text{mit} \quad \beta_j = \frac{1 - \kappa_j}{n_j * ts_{avg,j}} \quad (73)$$

- β_j : Spreizgrad der Stufe j , Fall B

Für β_j größer null existiert immer ein T_j , für welches die Ungleichung erfüllt ist. Bei einem Nutzungsgrades κ_j kleiner 100%, vgl. Ungleichung (69), ist dies der Fall, da davon ausgegangen werden kann, dass die Bedingung

$$n_j * ts_{avg,j} < \infty \quad (74)$$

- n_j : Anzahl der Varianten bzw. Produktvarianten in der Stufe j
 $ts_{avg,j}$: Mittlere Rüstzeit in der Stufe j

wohl allgemein erfüllt ist, sprich weder die Anzahl der Varianten noch die mittlere Rüstzeit unendlich groß sind.

6.4.3 Kapazitätsnebenbedingung im Fall von variablem Variantenmix und reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten

Sei nun nicht nur der Variantenmix variabel, sondern die einzelnen Rüstzeiten auch reihenfolgeabhängig, wie in Fall C angenommen, so sind neben der Stückzahl und der Anzahl der Varianten bzw. der Rüstvorgänge innerhalb einer Pla-

6 Verfahren zur Auslegung der Planungsperiodenlänge

Planungsperiode auch die einzelnen Rüstzeiten abhängig von der Planungsperiodenlänge T_j . Die Bearbeitungszeit ist identisch zu den Fällen A und B. Die in einer Planungsperiode beanspruchte Rüstzeit wird nach Gleichung (44) durch den natürlichen Logarithmus der Anzahl der in dieser Planungsperiode hergestellten Varianten, multipliziert mit dem Anpassungsparameter δ_j , angenähert. Die Planungsperiodenlänge muss daher folgende Bedingung erfüllen:

$$T_j \geq \delta_j * \ln \left[\underbrace{\sum_{i=1}^{n_j} (1 - q_i^{T_j})}_{\text{Rüstzeit}} \right] + \underbrace{\sum_{i=1}^{n_j} tp_{ij} * d_i}_{\text{Bearbeitungszeit}} * T_j \quad (75)$$

- d_i : Bedarf für das Produkt i je Standardzeiteinheit
- n_j : Anzahl der Varianten bzw. Produktvarianten in der Stufe j
- q_i : Komplementäre Wahrscheinlichkeit der Variante bzw. des Produktes i
- T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit
- tp_{ij} : Bearbeitungszeit pro Stück des Produkts i in der Stufe j
- δ_j : Anpassungsparameter der Kennlinien zum Rüstaufwand

Werden wiederum gleiche Eintrittswahrscheinlichkeiten w_i der einzelnen Varianten angenommen und der zuvor in Gleichung (72) definierte Nutzungsgrades κ_j eingesetzt, vereinfacht sich die Bestimmungsgleichung (75) zu:

$$T_j * (1 - \kappa_j) \geq \delta_j * \ln(n_j * (1 - q^{T_j})) \quad (76)$$

- n_j : Anzahl der Varianten bzw. Produktvarianten in der Stufe j
- q : Komplementäre Wahrscheinlichkeit der Variante bzw. des Produktes i
- T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit
- δ_j : Anpassungsparameter der Kennlinien zum Rüstaufwand
- κ_j : Nutzungsgrad einer Planungsperiode in der Stufe j

Die Bestimmungsgleichung für die minimale Länge der Planungsperiode der Stufe j für Fall C in ihrer kompaktesten Form lautet demnach:

$$\chi_j * T_j - \ln(n_j * (1 - q^{T_j})) \geq 0 \quad \text{mit} \quad \chi_j = \frac{1 - \kappa_j}{\delta_j} \quad (77)$$

- n_j : Anzahl der Varianten bzw. Produktvarianten in der Stufe j
- q : Komplementäre Wahrscheinlichkeit der Variante bzw. des Produktes i
- T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit
- γ_j : Spreizgrad der Stufe j , Fall C
- δ_j : Anpassungsparameter der Kennlinien zum Rüstaufwand
- κ_j : Nutzungsgrad einer Planungsperiode in der Stufe j

Wiederum gilt, dass für γ_j größer null immer ein T_j existiert, für welches die Ungleichung erfüllt ist. Zusätzlich zu der im Fall A formulierten Bedingung eines Nutzungsgrades κ_j kleiner 100% (69) resultieren daraus die folgenden zwei Nebenbedingungen, welche der Vollständigkeit der mathematischen Formulierung halber erwähnt seien.

$$\delta_j < \infty \tag{78}$$

$$n_j < \infty \tag{79}$$

n_j : Anzahl der Varianten bzw. Produktvarianten in der Stufe j

δ_j : Anpassungsparameter der Kennlinien zum Rüstaufwand

Nebenbedingungen (78) und (79) besagen, analog zu (74) im Fall B, dass weder die Anzahl der Varianten noch die Rüstzeit unendlich groß werden dürfen.

6.4.4 Übersicht der Kapazitätsnebenbedingungen der drei untersuchten Fälle

Zur besseren Übersichtlichkeit seien an dieser Stelle die Bestimmungsungleichungen für die minimale Länge der Planungsperiode zur Erfüllung der Kapazitätsnebenbedingung der drei untersuchten Fälle in Tabellenform dargestellt (Tabelle 6.1).

Fall	Bestimmungsungleichung	Nebenbedingung
A	$T_j \geq \frac{\sum_{i=1}^{n_j} ts_{ij}}{1 - \kappa_j}$	mit $\kappa_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} tp_{ij} * d_i * T_j}{T_j}$ 1) $\kappa_j < 1$
B	$\beta_j T_j + q^{T_j} - 1 \geq 0$	mit $\beta_j = \frac{1 - \kappa_j}{n_j * ts_{avg,j}}$ 1) $\kappa_j < 1$ 2) $n_j * ts_{avg,j} < \infty$
C	$\chi_j * T_j - \ln(n_j * (1 - q^{T_j})) \geq 0$	mit $\chi_j = \frac{1 - \kappa_j}{\delta_j}$ 1) $\kappa_j < 1$ 2) $\delta_j < \infty$ 3) $n_j < \infty$

Tabelle 6.1: Bestimmungsungleichungen für die minimale Länge einer Planungsperiode für die Fälle A, B und C

6.5 Bestandskosten der Wertschöpfungskette

Die Bestandskosten IC (für Inventory Costs) der Supply Chain ergeben sich, unabhängig vom Fall A bis C, aus der Summation der Bestandskosten der einzelnen Kettenmitglieder IC_j :

$$IC = \sum_{j=1}^m IC_j \quad (80)$$

IC : Bestandskosten je Standardzeiteinheit der Wertschöpfungskette

IC_j : Bestandskosten je Standardzeiteinheit in der Stufe j

Wie in Abschnitt 5.5 erläutert, lässt sich der Bestand einer Stufe untergliedern in den Lagerbestand an verkaufsfähigen Produkten FGI (Finished Goods Inventory) sowie den Bestand an Aufträgen in Arbeit, den so genannten WIP (Work in Progress). Der Bestand an Rohmaterialien wird, der Festlegung in Abschnitt 5.5 folgend, als Fertigwarenbestand der vorgelagerten Stufe betrachtet.

Nach Gleichung (37) ergibt sich der durchschnittliche Bestand der Stufe j zu:

$$I_{j,avg} = I_{j,avg} * d = \underbrace{T_j * d}_{WIP} + \underbrace{\left(1/2 * T_j + 1/2 * T_{j-1} - ggT(T_j, T_{j-1})\right) * d}_{FGI} \quad (37)$$

d : Bedarf je Standardzeiteinheit

$ggT(x,y)$: Größter gemeinsamer Teiler von x und y

$I_{j,avg}$: Durchschnittlicher Bestand in der Stufe j

$I_{j,avg}$: Durchschnittliche Durchlaufzeit der Stufe j

T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit

Der erste Term der rechten Seite stellt dabei den Anteil an Aufträgen in Arbeit, den WIP, der zweite Term den Anteil an verkaufsfähigen Produkten, den FGI, dar.

Zur monetären Bewertung der Bestände müssen des Weiteren die Bestandskosten in zwei Komponenten untergliedert werden. Dies sind:

- Lagerkosten WC_j (Warehousing Costs) für die physische Lagerhaltung, wie z.B. für Lagerpersonal, aufgrund von Flächennutzung, etc., sowie
- Kapitalbindungskosten CC_j (Capital Costs) aufgrund der als Bestand gebundenen Mittel.

Die Lagerkosten WC_j sind direkt proportional zur Bestandsmenge und werden über den Proportionalfaktor w_{c_j} ermittelt. Der Faktor w_{c_j} repräsentiert die Kosten für die Lagerung einer Lagereinheit je Standardzeiteinheit und ist für die einzel-

nen Stufen gesondert zu bestimmen. Die Kosten der physischen Lagerhaltung der Stufe j können damit nach Gleichung (81) berechnet werden:

$$WC_j = I_{j,avg} * wc_j = \left\{ T_j + \left[\frac{1}{2} T_j + \frac{1}{2} T_{j-1} - ggT(T_j, T_{j-1}) \right] \right\} * d * wc_j \quad (81)$$

- d : Bedarf je Standardzeiteinheit
- $ggT(x,y)$: Größter gemeinsamer Teiler von x und y
- $I_{j,avg}$: Durchschnittlicher Bestand in der Stufe j
- T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit
- wc_j : Lagerkosten je Lager- und Standardzeiteinheit in der Stufe j
- WC_j : Lagerkosten je Standardzeiteinheit in der Stufe j

Die Kapitalbindungskosten CC_j sind abhängig von der Höhe des gebundenen Kapitals, also der Menge an Produkten sowie deren jeweiligem Wert. Zur Bestimmung der Kapitalbindungskosten wird der Proportionalfaktor cc_j (Capital Costs) verwendet. Der Faktor cc_j stellt die Kosten je Geldeinheit je Standardzeiteinheit dar. In der Regel kann der interne Zinsfuß¹⁰³ als cc_j verwendet werden. Die Kapitalbindungskosten CC_j ergeben sich dann zu:

$$CC_j = I_{j,avg} * v_j * cc_j \quad (82)$$

- cc_j : Kapitalbindungskosten je Geld- und Standardzeiteinheit in der Stufe j
- CC_j : Kapitalbindungskosten je Standardzeiteinheit in der Stufe j
- $I_{j,avg}$: Durchschnittlicher Bestand in der Stufe j
- v_j : Durchschnittlicher Wert eines Produktes der Stufe j

Hierzu ist zunächst der Wert v_j (Value) einer Produkteinheit und deren Wertzuwachs innerhalb einer Stufe zu bestimmen. Wie in Abbildung 6.3 dargestellt, erhöht sich der Wert eines Produktes bedingt durch die geleistete Arbeit in der Stufe j im Verlauf der Periode T_j . Zu Beginn der Bearbeitung entspricht der Wert der zu bearbeitenden Einheiten den Materialkosten, also dem Preis p_{j+1} der vorgelagerten Stufe $j+1$. Am Ende der Periode T_j werden die Produkte in Höhe der entstandenen Herstellkosten¹⁰⁴ c_j der Stufe j bewertet.

¹⁰³ Der interne Zinsfuß stellt die Mindestrendite eines Unternehmens dar und beinhaltet i.d.R neben dem marktüblichen Zinssatz Aufschläge für das unternehmerische Risiko.

¹⁰⁴ Als Summe der Material- und Fertigungskosten

6 Verfahren zur Auslegung der Planungsperiodenlänge

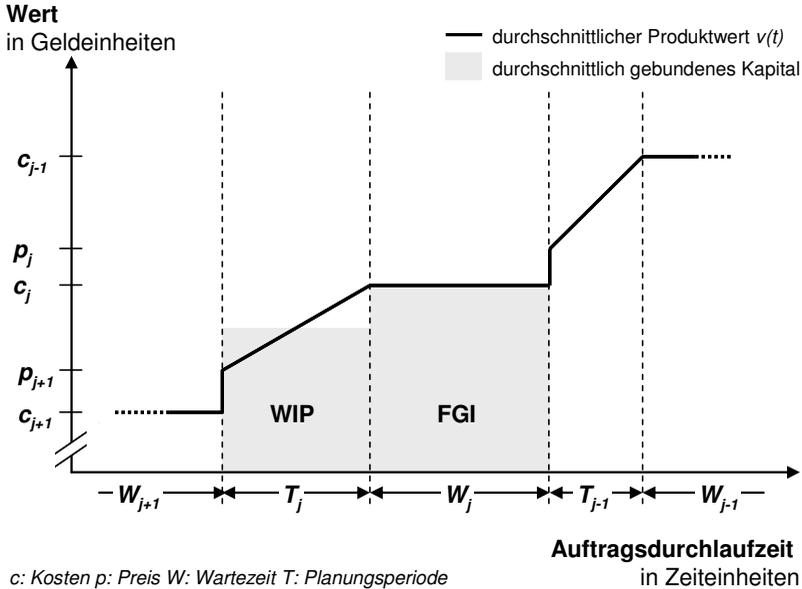


Abbildung 6.3: Wertzuwachs über der Auftragsdurchlaufzeit

Der durchschnittliche Wert eines Produktes während einer Planungsperiode T_j , d.h. der Wert des WIP, ergibt sich somit als arithmetisches Mittel von Materialkosten und den Gesamtkosten eines Fertigproduktes zu:

$$v_j(t) = \frac{(p_{j+1} + c_j)}{2} \quad \text{für} \quad 0 \leq t \leq T_j \quad (83)$$

c_j : Durchschnittliche Kosten eines Produktes der Stufe j

p_j : Durchschnittlicher Verkaufspreis eines Produktes der Stufe j

v_j : Durchschnittlicher Wert eines Produktes der Stufe j

Der Wert der fertigen Produkte bleibt unverändert bis zum Eigentumsübergang zum nachfolgenden Partner der Supply Chain, der definitionsgemäß zum Beginn der jeweiligen Planungsperiode der nachfolgenden Stufe erfolgt. Die Produkte werden also während der Wartezeit W_j mit den Herstellkosten c_j der Stufe j bewertet:

$$v_j(t) = c_j \quad \text{für} \quad T_j < t \leq W_j \quad (84)$$

c_j : Durchschnittliche Kosten eines Produktes der Stufe j

v_j : Durchschnittlicher Wert eines Produktes der Stufe j

Damit ergibt sich der durchschnittliche Wert der Bestände in Arbeit in einer Stufe mit Gleichung (37) und Gleichung (83) zu:

$$V_{j,avg}(t) = T_j * d * \frac{(p_{j+1} + c_j)}{2} \quad \text{für} \quad 0 \leq t \leq T_j \quad (85)$$

- d* : Bedarf je Standardzeiteinheit
T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe *j* als Vielfaches einer Standardzeiteinheit
V_j : Durchschnittlicher Wert des Bestandes der Stufe *j*

und der durchschnittliche Wert der Fertigwarenbestände in einer Stufe unter Beachtung der Gleichung (84) zu:

$$V_{j,avg}(t) = \left[\frac{1}{2}T_j + \frac{1}{2}T_{j-1} - ggT(T_j, T_{j-1}) \right] * d * c_j \quad \text{für} \quad T_j < t \leq W_j \quad (86)$$

- d* : Bedarf je Standardzeiteinheit
ggT(x,y) : Größter gemeinsamer Teiler von *x* und *y*
T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe *j* als Vielfaches einer Standardzeiteinheit
V_j : Durchschnittlicher Wert des Bestandes der Stufe *j*

Die Kapitalbindungskosten *CC_j* der Stufe *j* können damit nach Gleichung (82) bestimmt werden zu:

$$CC_j = \left\{ T_j * \frac{(p_{j+1} + c_j)}{2} + \left[\frac{1}{2}T_j + \frac{1}{2}T_{j-1} - ggT(T_j, T_{j-1}) \right] * c_j \right\} * d * cc_j \quad (87)$$

- cc_j* : Kapitalbindungskosten je Geld- und Standardzeiteinheit in der Stufe *j*
CC_j : Kapitalbindungskosten je Standardzeiteinheit in der Stufe *j*
c_j : Durchschnittliche Kosten eines Produktes der Stufe *j*
d : Bedarf je Standardzeiteinheit
ggT(x,y) : Größter gemeinsamer Teiler von *x* und *y*
p_j : Durchschnittlicher Verkaufspreis eines Produktes der Stufe *j*
T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe *j* als Vielfaches einer Standardzeiteinheit

und folglich die Bestandskosten *IC* der Stufe *j* mit Gleichung (81) und (87) zu:

6 Verfahren zur Auslegung der Planungsperiodenlänge

$$\begin{aligned}
 IC_j &= WC_j + CC_j = \\
 &= \left\{ T_j + \left[\frac{1}{2} T_j + \frac{1}{2} T_{j-1} - ggT(T_j, T_{j-1}) \right] \right\} * d * wc_j + \\
 &+ \left\{ T_j * \frac{(p_{j+1} + c_j)}{2} + \left[\frac{1}{2} T_j + \frac{1}{2} T_{j-1} - ggT(T_j, T_{j-1}) \right] * c_j \right\} * d * cc_j = \\
 &= d * \left\{ T_j * \left[wc_j + \frac{(p_{j+1} + c_j)}{2} * cc_j \right] + \right. \\
 &\quad \left. \left[\frac{1}{2} T_j + \frac{1}{2} T_{j-1} - ggT(T_j, T_{j-1}) \right] * [wc_j + c_j * cc_j] \right\}
 \end{aligned} \tag{88}$$

- cc_j : Kapitalbindungskosten je Geld- und Standardzeiteinheit in der Stufe j
 CC_j : Kapitalbindungskosten je Standardzeiteinheit in der Stufe j
 c_j : Durchschnittliche Kosten eines Produktes der Stufe j
 d : Bedarf je Standardzeiteinheit
 $ggT(x,y)$: Größter gemeinsamer Teiler von x und y
 p_j : Durchschnittlicher Verkaufspreis eines Produktes der Stufe j
 T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit
 wc_j : Lagerkosten je Lager- und Standardzeiteinheit in der Stufe j
 WC_j : Lagerkosten je Standardzeiteinheit in der Stufe j

6.6 Rüstkosten der Wertschöpfungskette

Zur Berechnung der Rüstkosten SC (Setup Costs) sind wiederum die drei in Abschnitt 5.2.6 beschriebenen Fälle zu differenzieren. Für alle der drei gilt jedoch, dass die Rüstkosten proportional zur Summe der Rüstzeiten sind. Hierzu wird der Proportionalfaktor sc_j definiert, der die Rüstkosten je Standardzeiteinheit in der Stufe j beschreibt. Zur Ermittlung des Proportionalfaktors sc_j dient im einfachsten Fall der Maschinenstundensatz, der die Kosten je Betriebsstunde einer Maschine angibt. Sollte die Auslegung der Planungsperiode die Entscheidung zur Kapazitätsanpassung umfassen, so sind die Investitionskosten zu berücksichtigen und der Faktor sc_j muss über eine Sprungfunktion dargestellt werden. Im Weiteren wird davon ausgegangen, dass der Faktor sc_j konstant ist.

Für den ersten beschriebenen Fall, Fall A, ergeben sich die Rüstkosten einer Stufe je Planungsperiode aus der Summe der Rüstzeiten aller Varianten bzw. Produkte mal dem Rüstkostenfaktor sc_j . Da im Fall A der Variantenmix konstant ist, werden alle Produkte in jeder Planungsperiode hergestellt und es wird für jedes

dieser somit einmal gerüstet. Dividiert durch die Länge der Planungsperiode T_j ergeben sich die Rüstkosten je Standardzeiteinheit:

$$SC_j = sc_j * \underbrace{\sum_{i=1}^{n_j} ts_{ij}}_{\text{Rüstzeit}} * \frac{1}{T_j} \quad (89)$$

- n_j : Anzahl der Produktvarianten in der Stufe j
- SC_j : Rüstkosten je Standardzeiteinheit in der Stufe j
- sc_j : Kosten je Zeiteinheit für Rüsten in der Stufe j
- T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit
- ts_{ij} : Rüstzeit je Rüstvorgang für die Produktvariante i in der Stufe j

Durch Einsetzen der mittleren Rüstzeit $ts_{j,avg}$ lässt sich Gleichung (89) vereinfachen zu:

$$SC_j = sc_j * n_j * ts_{j,avg} * \frac{1}{T_j} \quad \text{mit} \quad ts_{j,avg} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} ts_{ij}}{n_j} \quad (90)$$

- $ts_{j,avg}$: Mittlere Rüstzeit je Rüstvorgang in der Stufe j

Im Fall B variiert der Variantenmix, es werden also nicht zwangsläufig alle Produkte in einer Planungsperiode produziert bzw. die Maschinen für diese gerüstet. Die Rüstzeit je Planungsperiode hängt von der Anzahl der Rüstvorgänge je Planungsperiode ab, welche nach den in Abschnitt 5.6.3 ermittelten Gleichungen berechnet werden kann. Die Rüstkosten je Planungsperiode sind analog zum ersten Fall durch Multiplikation mit dem Rüstkostenfaktor sc_j zu berechnen. Normiert auf Standardzeiteinheit ergeben sich die Rüstkosten je Stufe für den Fall B zu:

$$SC_j = sc_j * \underbrace{\sum_{i=1}^{n_j} [(1 - q_i^{T_j}) * ts_{ij}]}_{\text{Rüstzeit}} * \frac{1}{T_j} \quad (91)$$

- n_j : Anzahl der Produktvarianten in der Stufe j
- SC_j : Rüstkosten je Standardzeiteinheit in der Stufe j
- sc_j : Kosten je Zeiteinheit für Rüsten in der Stufe j
- T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit
- ts_{ij} : Rüstzeit je Rüstvorgang für die Produktvariante i in der Stufe j
- q_i : Komplementäre Wahrscheinlichkeit der Variante bzw. des Produktes i

Werden wiederum gleiche Eintrittswahrscheinlichkeiten w_i der einzelnen Varianten, also $w_i = w$ für alle i , angenommen, so lässt sich Gleichung (91) durch Einsetzen der mittleren Rüstzeit $ts_{j,avg}$ vereinfachen zu:

6 Verfahren zur Auslegung der Planungsperiodenlänge

$$SC_j = sc_j * n_j * ts_{j,avg} * (1 - q^{T_j}) * \frac{1}{T_j} \quad (92)$$

$ts_{j,avg}$: Mittlere Rüstzeit je Rüstvorgang in der Stufe j

Wie in den ersten beiden Fällen beschrieben, ergeben sich auch im Fall C, bei sequenzabhängigen Rüstzeiten und variablem Variantenmix, die Rüstkosten aus der Multiplikation der Rüstzeiten mit dem Rüstkostenfaktor sc_j . Die Rüstzeiten je Planungsperiode sind über die in Abschnitt 5.6.4 vorgestellten Rüstkurven zu ermitteln. Die Gleichung zur Berechnung der Rüstkosten im Fall C lautet somit:

$$SC_j = sc_j * \underbrace{\delta_j * \ln \left(\sum_{i=1}^{n_j} (1 - q_i^{T_j}) \right)}_{\text{Rüstzeit}} * \frac{1}{T_j} \quad (93)$$

n_j : Anzahl der Produktvarianten in der Stufe j

q_i : Komplementäre Wahrscheinlichkeit der Variante bzw. des Produktes i

SC_j : Rüstkosten je Standardzeiteinheit in der Stufe j

sc_j : Kosten je Zeiteinheit für Rüsten in der Stufe j

T_j : Länge der Planungsperiode der Stufe j als Vielfaches einer Standardzeiteinheit

δ_j : Anpassungsparameter der Kennlinien zum Rüstaufwand

und unter der Annahme gleicher Eintrittswahrscheinlichkeiten w_i der einzelnen Varianten, also für $w_i = w$ für alle i , vereinfacht:

$$SC_j = sc_j * \delta_j * \ln \left(n_j * (1 - q^{T_j}) \right) * \frac{1}{T_j} \quad (94)$$

n_j : Anzahl der Produktvarianten in der Stufe j

6.7 Gesamtkosten der Wertschöpfungskette

Aus den Gleichungen (88), (90), (92) und (94) und der Gleichung (48) für die Gesamtkosten TC (Total Costs) lassen sich diese für die drei beschriebenen Fälle ableiten. Die Gesamtkosten TC ergeben sich entsprechend den in Tabelle 6.2 dargestellten Gleichungen.

Fall	Kaptialbindungskosten	Rüstkosten
A	$TC = \sum_{j=1}^m d^* \{ \text{Term WIP} + \text{Term FGI} \}$	$+ \sum_{j=1}^m sc_j * n_j * ts_{j,avg} * \frac{1}{T_j} \quad (95)$
B	$TC = \sum_{j=1}^m d^* \{ \text{Term WIP} + \text{Term FGI} \}$	$+ \sum_{j=1}^m sc_j * n_j * ts_{j,avg} * (1 - q^{T_j}) * \frac{1}{T_j} \quad (96)$
C	$TC = \sum_{j=1}^m d^* \{ \text{Term WIP} + \text{Term FGI} \}$	$+ \sum_{j=1}^m sc_j * \delta_j * \ln(n_j * (1 - q^{T_j})) * \frac{1}{T_j} \quad (97)$
Term WIP: $T_j * \left[wc_j + \frac{(p_{j+1} + c_j)}{2} * cc_j \right]$		
Term FGI: $\left[\frac{1}{2} T_j + \frac{1}{2} T_{j-1} - ggT(T_j, T_{j-1}) \right] * [wc_j + c_j * cc_j]$		

Tabelle 6.2: Bestimmungsgleichungen für die Gesamtkosten in Abhängigkeit der Länge einer Planungsperiode für die Fälle A, B und C

Die gezeigten Gleichungen dienen der Ermittlung der optimalen Länge der Planungsperioden T_j je Stufe j . Deren Bestimmung erfolgt mit Hilfe eines Optimierungsprogrammes, welches im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

6.8 Optimierungsprogramm

6.8.1 Lösungsalgorithmus

Der entwickelte Lösungsalgorithmus dient der Ermittlung der optimalen Planungsperiodenlänge je Stufe unter Berücksichtigung der in Abschnitt 6.3 und Abschnitt 6.4 beschriebenen Nebenbedingungen.

Das in Abschnitt 6.1 formulierte Minimierungsproblem ist nichtlinear und kann damit nicht mittels bekannter Lösungsverfahren gelöst werden. Zugleich gehört es jedoch zur Kategorie der leichten Probleme, da es mit polynomialem Rechenaufwand lösbar ist. Der entwickelte Lösungsalgorithmus greift daher auf das Verfahren der vollständigen Enumeration zurück. Durch die Einbeziehung der Nebenbedingungen aus den Abschnitten 6.3 und 6.4 sowie entsprechende Wahl oberer und unterer Grenzen, wie in Abschnitt 6.3 beschrieben, kann der Rechenaufwand weiter reduziert werden. Das entwickelte Rechnerwerkzeug verwendet hierbei den in Abbildung 6.4 dargestellten Lösungsweg.

6 Verfahren zur Auslegung der Planungsperiodenlänge

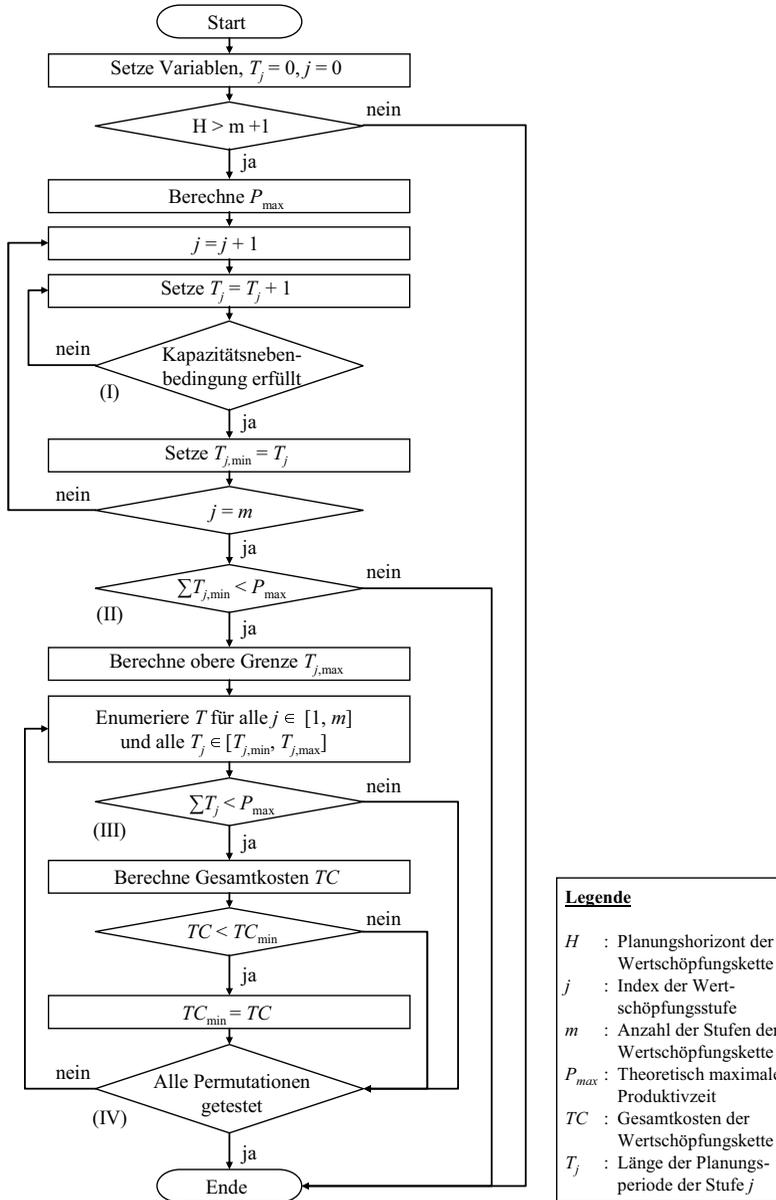


Abbildung 6.4: Flussdiagramm zur Lösung des Minimierungsproblems zur Ermittlung der optimalen Planungsperiodenlänge

Die erste Abbruchbedingung, in Abbildung 6.4 mit (I) beschriftet, bildet dabei der Planungshorizont H . Überschreitet die Anzahl m der Stufen der Supply Chain multipliziert mit der gewählten Standardzeiteinheit (Tage, Schichten oder Stunden) den Planungshorizont H , so bricht der Algorithmus ab. Das entwickelte zeitenfensterbasierte Planungssystem ist für die gewählte Konfiguration nicht anwendbar. Folgende Stellhebel ermöglichen es, die Konfiguration so zu verändern, dass das Planungssystem dennoch zum Einsatz kommen kann:

1. **Länge der Planungsperiode T_j** ↓: Reduktion der Standardzeiteinheit, d.h. die Planung erfolgt für kleinere Zeiträume, z.B. in Schichten anstelle von Tagen
2. **Anzahl der Stufen m** ↓: Reduktion der in der deterministischen Planung berücksichtigten Kettenglieder m , Entkopplung vorgelagerter Stufen durch Lagerbestände und prognosegetriebene Produktion in diesem Teil der Supply Chain
3. **Planungshorizont H** ↑: Erhöhung des Planungshorizontes H durch ein früheres Einfrieren der Kundenaufträge

Im nächsten Schritt wird als obere Schranke die maximale Produktivzeit P_{\max} für die Supply Chain über die in Abschnitt 6.3 ermittelten Zusammenhänge berechnet. Je Kettenstufe wird daraufhin iterativ die minimale Länge der Planungsperiode $T_{j,\min}$, welche die Kapazitätsrestriktionen der Stufe erfüllt, berechnet. Die zweite Abbruchbedingung bildet der Vergleich der maximalen und minimalen Produktivzeit, P_{\max} bzw. P_{\min} , wobei letztere als Summe der einzelnen $T_{j,\min}$ berechnet wird. Ist die aufgrund der Kapazitätsrestriktionen notwendige minimale Produktivzeit größer als der Planungshorizont H , so existiert keine gültige Lösung und der Algorithmus bricht an der in Abbildung 6.4 mit (II) gekennzeichneten Stelle ab. Neben den drei zuvor beschriebenen Stellgrößen kann eine zulässige Lösung durch folgende Maßnahmen erreicht werden:

4. **Minimale Länge der Planungsperiode $T_{j,\min}$** ↓: Erhöhung der Kapazität bzw. Reduktion von Rüst- und/oder Bearbeitungszeiten in einer oder mehreren Stufen und damit Reduktion von $T_{j,\min}$

Im dritten Schritt wird als obere Grenze die unter den gegebenen Randbedingungen zulässige maximale Länge der Planungsperiode je Stufe $T_{j,\max}$ berechnet. Diese ergibt sich als Differenz der maximalen und der minimalen Produktivzeit zuzüglich der minimalen Länge der Planungsperiode derselben Stufe $T_{j,\min}$ (vgl.

Gleichung (65)). Für die zulässigen Ausprägungen von T je Stufe¹⁰⁵ werden die resultierenden Gesamtkosten ermittelt. Beginnend mit der ersten Stufe wird T_j ausgehend von T_{\min} um eine Standardzeiteinheit erhöht und die sich ergebende Produktivzeit wird berechnet. Ist diese kleiner oder gleich der maximalen Produktivzeit, so werden die resultierenden Gesamtkosten berechnet und mit den bisherigen minimalen Gesamtkosten verglichen.

Sind die Gesamtkosten der aktuellen Konfiguration geringer als die minimalen Gesamtkosten, so wird die aktuelle Konfiguration als Minimalkonfiguration gesetzt, mit den entsprechenden Gesamtkosten als neue minimale Gesamtkosten. Im nächsten Iterationsschritt wird T_j wiederum um eine Standardzeiteinheit erhöht. Dieser Vorgang wiederholt sich so lange, bis die Summe der Planungsperioden (die Produktivzeit) größer der maximalen Produktivzeit ist (in Abbildung 6.4 (III)). Ist dies der Fall, so wird die Planungsperiode der vorgelagerten Stufe T_{j+1} um eine Standardzeiteinheit erhöht und die Iteration beginnt von neuem. Sind alle zulässigen Konfigurationen untersucht, so bricht der Algorithmus an der in Abbildung 6.4 mit (IV) gekennzeichneten Stelle ab und die Minimalkonfiguration wird ausgegeben.

6.8.2 Prototypisches Rechnerwerkzeug

Der beschriebene Lösungsalgorithmus wurde in der Programmiersprache Visual Basic prototypisch als Rechnerwerkzeug implementiert. Das Werkzeug wird über Microsoft[®] Excel bedient, was die einfachen Parametrisierung des Modells sowie die Visualisierung der Ergebnisse ermöglicht. Mit Hilfe des Programms lassen sich Wertschöpfungsketten mit bis zu sechs Kettengliedern konfigurieren. Abbildung 6.5 zeigt die Eingabemaske des entwickelten Werkzeuges.

Die Rechenzeit ist neben der Anzahl der Kettenstufen maßgeblich von der maximalen Länge des Planungshorizontes H sowie der gewählten Standardzeiteinheit abhängig, da durch diese beiden Parameter die Anzahl der zu untersuchenden Konfigurationen und damit die notwendigen Iterationsschritte festgelegt werden. Tabelle 6.3 zeigt die Anzahl möglicher Konfigurationen in Tausend für verschiedene Längen des Planungshorizontes H und einer minimalen Planungsperiodenlänge von einer Standardzeiteinheit je Stufe.

¹⁰⁵ Zulässige Ausprägungen: $T_{j,\min} \geq T_j \leq T_{j,\max}$

Stufen	H (in Standardzeiteinheiten)							
	100	90	80	70	65	60	50	40
6					28.990	18.009	5.246	1.345
5			8.937	4.582	3.163	2.119	749	237
4	1.582	1.029	635	367	271	195		
3	68	48	34	22	17	14		

Anzahl Konfigurationen in Tausend

Tabelle 6.3: Anzahl möglicher Konfigurationen in Tausend in Abhängigkeit der Anzahl von Stufen und der Länge des Planungshorizontes H

Für eine sechsstufige Supply Chain mit einem Planungshorizont H von 65 Tagen und einer gewählten Standardzeiteinheit von einem Tag ergeben sich demnach ca. 29 Millionen zu untersuchende Varianten.

Parametrisierung

	Stufe 6	Stufe 5	Stufe 4	Stufe 3	Stufe 2	Stufe 1	Kunde
Bearbeitungszeit tp [min/n]				0,69	1,05	0,80	H 11
Ø Rüstzeit ts [min/var]				210	1,05	3	d [n/t] 1300
Verkaufspreis [\$/n]				24,8	47,4	94,1	n 20
Kosten [\$/n]				9,7	32,8	79,1	w 0,3
Lagerkosten wc [\$/n/a]				72	72	72	
Kapitalkosten cc [%/a]				14%	14%	14%	
Rüstkosten sc [\$/h]				530	3131	120	
Anzahl Produktvarianten n				6	18	19	

Ergebnisdarstellung

	Stufe 6	Stufe 5	Stufe 4	Stufe 3	Stufe 2	Stufe 1	Total
T_{min} [t]				2	1	1	
$U(T_{min})$ [%]				95%	96%	75%	
T_{opt} [t]				4	2	1	
$U(T_{opt})$ [%]				81%	95%	75%	
Bestandskosten IC				791	413	451	1655
Rüstkosten SC				2354	307	72	2734
Gesamtkosten TC				3145	720	524	4389

Systemsteuerung

Standardzeiteinheit [h]: 24
 Auftrittswahrscheinlichkeit w: non const
 Anzahl Stufen m: 3

Status Ausgabe: ein
 Ausgabe deaktivieren / Ausgabe aktivieren
 Berechnung optimale Periodenlänge

Abbildung 6.5: Prototypische Umsetzung des Lösungsalgorithmus im Rechnerwerkzeug

Das prototypische Werkzeug kann dabei Wertschöpfungsketten mit bis zu sechs Kettengliedern und einem Planungshorizont H von bis zu 65 Standardzeiteinheiten in einem vertretbaren Zeitrahmen optimieren. Für das oben genannte Beispiel benötigt der Algorithmus etwa neun Minuten zur Berechnung aller Möglichkei-

6 Verfahren zur Auslegung der Planungsperiodenlänge

ten und Ausgabe der optimalen Lösung. Tabelle 6.4 zeigt die Rechenzeiten auf einem PC mit 2 GHz Taktfrequenz.

Stufen	H (in Standardzeiteinheiten)										
	100	90	80	70	65	60	55	50	40	35	30
6					8:41	5:24	3:13	1:35	0:24	0:11	
5			2:22	1:14	0:50	0:34	0:19	0:12			
4	0:22	0:14	0:09								
3											

Tabelle 6.4: Rechenzeit in Minuten in Abhängigkeit der Anzahl von Stufen und der Länge des Planungshorizontes H

6.9 Fallbeispiel

6.9.1 Beschreibung der Ausgangssituation

Die untersuchte Supply Chain besteht aus drei Stufen, die beteiligten Unternehmen produzieren Stoßfänger für einen großen deutschen Automobilkonzern. Abbildung 6.6 zeigt den betrachteten Wertstrom vom Rohmaterialhersteller (in der Abbildung links oben) bis zum OEM (in der Abbildung rechts oben).

Der Materialfluss vom Rohmaterial bis zum Fertigprodukt stellt sich dabei wie folgt dar. Die Anlieferung des Kunststoffgranulates geschieht zwei bis dreimal in der Woche und wird über das Erreichen des Meldebestands in den Lagersilos ausgelöst. Die Bestellung des Granulats erfolgt verbrauchsgesteuert (Pull) und die entsprechende Stufe der Wertschöpfungskette wird gemäß den in Abschnitt 2.3 getroffenen Einschränkungen im Weiteren nicht betrachtet. In der dritten Kettenstufe werden die Stoßfänger wie auch die verschiedenen dazugehörigen Anbauteile im Spritzgussverfahren hergestellt. Dabei sind größere Lose von 600 bis 1.800 Stück üblich, um den Rüstaufwand zu minimieren. Die gegossenen Teile werden an die zweite Stufe weitergeleitet, welche durch ein Zwischenlager von der dritten Stufe entkoppelt ist. Aus diesem Lager werden die Rohteile entnommen und in der zweiten Stufe entsprechend dem Bedarf des OEM in einer automatisierten Lackieranlage in den verschiedenen Farben lackiert. Zur Minimierung der Rüstkosten durch Farbverlust und Stillstandszeiten wird versucht, optimierte Farbfolgen zu bilden. Die lackierten Stoßfänger sowie die ebenfalls lackierten Anbauteile werden daraufhin per LKW an die erste Stufe geliefert, in einem Hochregallager zwischengelagert und später montiert.

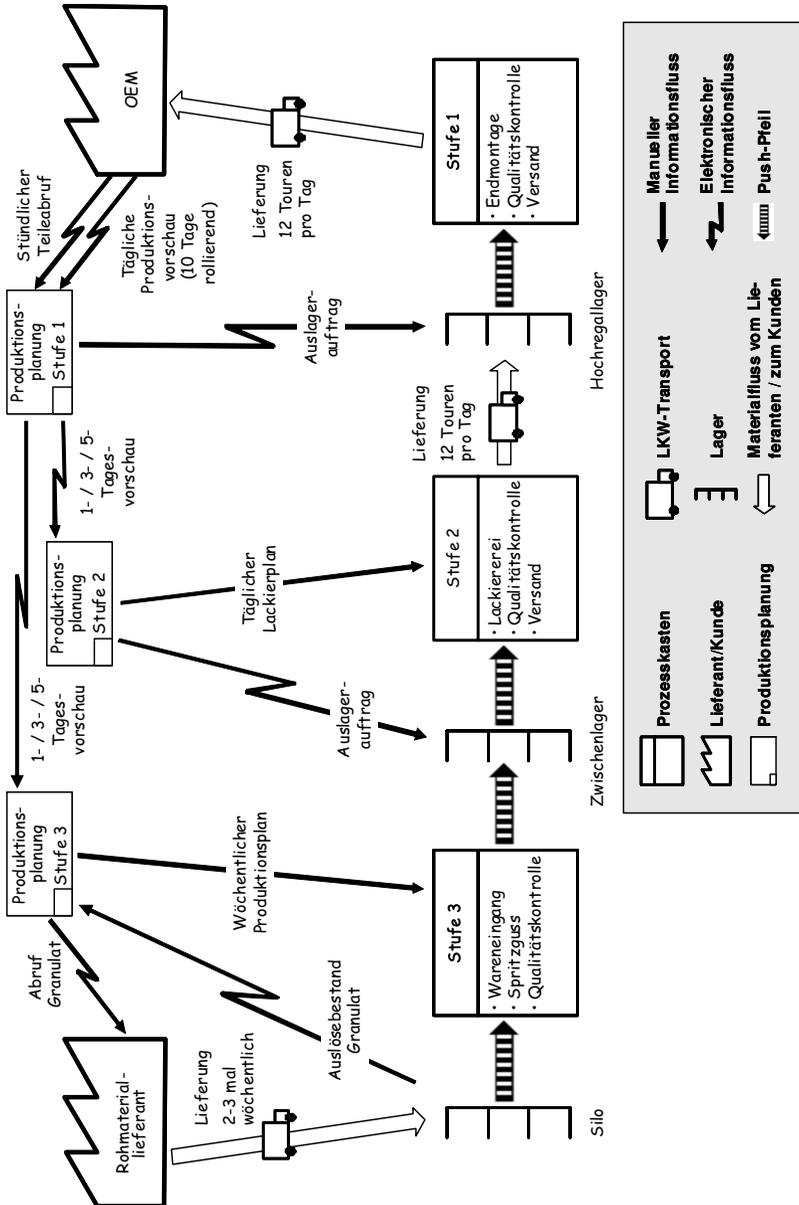


Abbildung 6.6: Untersuchte Supply Chain für die Herstellung von Stoßfängern

6 Verfahren zur Auslegung der Planungsperiodenlänge

Die Montagereihenfolge entspricht weitestgehend der Bandbelegung des OEM, da die Rüstzeiten vernachlässigbar bzw. die Anzahl der Montagestationen ausreichend groß für die Variantenzahl ist. Wiederum per LKW wird das fertige Produkt in Sequenz an den OEM geliefert, der die Stoßfänger in Fahrzeugen der oberen Mittelklasse verbaut.

Der Informationsfluss verläuft dem Materialfluss entgegengesetzt. Der OEM übermittelt täglich eine rollierende Produktionsvorschau für die kommenden zehn Tage und ruft stündlich Stoßfänger in der Einbausequenz in Form von JIT-/JIS-Impulsen per EDI (Electronic Data Exchange) ab. Die Endmontage in der ersten Stufe erfolgt entsprechend dieser produktionsynchronen Abrufe des OEM. Die Steuerung der Endmontage erfolgt über die Auslagerung der entsprechend lakierten Stoßfänger aus dem Hochregallager.

Die Produktionsvorschau bildet die Basis für die Planung der zu produzierenden Mengen und Varianten in der zweiten und dritten Stufe der Wertschöpfungskette. Die Produktionsplanung der ersten Stufe gleicht die vom OEM für die kommenden zehn Tage nachgefragten Mengen mit den im Zwischenlager vorhandenen Beständen ab und berechnet den Nettobedarf¹⁰⁶ für die einzelnen Varianten. In Form von 1-, 3- und 5-Tages Vorschauen wird der Nettobedarf elektronisch an die zweite und dritte Stufe übermittelt. Die Produktionsplanung und -steuerung erfolgt dabei in den beiden Stufen nach Faustregeln und ad hoc, häufige Störungen und daraus resultierende Feuerwehreaktionen die zu erhöhten Kosten führen sind an der Tagesordnung. Die Koordination zwischen diesen beiden Stufen erfolgt nur in den beschriebenen Störungsfällen und dann telefonisch.

Die Ausgangssituation ist des Weiteren gekennzeichnet durch hohe Lagerbestände entlang der Supply Chain bei gleichzeitig wiederholten Lieferengpässen, welche in der Vergangenheit zu Bandstillständen beim OEM führten. Der hieraus resultierende monetäre Verlust ist substantiell, ebenso schwer wiegt jedoch der hiermit einhergehende Vertrauensverlust seitens des OEMs. Die in den einzelnen Stufen einmal festgelegten Produktionspläne sind i.d.R. binnen Kürze durch Überpriorisierung und Eilaufträge aufgrund sich abzeichnender Teileengpässe entlang der Wertschöpfungskette überholt. Dies führt zu erheblichen zusätzlichen Kosten durch z.B. Überstunden, Sonderschichten, Farbverlusten etc.

¹⁰⁶ Nettobedarf = Bruttobedarf - Lagerbestand

6.9.2 Systemparameter

Die Wertschöpfungskette produziert durchschnittlich ca. 1.250 Stoßfänger pro Tag. Die Nachfrage ist in Summe relativ konstant und wird durch die Kapazität der Endmontagelinie des OEMs bestimmt, vgl. Abbildung 6.7.

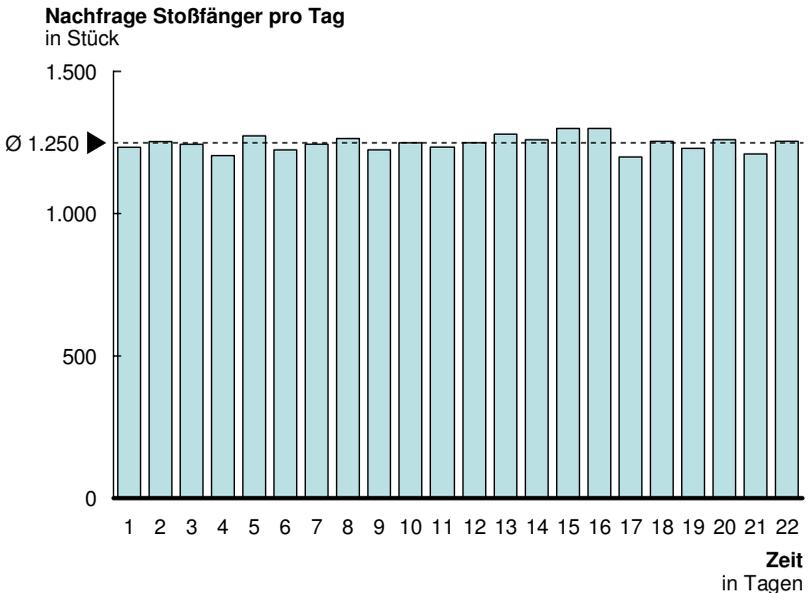


Abbildung 6.7: Beispielhafter Nachfrageverlauf für einen Monat in Stück je Tag

Größere Unterschiede treten im Variantenmix auf. Die Produktvarianten unterscheiden sich zum einen in der Form (Limousine und Kombi in drei verschiedenen Ausstattungslineien) und zum anderen in der Farbe (zum Zeitpunkt der Untersuchung wurden die Stoßfänger in 18 unterschiedlichen Farben lackiert). Durch weitere optionale Anbauteile wie z.B. Parksensoren entstehen in Summe ca. 400 Produktvarianten mit sehr unterschiedlichen Nachfrageverläufen. So existieren einige wenige Schnelldreher mit täglicher Nachfrage aber auch eine große Zahl von Langsamdreher, die nur einmal die Woche oder sogar nur einmal im Monat abgerufen werden.

Für die Stufe 3 ist die Form der Stoßfänger das einzig entscheidende Rüstkriterium. Es werden auf dieser Stufe der Wertschöpfungskette sechs verschiedene Produktvarianten hergestellt wobei die Rüstzeiten nicht reihfolgeabhängig sind.

6 Verfahren zur Auslegung der Planungsperiodenlänge

Das alleinige Rüstkriterium für die Lackiererei, die Stufe 2, ist die Farbe. Es besteht eine Reihenfolgeabhängigkeit, da aus Qualitätsgründen bevorzugt von hellen zu dunklen Farben gewechselt wird. Die Rüstmatrix ist also nicht symmetrisch und es besteht eine konstante optimale Reihenfolge, eine Reihenfolgeoptimierung nach der in Abschnitt 5.6.4 vorgestellten Methodik wird demnach nicht durchgeführt. Die Rüstzeiten in der ersten Stufe, der Endmontage, entstehen durch die Umkonfiguration der Materialbehälter an den manuellen Arbeitsplätzen. Hierfür sind 19 verschiedene Konfigurationen vorgesehen, mit denen alle ca. 400 Produktvarianten montiert werden können. Eine Reihenfolgenabhängigkeit besteht hier nicht.

Die wichtigsten Parameter der einzelnen Stufen sind in Tabelle 6.5 aufgelistet. Aus Vertraulichkeitsrunden sind einige der Angaben normiert.

Systemparameter	Einheit	Stufen der Wertschöpfungskette		
		Stufe 3 Spritzguss	Stufe 2 Lackierung	Stufe 1 Endmontage
Bearbeitungszeit* tp	[ZE/Stk]	0,66	1,00	0,76
Ø Rüstzeit* ts	[ZE/Stk]	200,00	1,00	2,86
Verkaufspreis* p	[GE/Stk]	7,92	15,14	30,04
Kosten* c	[GE/Stk]	3,11	10,48	25,25
Lagerkosten* wc	[GE/Stk/ZE]	22,99	22,99	22,99
Rüstkosten* sc	[GE/ZE]	169,25	1000,00	38,32
Kapitalkosten cc	[%/ZE]	14%	14%	14%
Produktvarianten n	[Stk]	6	18	19

* Daten aus Vertraulichkeitsgründen normiert

Tabelle 6.5: Systemparameter der einzelnen Stufen der Wertschöpfungskette

6.9.3 Bestimmung der optimalen Planungsperiodenlänge und Bewertung gegenüber dem Ausgangszustand

Für die in den beiden vorangegangenen Abschnitten beschriebene Wertschöpfungskette können mit Hilfe des in Abschnitt 6.8 vorgestellten Optimierungsprogramms die optimalen Längen der Planungsperioden für die drei Stufen berechnet werden. Für die Optimierung wird der Planungshorizont H mit 11 Tagen angesetzt, eine Größe die sich aus der täglich um 06:00 Uhr vom OEM übermittelten Vorschau für die kommenden 10 Tage ableitet. Des Weiteren werden die in Tabelle 6.5 aufgelisteten Systemparameter verwendet. Beginnend mit den berechneten minimalen Planungsperioden je Stufe (Stufe 3: 2 Tage, Stufe 2: 1 Tag,

Stufe 1: 1 Tag) untersucht der Algorithmus die verschiedenen zulässigen Verteilungen der zur Verfügung stehenden Zeit, d.h. Konfigurationen mit einer maximalen Durchlaufzeit LT_{\max} kleiner gleich H , auf die drei Stufen und berechnet die entstehenden Rüst- und Bestandskosten. Das Ergebnis sind die Gesamtkosten für die zulässigen Konfigurationen, im konkreten Fall 15 an der Zahl, wie in Abbildung 6.8 dargestellt.

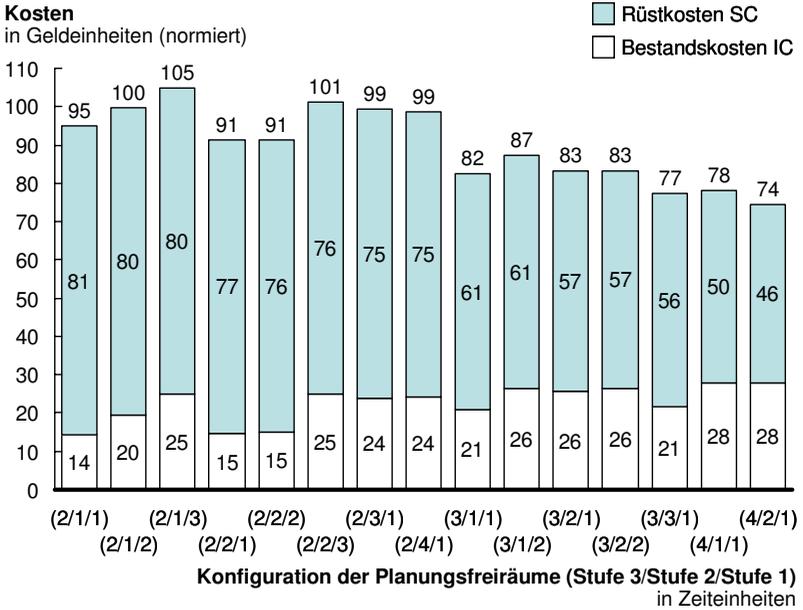


Abbildung 6.8: Entwicklung der normierten Kosten im Laufe der Optimierung

Als optimal erweist sich die Konfiguration mit einer Länge der Planungsperiode von vier, zwei und einem Tag für die Stufe 3 respektive Stufe 2 und Stufe 1. Die maximale Durchlaufzeit LT_{\max} der Wertschöpfungskette liegt bei elf Tagen und die durchschnittliche Durchlaufzeit LT_{avg} bei neun Tagen. In Summe beträgt die Produktivzeit P der drei Stufen sieben Tage, wodurch sich der Produktivgrad μ zu 78% ergibt.

Im Vergleich zur Ausgangssituation ergibt sich eine Reduzierung der Gesamtkosten um 26%. Abbildung 6.9 zeigt die einzelnen Kostenarten für die einzelnen Stufen der Wertschöpfungskette und die Gesamtkosten, aus Vertraulichkeitsgründen wiederum normiert auf die Gesamtkosten der Ausgangssituation.

6 Verfahren zur Auslegung der Planungsperiodenlänge

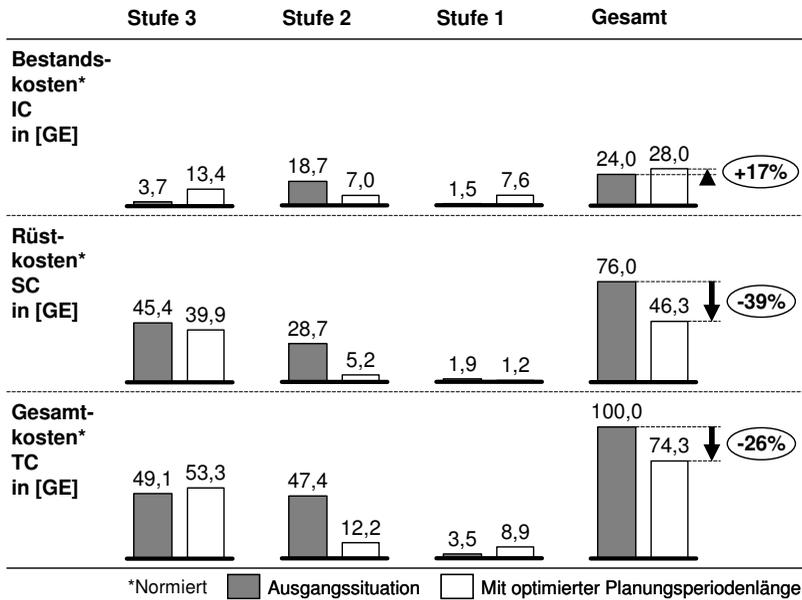


Abbildung 6.9: Mögliche Einsparungen in den Gesamtkosten der Supply Chain

Auffällig ist, dass vor allem Rüstkosten eingespart werden können, wohingegen die Bestandskosten leicht ansteigen. Die Reduktion der Rüstkosten liegt hauptsächlich in der entsprechenden Kostensenkung in der zweiten Stufe begründet, wie überhaupt die Kosten der zweiten Stufe erheblich gesenkt werden können, z.T. zu Lasten der beiden anderen Stufen. Es zeigt sich also, dass bei der Implementierung einer solchen Steuerung die Frage nach der Verteilung der durch die Gesamteinsparung erzielten zusätzlichen Gewinne unter den Beteiligten von enormer Bedeutung sein wird.

7 Schlussbemerkung

7.1 Zusammenfassung

Der verschärfte Wettbewerb, u. a. bedingt durch die zunehmende Globalisierung sowie Fortschritte in der Informations- und Kommunikationstechnik, macht die Konzentration produzierender Unternehmen auf ihre Kernkompetenzen unabdingbar. Zusammen mit der fortschreitenden Globalisierung von Produktionsstätten führt dies zu einer immer stärkeren Verteilung der Wertschöpfung auf eine Vielzahl verschiedener Unternehmen und Standorte. Die großen Hebel zur Verbesserung der Wettbewerbssituation liegen somit nicht mehr in den einzelnen Unternehmen, sondern an den Schnittstellen zwischen den an der Wertschöpfung beteiligten Einheiten.

Eine der zentralen Schnittstellen ist die Auftragskoordination auf der operativen Ebene einer solchen Wertschöpfungskette. Es gilt einerseits die straffe und zentrale Kontrolle der gesamten Wertschöpfungskette zu gewährleisten und andererseits den einzelnen Unternehmen die Möglichkeit der lokalen Optimierung zu bieten. Bestehende Ansätze zur Auftragskoordination in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten können dies nicht leisten. Die im Zuge der Fertigungssegmentierung Ende der 1980er und Anfang der 1990er Jahren populär gewordenen zeitfensterbasierten Planungssysteme zur Koordination der (innerbetrieblichen) Produktionssegmente bieten hier eine Alternative.

Die Übertragung des Konzeptes der zeitfensterbasierten Planung auf überbetriebliche Wertschöpfungsketten war somit naheliegend, bedingte jedoch eine entscheidende Modifikation bestehender Ansätze. Um den Nachteil langer Durchlaufzeiten, der sich durch den Grundsatz der gleichen Freigabefrequenz und damit einheitlicher Planungsperiodenlängen zwangsläufig ergibt, auszugleichen, wurde ein Planungssystem mit uneinheitlicher Länge der Planungsperioden entworfen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden weiterhin die Auswirkungen der Länge der Planungsperioden auf logistische Zielgrößen ermittelt. So konnten die Zusammenhänge zwischen der Planungsperiodenlänge einerseits und der Durchlaufzeit, dem Bestand und der Auslastung andererseits hergeleitet werden. Basierend auf den ermittelten Bestimmungsgleichungen wurde ein Minimierungsproblem formuliert, das die Gesamtkosten der Wertschöpfungskette, unterteilt nach

7 Schlussbemerkung

Bestands- und Rüstkosten, in Abhängigkeit der Planungsperiodenlänge der einzelnen Wertschöpfungsstufen darstellt. Der zur Lösung des nichtlinearen Minimierungsproblems entwickelte Lösungsalgorithmus dient der Ermittlung der optimalen Planungsperiodenlänge je Stufe unter Berücksichtigung der beschriebenen Nebenbedingungen und greift dabei auf Verfahren der vollständigen Enumeration zurück. Der Algorithmus wurde in einem prototypischen Rechnerwerkzeug implementiert. Selbst große Probleme mit knapp 30 Millionen zu untersuchenden Kombinationen bewältigt der Prototyp in weniger als zehn Minuten.

In einem abschließenden Fallbeispiel zur Optimierung anhand einer dreistufigen Wertschöpfungskette aus der Automobilindustrie konnte die Tauglichkeit des entwickelten Verfahrens zur Auslegung von Planungsperioden in zeitenfensterbasierten Planungssystemen und der programmierten Werkzeuge demonstriert werden. Zudem zeigte sich die Vorteilhaftigkeit des Planungskonzeptes gegenüber der ursprünglichen Auftragskoordination in der untersuchten Wertschöpfungskette in einer Reduktion der Gesamtkosten (Rüst- und Bestandskosten) der Wertschöpfungskette um über ein Viertel, sprich 25%.

Es konnte somit nachgewiesen werden, dass durch eine gezielte Gestaltung von Planungsfreiräumen in unternehmensübergreifenden Wertschöpfungsketten eine bewusste Steuerung und eine Optimierung der logistischen Zielgrößen grundsätzlich möglich ist.

7.2 Ausblick

Das entwickelte zeitenfensterbasierte Planungssystem schafft die Möglichkeit der globalen Optimierung einer überbetrieblichen Wertschöpfungskette hinsichtlich Bestands- und Rüstkosten. Durch das Zuweisen von festen, uneinheitlichen Planungsfreiräumen an die einzelnen Stufen der Wertschöpfungsketten kann z.T. erhebliches Einsparpotenzial an den Gesamtkosten der Kette nachgewiesen werden. Die Einsparungen verteilen sich jedoch erwartungsgemäß nicht gleichmäßig auf die einzelnen Wertschöpfungsstufen, vielmehr erfolgt die Optimierung einzelner Akteure zu Lasten anderer an der Wertschöpfung beteiligter Einheiten.

Im Sinne der globalen Optimierung ist dieser Umstand unerheblich, für die praktische Umsetzung hingegen ist die Entwicklung entsprechender Verteilungsmechanismen unerlässlich. Die Frage nach der Verteilung der durch die Gesamteinsparung erzielten zusätzlichen Gewinne wird bei der Implementierung und dem

Betrieb eines solchen zeitfensterbasierten Planungssystems in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten eine zentrale Rolle spielen. Hier besteht noch erheblicher Forschungsbedarf, um den industriellen Einsatz der vorgeschlagenen Methodik zu ermöglichen.

Literaturverzeichnis

AGNETIS ET AL. 2001

Agnetis, A.; Detti, P.; Meloni, C.; Pacciarelli, D.: Set-Up Coordination between Two Stages of a Supply Chain. *Annals of Operations Research* 107 (2001) 1-4, S. 15-32.

AGNETIS ET AL. 2002

Agnetis, A.; Hall, N. G.; Pacciarelli, D.: Supply Chain Scheduling: Sequence Coordination. *Discrete Applied Mathematics* 154 (2006) 15, S. 2044-2063.

AKKERMANS ET AL. 1999

Akkermans, H.; Bogerd, P.; Vos, B.: Virtuous and Vicious Cycles on the Road towards International Supply Chain Management. *Int. J. of Operations & Production Management* 19 (1999) 5/6, S. 565-581.

AKKERMANS ET AL. 2003

Akkermans, H.; Bogerd, P.; Yücesan, E.; van Wassenhove, L. N.: The Impact of ERP on Supply Chain Management: Exploratory Findings from a European Delphi Study. *European Journal of Operational Research* 146 (2003) 2, S. 284-301.

AL-MUDIMIGHA ET AL. 2004

Al-Mudimigh, A. S.; Zairi, M.; Ahmed, A. M. M.: Extending the Concept of Supply Chain: The Effective Management of Value Chains. *Int. J. of Production Economics* 87 (2004) 3, S. 309-320.

ALICKE 2002

Alicke, K.: Engpässe vermeiden - Supply Chain Management gleicht Nachfrageschwankungen aus. *MM MaschinenMarkt* (2002) 17, S. 38-41.

ALICKE 2003

Alicke, K.: *Planung und Betrieb von Logistiknetzwerken - Unternehmensübergreifendes Supply Chain Management*. Berlin: Springer 2003.

ANDERSON ET AL. 2000

Anderson, E. G.; Fine, C. H.; Parker, G. G.: Upstream Volatility in the Supply Chain: The Machine Tool Industry as a Case Study. *Production and Operations Management* 9 (2000) 3, S. 239-261.

ANGERHOFER & ANGELIDES 2000

Angerhofer, B. J.; Angelides, M. C.: System Dynamics Modelling in Supply Chain Management: Research Review. In: Joines, J. A.; Barton, R. R.; Kang, K.; Fishwick, P. A. (eds.): *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, Orlando, FL, 2000, S. 342-351.

ANSORGE ET AL. 1996

Ansorge, D.; Glüer, D.; Hofner, C.: Flexible Produktionsstrukturen für den Einsatz autonomer Systeme. In: Schmidt, G.; Freyberger, F. (Hrsg.): *2. Fachgespräch Autonome Mobile Systeme (AMS'96)*. Berlin: Springer 1996.

ASHAYERI ET AL. 1998

Ashayeri, R.: Global Business Process Re-Engineering: A System Dynamics-Based Approach. *Int. J. of Operations & Production Management* 18 (1998) 9, S. 817-831.

ASKIN & IYER 1998

Askin, R. G.; Iyer, A.: Classification and Analysis of Operating Policies for Manufacturing Cells. In: Suresh, N. C., Kay, J. M. (eds.): *Group Technology and Cellular Manufacturing: State-of-the-Art Synthesis of Research and Practice*. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers 1998, S. 362-379.

AURICH & WAGENKNECHT 2003

Aurich, J. C.; Wagenknecht, C.: Prozessintegration von Produktion und Logistik durch APS-Systeme. *PPS Management* 8 (2003) 4, S. 15-18.

AZEVEDO ET AL. 2004

Azevedo, A. L.; Toscano, C.; Sousa, J. P.; Soares, A. L.: An Advanced Agent-Based Order Planning System for Dynamic Networked Enterprises. *Production Planning & Control* 15 (2004) 2, S. 133-144.

BALLOU 2001

Ballou, R. H.: Unresolved Issues in Supply Chain Network Design. *Information Systems Frontiers* 3 (2001) 4, S. 417-426.

BARRHO 2001

Barrho, T.: Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten Fertigungsstrukturen - Ein Beitrag zur Nutzung der Potenziale dezentraler Fertigungsstrukturen in der Auftragsabwicklung. Karlsruhe: Inst. f. Werkzeugmaschinen u. Betriebstechnik 2001. (zugl. Dissertation Universität Karlsruhe (TH) 2001).

BATTEZZATI & MAGNANI 2000

Battezzati, L.; Magnani, R.: Supply Chains for FMCG and Industrial Products in Italy. *Int. J. of Physical Distribution & Logistics Management* 30 (2000) 5, S. 413-424.

BEAMON 1998

Beamon, B. M.: Supply Chain Design and Analysis: Models and Methods. *Int. J. of Production Economics* 55 (1998) 3, S. 281-294.

BEAMON 1999

Beamon, B. M.: Measuring Supply Chain Performance. *Int. J. of Operations & Production Management* 19 (1999) 3, S. 275-292.

BEAMON & CHEN 2001

Beamon, B. M.; Chen, V. C. P.: Performance Analysis of Conjoined Supply Chains. *Int. J. of Production Research* 39 (2001) 14, S. 3195-3218.

BENDERS 2002

Benders, J.: The Origin of Period Batch Control (PBC). *Int. J. of Production Research* 40 (2002) 1, S. 1-6.

BENDERS & RIEZEBOS 2002

Benders, J.; Riezebos, J.: Period Batch Control: Classic not Outdated. *Production Planning & Control* 13 (2002) 6, S. 497-506.

BETGE & LEISTEN 2006

Betge, D.; Leisten, R.: Iteratives APS. PPS Management 11 (2006) 3, S. 19-22.

BHASKARAN 1998

Bhaskaran, S.: Simulation Analysis of a Manufacturing Supply Chain. Decision Sciences 29 (1998) 3, S. 633-657.

BILLINGTON ET AL. 2004

Billington, B.; Callioni, G.; Crane, B.; Ruark, J. D.; Rapp, J. U.; White, T.; Willem, S. P.: Accelerating the Profitability of Hewlett-Packard's Supply Chains. Interfaces 34 (2004) 1, S. 59-72.

BITITCI ET AL. 2003

Bititci, U. S.; Martinez, V.; Albores, P.; Mendible, K.: Creating and Sustaining Competitive Advantage in Collaborative Systems: The What and the How. Production Planning & Control 14 (2003) 5, S. 410-424.

BLACKHURST ET AL. 2004

Blackhurst, J.; Wu, T.; O'Grady, P.: Network-Based Approach to Modelling Uncertainty in a Supply Chain. Int. J. of Production Research 42 (2004) 8, S. 1639-1658.

BORNHÄUSER ET AL. 2005

Bornhäuser, M.; Lickefett, M.; Westkämper, E.: Taktororientierte Fertigungssteuerung - Ein Verfahren zur Fertigungssteuerung einer kundenauftragsbezogenen Werkstattfertigung. wt Werkstattstechnik online 95 (2005) 5, S. 396-404.

BURBIDGE 1957

Burbidge, J. L.: Standard Batch Control. London: MacDonald & Evans 1957.

BURBIDGE 1975

Burbidge, J. L.: The Introduction of Group Technology. London: Heinemann 1975.

BURBIDGE 1978

Burbidge, J. L.: The Principles of Production Control. 4th ed. Plymouth: Mac-Donald and Evans 1978.

BURBIDGE 1988

Burbidge, J. L.: Operation Scheduling with GT and PBC. Int. J. of Production Research 26 (1988) 3, S. 429-442.

BURBIDGE 1989

Burbidge, J. L.: Production Flow Analysis - For Planning Group Technology. Oxford: Clarendon Press 1989. (Oxford Series on Advanced Manufacturing 8).

BURBIDGE 1994

Burbidge, J. L.: The Use of Period Batch Control (PBC) in the Implosive Industries. Production Planning & Control 5 (1994) 1, S. 97-102.

BURBIDGE 1996

Burbidge, J. L.: Period Batch Control. Oxford: Clarendon Press 1996. (Oxford Series on Advanced Manufacturing 12).

CACHON 1999

Cachon, G. P.: Competitive Supply Chain Inventory Management. In: Tayur, S.; Ganeshan, R.; Magazine, M. J. (eds.): Quantitative Models for Supply Chain Management. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers 1999, S. 113-146.

CACHON & ZIPKIN 1999

Cachon, G. P.; Zipkin, P. H.: Competitive and Cooperative Inventory Policies in a Two-Stage Supply Chain. Management Science 45 (1999) 7, S. 936-953.

CAMPBELL & MABERT 1991

Campbell, G. M.; Mabert, V. A.: Cyclical Scheduling for Capacitated Lot Sizing with Dynamic Demand. Management Science 37 (1991) 4, S. 409-427.

CARIDI & CAVALIERI 2004

Caridi, M.; Cavalieri, S.: Multi-Agent Systems in Production Planning and Control: An Overview. Production Planning & Control 15 (2004) 2, S. 106-118.

CAVINATO 2002

Cavinato, J. L.: What's Your Supply Chain Type? Supply Chain Management Review 6 (2002) 3, S. 60-66.

CHANG & LEE 2003

Chang, Y.-C.; Lee, C.-Y.: Logistics Scheduling: Analysis of Two-Stage Problems. Journal of Systems Science and Systems Engineering 12 (2003) 4, S. 385-407.

CHASE & AQUILANO 1998

Chase, R. B.; Aquilano, N. J.; Jacobs, F. R.: Production and Operations Management: Manufacturing and Services. 8th international ed. Boston, MA: Irwin/McGraw-Hill 1998.

CHEN 1999

Chen, F.: Decentralized Supply Chains Subject to Information Delay. Management Science 45 (1999) 8, S. 1076-1090.

CHEN & PAULRAJ 2004A

Chen, I. J.; Paulraj, A.: Towards a Theory of Supply Chain Management: The Constructs and Measurements. Journal of Operations Management 22 (2004) 2, S. 119-150.

CHEN & PAULRAJ 2004B

Chen, I. J.; Paulraj, A.: Understanding Supply Chain Management: Critical Research and a Theoretical Framework. Int. J. of Production Research 42 (2004) 1, S. 131-163.

CHEN & HALL 2000

Chen, Z.-L., Hall, N. G.: Supply Chain Scheduling: Assembly Systems. Working paper, Fisher College of Business, The Ohio State University, Columbus, OH, 2000.

CHENG & KOLVALYOV 2001

Cheng, T. C. E.; Kolvalyov, M. Y.: Single Supplier Scheduling for Multiple Deliveries. *Annals of Operations Research* 107 (2001) 1-4, S. 51-63.

CHEUNG & LEE 2002

Cheung, K. L.; Lee, H. L.: The Inventory Benefit of Shipment Coordination and Stock Rebalancing in a Supply Chain. *Management Science* 48 (2002) 2, S. 300-306.

CHILDE 1997

Childe, S. J.: *An Introduction to Computer Aided Production Management*. London: Chapman & Hall 1997.

CHILDERHOUSE ET AL. 2002

Childerhouse, P.; Aitken, J.; Towill, D. R.: Analysis and Design of Focused Demand Chains. *Journal of Operations Management* 20 (2002) 6, S. 675-689.

CHOI ET AL. 2001

Choi, T. Y.; Dooley, K. J.; Rungtusanatham, M.: Supply Networks and Complex Adaptive Systems: Control versus Emergence. *Journal of Operations Management* 19 (2001) 3, S. 351-366.

CHOI & HONG 2002

Choi, T. Y.; Hong, Y.: Unveiling the Structure of Supply Networks: Case Studies in Honda, Acura, and DaimlerChrysler. *Journal of Operations Management* 20 (2002) 5, S. 469-493.

CHRISTOPHER 1992

Christopher, M.: *Logistics & Supply Chain Management*. London: Pitman Publishing 1992.

CHRISTOPHER & TOWILL 2000

Christopher, M.; Towill, D. R.: Supply Chain Migration from Lean and Functional to Agile and Customised. *Supply Chain Management: An International Journal* 5 (2000) 4, S. 206-213.

CHWIF ET AL. 2002

Chwif, L.; Barretto, M. R. P.; Saliby, E.: Supply Chain Analysis - Spreadsheet or Simulation. In: Yücesan, E.; Chen, C.-H.; Snowdon, J. L.; Charnes, J. M. (eds.): Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, San Diego, CA. 2002, S. 59-66.

CLARK & SCARF 1960

Clark, A. J.; Scarf, H.: Optimal Policies for a Multi-Echelon Inventory Problem. Management Science 6 (1960) 4, S. 475-490.

CLOSS ET AL. 1998

Closs, D. J.; Roath, A. S.; Goldsby, T. J.; Eckert, J. A.; Swartz, S. M.: An Empirical Comparison of Anticipatory and Response-Based Supply Chain Strategies. Int. J. of Logistics Management 9 (1998) 2, S. 21-34.

COHEN & LEE 1988

Cohen, M. A.; Lee, H. L.: Strategic Analysis of Integrated Production-Distribution Systems: Models and Methods. Operations Research 36 (1988) 2, S. 216-228.

COOPER ET AL. 1997

Cooper, M. C.; Lambert, D. M.; Pagh, J. D.: Supply Chain Management: More than a New Name for Logistics. Int. J. of Logistics Management 8 (1997) 1, S. 1-13.

COOPER & SLAGMULDER 1999

Cooper, R.; Slagmulder, R.: Supply Chain Development for the Lean Enterprise - Interorganizational Cost Management. Portland, OR: Productivity Press 1999.

CORSTEN & GÖSSINGER 2001A

Corsten, H.; Gössinger, R.: Einführung in das Supply Chain Management. München: Oldenbourg 2001.

CORSTEN & GÖSSINGER 2001B

Corsten, H.; Gössinger, R.: Auftragsdekomposition und -allokation in Unternehmensnetzwerken. PPS Management 6 (2001) 1, S. 35-41.

CORSTEN & GÖSSINGER 2001C

Corsten, H.; Gössinger, R.: Advanced Planning Systems - Anspruch und Wirklichkeit. PPS Management 6 (2001) 2, S. 32-39.

CROSON & DONOHUE 2003

Crosron, R.; Donohue, K.: Impact of POS Data Sharing on Supply Chain Mangement: An Experimental Study. Production and Operations Management 12 (2003) 1, S. 1-11.

DANGELMAIER ET AL. 2002

Dangelmaier, W; Gajewski, T; Pape, U.; Rütter, M.: Multi-Agenten-Systeme als Ansatz zur Optimierung der Supply Chain. Wisu - Das Wirtschaftsstudium 31 (2002) 4, S. 552-563.

DANGELMAIER ET AL. 2003

Dangelmaier, W.; Pape, U.; Rütter, M.: Ein dezentrales Planungs- und Steuerungssystem für die Supply Chain. In: Hossner, R. (Hrsg.): Jahrbuch Logistik 2003. Düsseldorf: Verlagsgruppe Handelsblatt 2003, S. 70-75.

DAUGHERTY ET AL. 1992

Daugherty, P. J.; Sabath, R. E.; Rogers, D. S.: Competitive Advantage through Customer Responsiveness. Logistics and Transportation Review 28 (1992) 3, S. 257-271.

DAUGHERTY ET AL. 1995

Daugherty, P. J.; Ellinger, A. E.; Rogers, D. S.: Information Accessibility: Customer Responsiveness and Enhanced Performance. Int. J. of Physical Distribution & Logistics Management 25 (1995) 1, S. 4-17.

DAWANDE ET AL. 2006

Dawande, M.; Geismar, H. N.; Hall, N. G.; Sriskandarajah C.: Supply Chain Scheduling: Distribution Systems. Production and Operations Management 15 (2006) 2, S. 243-261.

DE LEEDE & LOOISE 2001

de Leede, J.; Looise, J. C.: Demanding More than People Can Deliver: Exploring the Issues of Loyalty and Commitment in Enterprise Collaborations. *Production Planning & Control* 12 (2001) 5, S. 504-513.

DISNEY ET AL. 2003

Disney, S. M.; Potter, A. T.; Gardner, B. M.: The Impact of Vendor Managed Inventory on Transport Operations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 39 (2003) 5, S. 363-380.

DOMBROWSKI ET AL. 2006

Dombrowski, U.; Schmidt, S.; Wrehde, J.: Herausforderungen in der Automobilproduktion. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 101 (2006) 5, S. 254-259.

DUDEK ET AL. 2002

Dudek, G.; Rohde, J.; Sürle, C.: Advanced Planning Systems - Lösungsverfahren und Modellierung. *Industrie Management* 18 (2002) 6, S. 49-52.

EL-NAJDAWI & KLEINDORFER 1993

El-Najdawi, M. K.; Kleindorfer, P. R.: Common Cycle Lot-Size Scheduling for Multi-Product, Multi-Stage Production. *Management Science* 39 (1993) 7, S. 872-885.

FÄRBER ET AL. 2002

Färber, U.; Kuppinger, R.; Löllmann, P.: Das 3Liter-PPS® Konzept: Die richtige Dosis PPS für Kundenauftragsfertiger - Effizientes Auftragsmanagement in dezentralen Strukturen. *wt Werkstatttechnik online* 92 (2002) 5, S. 242-247.

FEITZINGER & LEE 1997

Feitzinger, E.; Lee, H. L.: Mass Customization at Hewlett-Packard: The Power of Postponement. *Harvard Business Review* 75 (1997) 1, S. 116-121.

FINE 2000

Fine, C.: Clockspeed-Based Strategies for Supply Chain Design. *Production and Operations Management* 9 (2000) 3, S. 213-221.

FINK 2002

Fink, A.: Grenzen des Einsatzes einer agentenbasierten Produktionsplanung mit marktorientierten Koordinationsmechanismen. PPS Management 7 (2002) 2, S. 47-50.

FINKLER 2006

Finkler, M.: Advanced Planning and Scheduling – die stille ERP-Revolution. PPS Management 11 (2006) 3, S. 23-25.

FISHER 1997

Fisher, M. L.: What is the Right Supply Chain for Your Product? Harvard Business Review 75 (1997) 2, S. 105-116.

FLEISCHMANN ET AL. 2005

Fleischmann, B.; Meyr, H.; Wagner, M.: Advanced Planning. In: Stadler, H.; Kilger, C. (eds.): Supply Chain Management and Advanced Planning: Concepts, Models, Software and Case Studies. 3rd ed. Berlin: Springer 2005, S. 81-106.

FORRESTER 1958

Forrester, J. W.: Industrial Dynamics: A Major Breakthrough for Decision Makers. Harvard Business Review 36 (1958) 4, S. 37-66.

FOULDS & NEUMANN 2003

Foulds, L. R.; Neumann, K.: A Network Flow Model of Group Technology. Mathematical and Computer Modelling 38 (2003) 5-6, S. 623-635.

FRAMINAN ET AL. 2003

Framinan, J. M.; González, P. L.; Ruiz-Usano, R.: The CONWIP Production Control System: Review and Research Issues. Production Planning & Control 14 (2003) 3, S. 255-265.

FRIEDRICH & KAMPKER 2001

Friedrich, J.-M.; Kampker, R.: Supply Chain Management für kleine und mittlere Unternehmen. PPS Management 5 (2001) 4, S. 9-15.

FROHLICH & WESTBROOK 2001

Frohlich, M. T.; Westbrook, R.: Arcs of Integration: An International Study of Supply Chain Strategies. *Journal of Operations Management* 19 (2001) 21, S. 185-200.

GANESHAN ET AL. 1999

Ganeshan, R.; Jack, E.; Magazine, M. J.; Stephens, P.: A Taxonomic Review of Supply Chain Management Research. In: Tayur, S.; Ganeshan, R.; Magazine, M. J. (eds.): *Quantitative Models for Supply Chain Management*. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers 1999, S. 840-879.

GAVIRNENI ET AL. 1999

Gavirneni, S.; Kapuscinski, R.; Tayur, S.: Value of Information in Capacitated Supply Chains. *Management Science* 45 (1999) 1, S. 16-24.

GJERDRUM ET AL. 2001

Gjerdrum, J.; Shah, N.; Papageorgiou, L. G.: A Combined Optimization and Agent-Based Approach to Supply Chain Modelling and Performance Assessment. *Production Planning & Control* 12 (2001) 1, S. 81-88.

GÖPFERT & GRÜNERT 2006

Göpfert, I.; Grünert, M.: Logistiktrends in den Wertschöpfungsnetzen der Automobilindustrie. In: Wolf-Kluthausen, Hanne (Hrsg.): *Jahrbuch Logistik 2006*. Korschbroich: free beratung GmbH 2006, S. 130-137.

GRAF 2005

Graf, R.: *Erweitertes Supply Chain Management zur Ersatzteilversorgung*. Essen: Vulkan 2005. (zugl. Dissertation TU Braunschweig 2005).

GRAVES 1981

Graves, S. C.: A Review of Production Scheduling. *Operations Research* 29 (1981) 4, S. 646-675.

GRAVES ET AL. 1998

Graves, S. C.; Kletter D. B.; Hetzel W. B.: A Dynamic Model for Requirements Planning with Application to Supply Chain Optimization. *Operations Research* 49 (1998) 3, S. S35-S49.

GRAVES & KOSTREVA 1986

Graves, S. C.; Kostreva, M. M.: Overlapping Operations in Material Requirements Planning. *Journal of Operations Management* 6 (1986) 3, S. 283-294.

GUSTIN ET AL. 1995

Gustin, G. M.; Daugherty, P. J.; Stank, T. P.: The Effects of Information Availability on Logistics Integration. *Journal of Business Logistics* 16 (1995) 1, S. 1-21.

HAFEEZ ET AL. 1996

Hafeez, K.; Griffiths, M.; Griffiths, J.; Naim, M. M.: Systems Design of a Two-Echelon Steel Industry Supply Chain. *Int. J. of Production Economics* 45 (1996) 1-3, S. 121-130.

HAHM & YANO 1995

Hahm, J.; Yano, C. A.: The Economic Lot and Delivery Scheduling Problem: The Common Cycle Case. *IIE Transactions* 27 (1995) 2, S. 113-125.

HAHN-DRODOFSKY 1999

Hahn-Drodofsky, R.: Konsequenzen dezentraler Fertigungsbereiche für PPS-Funktionen - dargestellt an Beispielen aus der Automobilindustrie. Heimsheim: Jost-Jetter 1999. (zugl. Dissertation Universität Stuttgart 1999).

HAIR ET AL. 1995

Hair, J. F.; Anderson, R. E.; Tatham, R. L.; Black, W. C.: *Multivariate Data Analysis*. 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall 1995.

HALL 1988

Hall, R. W.: Cyclic Scheduling for Improvement. *Int. J. of Production Research* 26 (1988) 3, S. 457-472.

HALL & POTTS 2003

Hall, N. G.; Potts, C. N.: Supply Chain Scheduling: Batching and Delivery. *Operations Research* 51 (2003) 4, S. 566-584.

HANFIELD & NICHOLS 1999

Handfield, R. B.; Nichols, E. L.: *Introduction to Supply Chain Management*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall 1999.

HARRISON 1997

Harrison, A.: Investigating the Sources and Causes of Schedule Instability. *Int. J. of Logistics Management* 8 (1997) 2, S. 75-82.

HARRISON 2001

Harrison, T. P.: Global Supply Chain Design. *Information Systems Frontiers* 3 (2001) 4, S. 413-416.

HARRISON ET AL. 1999

Harrison, A.; Christopher, M.; van Hoek, R.: *Creating the Agile Supply Chain*. Working Paper, Cranfield School of Management, Cranfield, 1999.

HARTMANN & HORNING 2004

Hartmann, C.; Hornung, R.: Capacity Collaboration - Integrierte Kapazitätsplanung und -steuerung zwischen OEM und Lieferant. In: Schönsleben, P. (Hrsg.): *Tagungsunterlagen der Züricher PPS-Tage 2004*, Zürich. 2004, S. 1-22.

HAYEK 1945

Hayek, F. A.: The Use of Knowledge in Society. *American Economic Review* 35 (1945) 4, S. 519-530.

HIEBER & HARTEL 2003

Hieber, R.; Hartel, I.: Impacts of SCM Order Strategies Evaluated by Simulation-Based 'Beer Game' Approach: The Model, Concept, and Initial Experiences. *Production Planning & Control* 14 (2003) 2, S. 122-134.

VAN HOEK ET AL. 1999

van Hoek, R. I.; Peelen, E.; Commandeur, H. R.: Achieving Mass Customization through Postponement: A Study of International Changes. *Journal of Market-Focused Management* 3 (1999) 3-4, S. 353-368.

HOFSTEDE 1995

Hofstede, G. J.: Open Problems, Formal Problems. *Decision Sciences* 4 (1995) 2, S. 155-165.

HOFSTEDE ET AL. 2003

Hofstede, G. J. ; Kramer, M.; Meijer, S.; Wijdemans, J.: A Chain Game for Distributed Trading and Negotiation. *Production Planning & Control* 14 (2003) 2, S. 111-121.

HOLWEG & BICHENO 2002

Holweg, M.; Bicheno, J.: Supply Chain Simulation - A Tool for Education, Enhancement and Endeavour. *Int. J. of Production Economics* 78 (2002) 2, S. 163-175.

HUANG ET AL. 2003

Huang, G. Q.; Lau, J. S. K.; Mak, K. L.: The Impacts of Sharing Production Information on Supply Chain Dynamics: A Review of the Literature. *Int. J. of Production Research* 41 (2003) 7, S. 1483-1517.

HYER & WEMMERLOV 1982

Hyer, N.; Wemmerlov, U.: MRP/GT: A Framework for Production Planning and Control of Cellular Manufacturing. *Decision Sciences* 13 (1982) 4, S. 681-701.

IOANNOU ET AL. 2004

Ioannou, G.; Prastacos, G.; Skintzi, G.: Inventory Positioning in Multiple Product Supply Chains. *Annals of Operations Research* 126 (2004) 1-4, S. 195-213.

JAGDEV & THOBEN 2001

Jagdev, H. S.; Thoben, K.-D.: Anatomy of Enterprise Collaborations. *Production Planning & Control* 12 (2001) 5, S. 437-451.

JAMSHIDI & BROWN 1993

Jamshidi, H.; Brown, R. A.: Development of Production Cycles for Group Technology Environment with the Wagner-Whitin Algorithm. Computers & Industrial Engineering 24 (1993) 2, S. 199-207.

JOHANSSON ET AL. 1993

Johansson, H. J.; McHugh, P.; Pendlebury, A. J.; Wheeler III, W. A.: Business Process Re-Engineering. Chichester: Wiley 1993.

JOHNSON & PYKE 2000

Johnson, M. E.; Pyke, D. F.: A Framework for Teaching Supply Chain Management. Production and Operations Management 9 (2000) 1, S. 2-18.

KAKU & KRAJEWSKI 1995

Kaku, B.K.; Krajewski, L.J.: Period Batch Control in Group Technology. Int. J. of Production Research 33 (1995) 1, S. 79-99.

KALUZA ET AL. 2003

Kaluza, B.; Dullnig, H.; Malle, F.: Principal-Agent-Probleme in Supply Chains-Problemanalyse und Diskussion von Lösungsvorschlägen. Klagenfurt: Instituts für Wirtschaftswissenschaften 2003. (Diskussionsbeiträge des Instituts für Wirtschaftswissenschaften der Universität Klagenfurt Nr. 2003/03).

KALUZA & BLECKER 2001A

Kaluza, B.; Blecker, T.: Konzept einer Produktionsplanung und -steuerung in der Unternehmung ohne Grenzen. Klagenfurt: Instituts für Wirtschaftswissenschaften 2001. (Diskussionsbeiträge des Instituts für Wirtschaftswissenschaften der Universität Klagenfurt Nr. 2001/02).

KALUZA & BLECKER 2001B

Kaluza, B.; Blecker, T.: Produzieren in vernetzen Unternehmen. Industrie Management 17 (2001) 5, S. 49-52.

KATH 1994

Kath, H.: Horizontale Abstimmung dezentraler Leitstandssysteme. Bochum: Lehrstuhl für Produktionssysteme und Prozeßleittechnik 1993. (zugl. Dissertation Ruhr-Universität Bochum 1993).

KEIZERS ET AL. 2003

Keizers, J. M.; Bertrand, W. M.; Wessels, J.: Diagnosing Order Planning Performance at a Navy Maintenance and Repair Organization, Using Logistic Regression. *Production and Operations Management* 12 (2003) 4, S. 445-463.

KERNLER 1995

Kernler, H.: PPS der 3. Generation - Grundlagen, Methoden, Anregungen. 3. Aufl. Heidelberg: Hüthing 1995.

KLEMENT 2005

Klement, R.: Agentenbasiertes Produktdatenmanagement. Aachen: Shaker 2005. (zugl. Dissertation RWTH Aachen 2005).

KLINKEL 2004

Klinkel, S.: Multi-kriterielle Feinplanung in teilautonomen Produktionsbereichen - Ein Beitrag zur produkt- und prozessorientierten Planung und Steuerung. Karlsruhe: Inst. f. Werkzeugmaschinen u. Betriebstechnik 2004. (zugl. Dissertation Universität Karlsruhe (TH) 2004).

KREIPL & PINEDO 2004

Kreipl, S.; Pinedo, M.: Planning and Scheduling in Supply Chains: An Overview of Issues in Practice. *Production and Operations Management* 13 (2004) 1, S. 77-92.

KRESKEN & BAUMANN 2006

Kresken, T.; Baumann, M.: Selbst ist der Auftrag - Selbstorganisierende Verfahren zur Produktionssteuerung. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 101 (2006) 5, S. 269-272.

KUPPINGER 2001

Kuppinger, R.; Nehmeyr, A.: Auftragsmanagement in dezentrale Strukturen - Einsatz des 3Liter-PPS im zentralen Werkzeugbau des Schott-Konzerns. wt Werkstattstechnik online 91 (2001) 6, S. 342-344.

KURBEL 2005

Kurbel, K.: Produktionsplanung und -steuerung im Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management. 6. Aufl. München: Oldenbourg 2005.

LAMBERT ET AL. 1998

Lambert, D. M.; Cooper, M. C.; Pagh, J. D.: Supply Chain Management: Implementation Issues and Research Opportunities. Int. J. of Logistics Management 9 (1998) 2, S. 1-19.

LAMPEL & MINTZBERG 1996

Lampel, J.; Mintzberg, H.: Customizing Customization. Sloan Management Review 38 (1996) 1, S. 21-30.

VAN LANDEGHEMA & VANMAELE 2002

van Landeghema, H.; Vanmaele, H.: Robust Planning: A New Paradigm for Demand Chain Planning. Journal of Operations Management 20 (2002) 6, S. 769-783.

LANZA ET AL. 2006

Lanza, G.; Herm, M.; Ude, J.: Anlaufleistung in Wertschöpfungsnetzwerken - Konfiguration von Wertschöpfungsnetzwerken auf Basis von Qualitätsfähigkeiten im Produktionsanlauf. wt Werkstattstechnik online 96 (2006) 4, S. 233-238.

LEDERER & LI 1997

Lederer, P.; Li, L.: Pricing, Production, Scheduling and Delivery-Time Competition. Operations Research 45 (1997) 3, S. 407-420.

LEE 1985

Lee, L.C.: A Study of System Characteristics in a Manufacturing Cell. Int. J. of Production Research 23 (1985) 6, S. 1101-1114.

LEE ET AL. 1997A

Lee, H. L.; Padmanabhan, V.; Whang, S.: The Bullwhip Effect in Supply Chains. Sloan Management Review 38 (1997) 3, S. 93-102.

LEE ET AL. 1997B

Lee, H. L.; Padmanabhan, V.; Whang, S.: Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect. Management Science 43 (1997) 4, S. 546-558.

LEE & POSNER 1997

Lee, T.-E.; Posner, M. E.: Performance Measures and Schedules in Periodic Job Shops. Operations Research 45 (1997) 1, S. 72-91.

LEE & WHANG 1999

Lee, H.; Whang, S.: Decentralized Multi-Echelon Supply Chains: Incentives and Information. Management Science 45 (1999) 5, S. 633-642.

LI ET AL. 2004

Li, J.; Enginarlar, E.; Meerkov, S. M.: Random Demand Satisfaction in Unreliable Production-Inventory-Customer Systems. Annals of Operations Research 126 (2004) 1-4, S. 159-175.

LI & XIAO 2004

Li, C.-L.; Xiao, W.-Q.: Lot Streaming with Supplier-Manufacturer Coordination. Naval Research Logistics 51 (2004) 4, S. 522-542.

LITTLE 1961

Little, J. D. C.: A Proof for the Queuing Formula $L = \lambda W$. Operations Research 9 (1961) 3, S. 383-387.

LOERCH & MUCKSTADT 1994

Loerch, A. G.; Muckstadt, J. A.: An Approach to Production Planning and Scheduling in Cyclically Scheduled Manufacturing Systems. Int. J. of Production Research 32 (1994) 4, S. 851-871.

LÖLLMANN & FÄRBER 1998

Löllmann, P.-M.; Färber, U.: Auftragsmanagement in Produktionsnetzwerken mit dem 3Liter-PPS-Konzept. In: Westkämper, E.; Schraft, R.D. (Hrsg.): Auftrags- und Informationsmanagement in Produktionsnetzwerken - Konzepte und Erfahrungsberichte: 3. Stuttgarter PPS-Seminar, Stuttgart. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, 1998, S. 179-210.

LOPITZSCH 2005

Lopitzsch, J. R.: Segmentierte Adaptive Fertigungssteuerung. Garbsen: Produktionstechnisches Zentrum GmbH 2005. (zugl. Dissertation Universität Hannover 2005).

LUCZAK & LASSEN 2005

Luczak, H.; Lassen, S.: Auftragskoordination in hybriden Lieferketten. PPS Management 10 (2005) 4, S. 48-51.

LULAY 1999

Lulay, W. E.: Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen. München: Herbert Utz 1999. (zugl. Dissertation TU München 1999).

MAHMOODI & MOSIER 1998

Mahmoodi, F.; Mosier, C. T.: Scheduling Rules for Cellular Manufacturing. In: Suresh, N. C., Kay, J. M. (eds.): Group Technology and Cellular Manufacturing: State-of-the-Art Synthesis of Research and Practice. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers 1998, S. 321-338.

MARQUEZ ET AL. 2004

Marquez, A. D.; Bianchi, C.; Gupta, J. N. D.: Operational and Financial Effectiveness of E-Collaboration Tools in Supply Chain Integration. European Journal of Operational Research 159 (2004) 2, S. 348-363.

MASON-JONES & TOWILL 1999

Mason-Jones, R.; Towill, D. R.: Using the Information Decoupling Point to Improve Supply Chain Performance. *Int. J. of Logistics Management* 10 (1999) 2, S. 13-26.

MEIER ET AL. 2001

Meier, H.; Bäcker, M.; Kastens, O.; Schallner, H.; Thorn, J.: Auftragskoordination über verbindliche Lieferterminezusagen in dynamischen Produktionsnetzwerken. *Industrie Management* 17 (2001) 5, S. 58-62.

MEYR ET AL. 2005

Meyr, H.; Wagner, M.; Rhode, J.: Structure of Advanced Planning Systems. In: Stadtler, H.; Kilger, C. (eds.): *Supply Chain Management and Advanced Planning: Concepts, Models, Software and Case Studies*. Berlin: Springer 2005, S. 109-115.

MILLING 2002

Milling, P.: Systemtheoretische und kybernetische Empfehlungen für das SCM. In: Scholz, C. (Hrsg.): *Systemdenken und Virtualisierung. Unternehmensstrategien zur Vitalisierung und Virtualisierung auf der Grundlage von Systemtheorie und Kybernetik*. Berlin: Duncker & Humblot 2002, S. 279-291.

MILLING & GRÖBLER 2001

Milling, P.; Größler, A.: *Management von Material- und Informationsflüssen in Supply Chains: System Dynamics basierte Analysen*. Mannheim: Fakultät für Betriebswirtschaftslehre 2001. (Forschungsberichte der Fakultät für Betriebswirtschaftslehre der Universität Mannheim Nr. 2001-01).

MINTZBERG 1979

Mintzberg, H.: *The Structuring of Organizations*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall 1979.

MORECROFT 1979

Morecroft, J. D.: *Influence from Information Technology on Industry Cycles*. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology 1979. (zugl. Dissertation Alfred P. Sloan School of Management 1979).

MÜLLER ET AL. 2006

Müller, E.; Müssig, B.; Dietrich, A.: Erfolgsfaktoren der mobilen Produktion - Wirkungen von Produktionsverlagerungen und Einflüsse auf überbetriebliche Mobilität. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 101 (2006) 4, S. 198-202.

NAYLOR ET AL. 1999

Naylor, J. B.; Naim, M. M.; Berry, D.: Leagility: Integrating the Lean and Agile Manufacturing Paradigms in the Total Supply Chain. Int. J. of Production Economics 62 (1999) 1-2, S. 107-118.

NEUMANN & MORLOCK 2002

Neumann, K.; Morlock, M.: Operations Research. 2. Aufl. München: Carl Hanser 2002.

NEW 1977

New, C.: MRP and GT, a New Strategy for Component Production. Production and Inventory Management Journal 18 (1977) 3, S. 50-62.

NYHUIS ET AL. 2005

Nyhuis, P.; Großhenning, P.; Mühlenbruch, H.: Das Globale Varianten Produktionssystem - Eine Globalisierungsstrategie für kleine und mittelständische Unternehmen. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 101 (2005) 5, S. 282-286.

OTTO & KOTZAB 2003

Otto, A.; Kotzab, H.: Does Supply Chain Management Really Pay? Six Perspectives to Measure the Performance of Managing a Supply Chain. European Journal of Operational Research 144 (2003) 2, S. 306-320.

OUENNICHE & BOCTOR 1998

Ouenniche, J.; Boctor, F.: Sequencing, Lot-Sizing and Scheduling of Several Products in Job Shops: The Common Cycle Approach. Int. J. of Production Research 36 (1998) 4, S. 1125-1140.

OVALLE & MARQUEZ 2003

Ovalle, O. R.; Marquez, A. C.: Exploring the Utilization of a CONWIP System for Supply Chain Management. A Comparison with Fully Integrated Supply Chains. *Int. J. of Production Economics* 83 (2003) 2, S. 195-215.

PAGH & COOPER 1998

Pagh, J. D.; Cooper, M. C.: Supply Chain Postponement and Speculation Strategies: How to Choose the Right Strategy. *Journal of Business Logistics* 19 (1998) 2, S. 13-33.

PARSONS & PHELPS 2001

Parsons, D. J.; Phelps, R. A.: Production Scheduling Validity in High Level Supply Chain Models. In: Peters, B. A.; Smith, J. S.; Medeiros, D. J.; Rohrer, M. W. (eds.): *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, Arlington, VA. 2001, S. 560-564.

PILLEP & VON WREDE 1999

Pillep, R., von Wrede, P.: Grundlagen des Supply Chain Management. In: Luczak, H.; Eversheim, W.; Stich, V. (Hrsg.): *Marktspiegel Supply Chain Management Software*. Aachen: Forschungsinstitut für Rationalisierung 1999, S. 1-16.

PORTEUS 2000

Porteus, E. L.: Responsibility Tokens in Supply Chain Management. *Manufacturing & Service Operations Management* 2 (2000) 2, S. 203-219.

POSSEL-DÖLKEN 2006

Possel-Dölken, F.: *Projektierbares Multiagentensystem für die Ablaufsteuerung in der flexibel automatisierten Fertigung*. Aachen: Shaker 2006. (zugl. Dissertation RWTH Aachen 2006).

RACHAMADUGU & TU 1997

Rachamadugu, R.; Tu, Q.: Period Batch Control for Group Technology - An Improved Procedure. *Computers & Industrial Engineering* 32 (1997) 1, S. 1-7.

REINSCH 2004

Reinsch, S.: Kennzahlenbasierte Positionierung der Logistik von Lieferketten. Garbsen: Produktionstechnisches Zentrum GmbH 2004. (zugl. Dissertation Universität Hannover 2004).

RICE & HOPPE 2001

Rice, J. B.; Hoppe, R. M.: Supply Chain versus Supply Chain the Hype and the Reality. Supply Chain Management Review 5 (2001) 5, S. 46-52.

RIEZEBOS 2001

Riezebos, J.: Design of a Period Batch Control Planning System for Cellular Manufacturing. Enschede: PrintPartners Ipskamp 2001. (zugl. Dissertation Universität Groningen 2001).

RIEZEBOS ET AL. 1998

Riezebos, J.; Shambu, G.; Suresh, N. C.: Production Planning and Control Systems for Cellular Manufacturing. In: Suresh, N. C., Kay, J. M. (eds.): Group Technology and Cellular Manufacturing: State-of-the-Art Synthesis of Research and Practice. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers 1998, S. 289-308.

ROHDE ET AL. 2000

Rohde, J.; Meyr, H.; Wagner, M.: Die Supply Chain Planning Matrix. PPS Management 5 (2000) 1, S. 10-15.

SARKER & ZANGWILL 1991

Sarkar, D.; Zangwill, W. T.: Variance Effects in Cyclic Production Systems. Management Science 37 (1991) 4, S. 444-453.

SCHLÜTER 2001

Schlüter, F.: Hybride PPS für heterogene Fertigungsstrukturen. Wiesbaden: Gabler Edition Wissenschaft 2001. (zugl. Dissertation TU Ilmenau 2000).

SCHMID 2006

Schmid, S.: Das aktuelle Stichwort: APS-Systeme. PPS Management 11 (2006) 3, S. 14.

SCHMITTING 2000

Schmitting, W.: Das Traveling-Salesman-Problem - Anwendungen und heuristische Nutzung von Voronoi-/Delaunay-Strukturen zur Lösung euklidischer, zweidimensionaler Traveling-Salesman-Probleme. Münster: Schmitting 2000. (zugl. Dissertation Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf 1999).

SCHNEIDER 2004

Schneider, M.: Logistische Fertigungsbereichskennlinien. Düsseldorf: VDI-Verlag 2004. (zugl. Dissertation Universität Hannover 2004).

SCHULZE ET AL. 2006

Schulze, E.; Fischäder, H.; Schneider, H.: Bedeutung einer zentralen Koordinationsinstanz in segmentierten Fertigungsstrukturen. PPS Management 11 (2006) 2, S. 39-42.

SCHWARZ & WENG 2000

Schwarz, L. B.; Weng, Z. K.: The Design of a JIT Supply Chain: The Effect of Leadtime Uncertainty on Safety Stock. Journal of Business Logistics 21 (2000) 2, S. 231-253.

SCHWEIER 2000

Schweier, H.: Erfolgsorientierte Steuerung logistischer Netzwerke. In: Hossner, R. (Hrsg.): Jahrbuch Logistik 2000. Düsseldorf: Verlagsgruppe Handelsblatt 2000, S. 141-145.

SEGERSTEDT 1995

Segerstedt, A.: Cover-Time Planning, a Method for Calculation of Material Requirements. Int. J. of Production Economics 41 (1995) 1-3, S. 355-368.

SEIBOLD 2006

Seibold, J.: Hybride Fertigungssteuerung in der Großserienproduktion. Garbsen: Produktionstechnisches Zentrum GmbH 2006. (zugl. Dissertation Universität Hannover 2006).

Literaturverzeichnis

SEMMELOGGEN 1999

Semmelroggen, H. G.: Werk Rastsatt: Logistikkonzept "Perlenkette" gemeinsam mit der A-Klasse entwickelt. Logistik im Unternehmen 13 (1999) 9, S. 8-12.

SENGE 1990

Senge, P. M.: The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organization. New York, NY: Doubleday 1990.

SEURING 2001

Seuring, S.: Die Produkt-Kooperations-Matrix im Supply Chain Management: Konzeption und instrumentelle Ausgestaltung. Oldenburg: Carl von Ossietzky-Universität 2001. (EcoMTex-Diskussionspapier Nr. 2).

SHARMAN 1984

Sharman, G.: The Rediscovery of Logistics. Harvard Business Review 62 (1984) 5, S. 71-79.

SHINGO 1985

Shingo, S.: A Revolution in Manufacturing: The SMED System. Cambridge, MA: Productivity Press 1985.

SIHN ET AL. 1999

Sihn, W.; Färber, U.; Löllmann, P.: Das 3Liter-PPS-Konzept: Auftragsprozeßmanagement für dezentrale Organisationsstrukturen. wt Werkstattstechnik 89 (1999) 4, S. 141-143.

SIHN ET AL. 2000

Sihn, W.; Löllmann, P.; Dobler, J.: 3Liter-PPS: PPS-Lösung für dezentrale Organisationsstrukturen. PPS Management 5 (2000) 4, S. 36-39.

SILVER 1989

Silver, E. A.: Shelf Life Considerations in a Family Production Context. Int. J. of Production Research 27 (1989) 12, S. 2021-2026.

SILVER 1990

Silver, E. A.: Deliberately Slowing Down Output in a Family Production Context. *Int. J. of Production Research* 28 (1990) 1, S. 17-27.

SMĀROS ET AL. 2003

Smāros, J.; Lehtonen, J.-M.; Appelqvist, P.; Holmström, J.: The Impact of Increasing Demand Visibility on Production and Inventory Control Efficiency. *Int. J. of Physical Distribution & Logistics Management* 33 (2003) 4, S. 336-354.

SPATH ET AL. 2001

Spath, D.; Barrho, T.; Klinkel, S.: PPS in segmentierten Strukturen: Überflüssig oder unerlässlich? *PPS Management* 6 (2001) 3, S. 10-13.

SPATH ET AL. 2002

Spath, D.; Klinkel, S.; Barrho, T.: Auftragsabwicklung in dezentralen Strukturen: Erfolgsfaktoren und Probleme - Ergebnisse einer Studie. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 97 (2002) 3, S. 130-132.

SPENS & BASK 2002

Spens, K. M.; Bask, A. H.: Developing a Framework for Supply Chain Management. *Int. J. of Logistics Management* 13 (2002) 1, S. 73-88.

STADTLER 2005

Stadtler, H.: Supply Chain Management and Advanced Planning - Basics, Overview and Challenges. *European Journal of Operational Research* 163 (2005) 3, S. 575-588.

STEELE 1998

Steele, D.C.: Period Batch Control Systems for Cellular Manufacturing. In: Suresh, N. C., Kay, J. M. (eds.): *Group Technology and Cellular Manufacturing: State-of-the-Art Synthesis of Research and Practice*. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers 1998, S. 309-320.

STEELE ET AL. 1995

Steele, D. C.; Berry, W. L.; Chapman, S. N.: Planning and Control in Multi-Cell Manufacturing. *Decision Sciences* 26 (1995) 1, S. 1-34.

STEELE & MALHOTRA 1997

Steele, D. C.; Malhotra, M. K.: Factors Affecting Performance of Period Batch Control Systems in Cellular Manufacturing. *Int. J. of Production Research* 35 (1997) 2, S. 421-446.

VON STEINAECKER 1999

von Steinaecker, J.: Kommunikationsorientiertes PPS-Konzept unterstützt Umweltorientierung und Produktionsnetzwerke. *Logistik im Unternehmen* 13 (1999) 3, S. 28-30.

STERMAN 1989

Sterman, J. D.: Modeling Managerial Behavior: Misperceptions of Feedback in a Dynamic Decision Making Experiment. *Management Science* 35 (1989) 3, S. 321-339.

STERMAN 2000

Sterman, J. D.: *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Boston, MA: Irwin/McGraw-Hill 2000.

STIEFBOLD 1998

Stiefbold, O.: *Konzeption eines reaktionsschnellen Planungssystems für Logistikketten auf Basis von Software-Agenten*. Karlsruhe: Ernst Grässer 1998. (zugl. Dissertation Universität Karlsruhe (TH) 1998).

SÜER 1998

Süer, G. A.: Operation and Control of Cellular Systems at Avon Lomalinda, Puerto Rico. In: Suresh, N. C., Kay, J. M. (eds.): *Group Technology and Cellular Manufacturing: State-of-the-Art Synthesis of Research and Practice*. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers 1998, S. 339-361.

SURESH & KAY 1998

Suresh, N. C.; Kay, J. M. (eds.): *Group Technology and Cellular Manufacturing: State-of-the-Art Synthesis of Research and Practice*. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers 1998.

SWAMINATHAN ET AL. 1998

Swaminathan, J. M.; Smith, S. F.; Sadeh, N. M.: Modeling Supply Chain Dynamics: A Multiagent Approach. *Decision Sciences* 29 (1998) 3, S. 607-632.

SZENDROVITS 1975

Szendrovits, A. Z.: Manufacturing Cycle Time Determination for a Multi-Stage Economic Production Quantity Model. *Management Science* 22 (1975) 3, S. 298-308.

THOMAS & GRIFFIN 1996

Thomas, D. J.; Griffin, P. M.: Coordinated Supply Chain Management. *European Journal of Operational Research* 94 (1996) 1, S. 1-15.

TOWILL & CHRISTOPHER 2002

Towill, D.; Christopher, M.: The Supply Chain Strategy Conundrum: To be Lean Or Agile or To be Lean And Agile? *Int. J. of Logistics: Research and Applications* 5 (2002) 3, S. 299-309.

VEKSTEIN & PREISS 2002

Vekstein, D.; Preiss, K.: The Effect of Time Delays in Make-to-Order Information on the Dynamics of Supply Chains. *Int. J. of Manufacturing Technology and Management* 4 (2002) 5, S. 384-400.

VICKERY ET AL. 2003

Vickery, S. K.; Jayaram, J.; Droge, C.; Calantone, R.: The Effects of an Integrative Supply Chain Strategy on customer service and Financial Performance: An Analysis of Direct versus Indirect Relationships. *Journal of Operations Management* 21 (2003) 5, S. 523-539.

VISWANATHAN & MATHUR 1997

Viswanathan, S.; Mathur, K.: Integrating Routing and Inventory Decisions in One-Warehouse Multiretailer Multiproduct Distribution Systems. *Management Science* 43 (1997) 3, S. 294-312.

Literaturverzeichnis

VOLLMANN ET AL. 1992

Vollmann, T. E.; Berry, W. L.; Whybark, D. C.: Manufacturing Planning and Control Systems. Homewood, IL: Irwin 1992.

VOS & AKKERMANS 1996

Vos, B.; Akkermans, H.: Capturing the Dynamics of Facility Allocation. Int. J. of Operations & Production Management 16 (1996) 11, S. 57-70.

WARBURTON 2004

Warburton, R. D. H.: An Analytical Investigation of the Bullwhip Effect. Production and Operations Management 13 (2004) 2, S. 150-160.

WARNECKE 1992

Warnecke, H.-J.: Die Fraktale Fabrik - Revolution der Unternehmenskultur. Berlin: Springer 1992.

WEMMERLOV 1988

Wemmerlov, U.: Production Planning and Control Procedures for Cellular Manufacturing Systems. Falls Church, VA: American Production and Inventory Control Society 1988.

WEMMERLOV & HYER 1987

Wemmerlov, U.; Hyer, N.: Research Issues in Cellular Manufacturing. Int. J. of Production Research 25 (1987) 3, S. 413-431.

WEMMERLOV & HYER 1989

Wemmerlov, U.; Hyer, N.: Cellular Manufacturing in the U.S. Industry: A Survey of Users. Int. J. of Production Research 27 (1989) 9, S. 1511-1530.

WIENDAHL & HARMS 2004

Wiendahl, H.-P.; Harms, T.: Self-Organized Production Based on Agent Theory. Production Planning & Control 15 (2004) 2, S. 213-224.

WIKIPEDIA

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie, <http://de.wikipedia.org>.

WILDEMANN 1988

Wildemann, H.: Die modulare Fabrik: Kundennahe Produktion durch Fertigungssegmentierung. München: gfmt 1988.

XIAOBO ET AL. 2003

Xiaobo, Z.; Gong, Q.; Wang, J.: Generally Configured Supply Chain with Flexible Local Control Strategies. *Int. J. of Production Research* 41 (2003) 12, S. 2817-2838.

YANG & BURNS 2003

Yang, B.; Burns, N.: Implications of Postponement for the Supply Chain. *Int. J. of Production Research* 41 (2003) 9, S. 2075-2090.

YANG & JACOBS 1992

Yang, K. K.; Jacobs, F. R.: Comparison of Make-to-Order Job Shops with Different Machine Layouts and Production Control Systems. *Int. J. of Production Research* 30 (1992) 6, S. 1269-1283.

YOUSSEF ET AL. 2004

Youssef, H. K.; van Delft, C.; Dallery, Y.: Efficient Scheduling Rules in a Combined Make-to-Stock and Make-to-Order Manufacturing System. *Annals of Operations Research* 126 (2004) 1-4, S. 103-124.

ZÄH ET AL. 2004

Zäh, M. F.; Habicht, C.; Neise, P.: Classification and Parameterization of Bilateral Supply Chain Cooperations. In: *Proceedings of CIRP Design Seminar "Designing the Global Village"*, Cairo. 2004, S. 1-13.

ZÄH ET AL. 2005

Zäh, M. F.; Rimpau, C.; Wiesbeck, M.: Produktion im globalen Umfeld - Auslandsaktivitäten: Erfolgsaussichten oder Risiken? *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 100 (2005) 5, S. 246-250.

ZÄPFEL 2001

Zäpfel, G.: Bausteine und Architekturen von Supply Chain Management-Systemen. *PPS Management* 6 (2001) 1, S. 9-18.

Literaturverzeichnis

VAN DER ZEE & VAN DER VORST 2005

van der Zee, D. J.; van der Vorst, J. G. A. J.: A Modeling Framework for Supply Chain Simulation: Opportunities for Improved Decision Making. *Decision Sciences* 36 (2005) 1, S. 65-95.

ZELENOVIC & TESIC 1988

Zelenovic, D. M.; Tesic, Z. M.: Period Batch Control and Group Technology. *Int. J. of Production Research* 26 (1988) 3, S. 539-552.

Anhang

Verwendete Softwareprodukte

Name	Funktion	Hersteller	Homepage
Microsoft Excel	Tabellenkalkulation	Microsoft Inc.	www.microsoft.com
SPSS	Statistikprogramm	SPSS Inc.	www.spss.com
Visual Basic	Programmiersprache	Microsoft Inc.	www.microsoft.com

iwb Forschungsberichte Band 1–121

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 erschienen im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg und sind im Erscheinungsjahr und den folgenden drei Kalenderjahren erhältlich im Buchhandel oder durch Lange & Springer, Otto-Suhr-Allee 26–28, 10585 Berlin

- 1 *Streifinger, E.*
Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 *Fuchsberger, A.*
Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 *Maier, C.*
Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 *Summer, H.*
Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 *Simon, W.*
Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 *Büchs, S.*
Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 *Hunzinger, I.*
Schneiderdierte Oberflächen
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 *Pilland, U.*
Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 *Barthelmeß, P.*
Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 *Reithofer, N.*
Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 *Diess, H.*
Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 *Reinhart, G.*
Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 *Bürstner, H.*
Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 *Groha, A.*
Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 *Riese, K.*
Klippsmontage mit Industrierobotern
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 *Lutz, P.*
Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 *Klippel, C.*
Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 *Rascher, R.*
Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 *Heusler, H.-J.*
Rechnerunterstützte Planung flexibler Montage-systeme
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 *Kirchknopf, P.*
Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 *Saverer, Ch.*
Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 *Karstedt, K.*
Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 *Peiker, St.*
Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 *Schugmann, R.*
Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 *Witbe, P.*
Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 *Eibelshäuser, P.*
Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 *Prasch, J.*
Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

- 28 *Teich, K.*
Prozesskommunikation und Rechnerverbund in der Produktion
1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 *Pfrang, W.*
Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze
1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6
- 30 *Tauber, A.*
Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung
1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X
- 31 *Jäger, A.*
Systematische Planung komplexer Produktionssysteme
1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5
- 32 *Hartberger, H.*
Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 *Tuzcek, H.*
Inspektion von Karosserieteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 *Fischbacher, J.*
Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 *Moser, O.*
3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54078-8
- 36 *Naber, H.*
Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 *Kupec, Th.*
Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 *Maulhardt, U.*
Dynamisches Verhalten von Kreissägen
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 *Götz, R.*
Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile
1991 · 86 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1
- 40 *Koepfer, Th.*
3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung · ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 *Schmidt, M.*
Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 *Burger, C.*
Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 *Hoßmann, J.*
Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0
- 44 *Petry, M.*
Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmabkastens für robotergeführte Klebprozesse
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 *Schönecker, W.*
Integrierte Diagnose in Produktionszellen
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 *Bick, W.*
Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 *Gebauer, L.*
Prozeforschungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 *Schröder, N.*
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wisbacher, J.*
Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 *Garnich, F.*
Laserbearbeitung mit Robotern
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 *Eubert, P.*
Digitale Zustandsregelung elektrischer Vorschubantriebe
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 *Glaas, W.*
Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 *Helm, H.J.*
Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 *Lang, Ch.*
Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 *Schuster, G.*
Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 *Bamm, H.*
Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 *Wendt, A.*
Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 *Hansmaier, H.*
Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 *Dilling, U.*
Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5

- 60 *Strohmayr, R.*
Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von Zubringeinrichtungen
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Glas, J.*
Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer Zellenrechnersoftware
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56689-5
- 62 *Stetter, R.*
Rechnergestützte Simulationwerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrierobereinsatzes
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dirndorfer, A.*
Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*
Simulation des Schwingungsverhaltens spanender Werkzeugmaschinen
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woenckhaus, Ch.*
Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-Layoutoptimierung
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummelsteiner, G.*
3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur Planung manueller Montagesysteme
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelmann, F.*
Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen Automatisierung von Produktionssystemen
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*
Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Viethen, U.*
Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*
Automatische Inbetriebnahme geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*
Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktionssystemen
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*
Rechnergestütztes Projektinformations- und Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 *Welling, A.*
Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 *Zetlmayer, H.*
Verfahren zur simulationsgestützten Produktionsregelung in der Einzel- und Kleinserienproduktion
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindl, M.*
Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5
- 76 *Zipper, B.*
Das integrierte Betriebsmittelwesen · Baustein einer flexiblen Fertigung
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3
- 77 *Rath, P.*
Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in der Arbeitsvorbereitung
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*
Strömungstechnische Optimierung von Produktionssystemen durch Simulation
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zah, M. F.*
Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanner, N.*
Technologisches Prozeßmodell für die Kugelschleifbearbeitung
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanow, P.*
Konstruktionsbegleitende Kalkulation von Werkzeugmaschinen
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*
Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen Fertigungszellen
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*
Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der Hartbearbeitung
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*
Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in flexiblen Produktionssystemen
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*
Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störungsmanagement
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*
Systematische Planung anwendungsspezifischer Materialflußsteuerungen
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rackland, M.*
Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in Montageanlagen
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *Linner, St.*
Konzept einer integrierten Produktentwicklung
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1
- 89 *Eder, Th.*
Integrierte Planung von Informationssystemen für rechnergestützte Produktionssysteme
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6
- 90 *Deutsche, U.*
Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in mittelständischen Unternehmen
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3
- 91 *Dieterle, A.*
Recyclingintegrierte Produktentwicklung
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

- 92 *Hechl, Chr.*
Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte
1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5
- 93 *Albertz, F.*
Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen - Gestellstrukturen
1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8
- 94 *Trunzer, W.*
Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren
1996 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X
- 95 *Fichtmüller, N.*
Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme
1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1
- 96 *Trucks, V.*
Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen
1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8
- 97 *Schäffer, G.*
Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme
1996 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*
Autonome Fertigungszellen - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung
1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Moctezuma de la Barrera, J.L.*
Ein durchgängiges System zur computer- und rechnergestützten Chirurgie
1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2
- 100 *Geuer, A.*
Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung
1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8
- 101 *Ebner, C.*
Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten
1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0
- 102 *Pischelsrieder, K.*
Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Kähler, R.*
Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinprodukten
1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9
- 104 *Feldmann, Ch.*
Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung
1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1
- 105 *Lehmann, H.*
Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem
1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wagner, M.*
Steuerungintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe
1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*
Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen
1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Krönert, U.*
Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitsuche und Standardisierung
1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*
Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service
1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*
Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*
Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozess mit Produktmodellen
1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*
Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung
1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*
Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz
1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*
Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindermaier, R.*
Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehler, J.*
Präzeorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*
Leitfäden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen
1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1
- 118 *Debuschewitz, M.*
Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung
1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3
- 119 *Bauer, L.*
Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen
1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1
- 120 *Pfob, E.*
Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*
Erfahrungsgleitetete Planung von Laseranlagen
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

Seminarberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

Seminarberichte iwb sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utz.de

- 1 **Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung**
115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9
- 2 **Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt**
82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7
- 3 **Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung**
110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5
- 4 **Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte**
134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3
- 5 **Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung**
95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1
- 6 **Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung**
86 Seiten · ISBN 3-931327-06-0
- 7 **Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**
80 Seiten · ISBN 3-931327-07-9
- 8 **Qualitätsmanagement - der Weg ins Ziel**
130 Seiten · ISBN 3-931327-08-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte**
120 Seiten · ISBN 3-931327-09-5
- 10 **3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel**
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
- 11 **Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
- 12 **Autonome Produktionssysteme**
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
- 13 **Planung von Montageanlagen**
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
- 14 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 15 **Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung**
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
- 16 **Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart**
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
- 17 **Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen**
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
- 18 **Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen**
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
- 19 **Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung**
85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1
- 20 **Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen - Plug & Play - Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme**
105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5
- 21 **Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen**
95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3
- 22 **Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale**
95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1
- 24 **EDM Engineering Data Management**
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
- 25 **Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele**
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
- 26 **Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag**
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4
- 27 **Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2
- 28 **Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0
- 29 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar**
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9
- 30 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 31 **Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends**
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 32 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 33 **3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension**
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7
- 34 **Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz**
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5
- 35 **Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben**
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3
- 36 **Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1
- 37 **Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze**
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X
- 38 **Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung**
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8
- 39 **Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau**
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6
- 40 **Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen**
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern**
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobautteilen**
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
- 45 **Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3
- 46 **Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation**
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1

- 47 **Virtuelle Produktion · Prozeß- und Produktsimulation**
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 **Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen**
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8
- 49 **Rapid Prototyping · Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung**
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6
- 50 **Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion**
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51 **Flexibles Kleben und Dichten · Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle**
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8
- 52 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien**
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6
- 53 **Mischverbindungen · Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung**
107 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 54 **Virtuelle Produktion · Integrierte Prozess- und Produktsimulation**
133 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 55 **e-Business in der Produktion · Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele**
150 Seiten · ISBN 3-89675-055-0
- 56 **Virtuelle Produktion – Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug**
150 Seiten · ISBN 3-89675-056-9
- 57 **Virtuelle Produktion – Datenintegration und Benutzerschnittstellen**
150 Seiten · ISBN 3-89675-057-7
- 58 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien**
169 Seiten · ISBN 3-89675-058-7
- 59 **Automatisierte Mikromontage · Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik**
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3
- 60 **Mechatronische Produktionssysteme · Genauigkeit gezielt entwickeln**
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7
- 61 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 62 **Rapid Technologien · Anspruch – Realität – Technologien**
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3
- 63 **Fabrikplanung 2002 · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge**
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1
- 64 **Mischverbindungen · Einsatz und Innovationspotenzial**
143 Seiten · ISBN 3-89675-064-X
- 65 **Fabrikplanung 2003 – Basis für Wachstum · Erfahrungen Werkzeuge Visionen**
136 Seiten · ISBN 3-89675-065-8
- 66 **Mit Rapid Technologien zum Aufschwung · Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder**
185 Seiten · ISBN 3-89675-066-6
- 67 **Mechatronische Produktionssysteme · Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder**
148 Seiten · ISBN 3-89675-067-4
- 68 **Virtuelle Produktion · Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik**
139 Seiten · ISBN 3-89675-068-2
- 69 **Kooperationsmanagement in der Produktion · Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette**
134 Seiten · ISBN 3-89675-069-0
- 70 **Mechatronik · Strukturodynamik von Werkzeugmaschinen**
161 Seiten · ISBN 3-89675-070-4
- 71 **Klebtechnik · Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten**
ISBN 3-89675-071-2 · vergriffen
- 72 **Fabrikplanung 2004 · Erfolgsfaktor im Wettbewerb · Erfahrungen – Werkzeuge – Visionen**
ISBN 3-89675-072-0 · vergriffen
- 73 **Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion · Erwartungen – Erfahrungen – Entwicklungen**
179 Seiten · ISBN 3-89675-073-9
- 74 **Virtuelle Produktionssystemplanung · Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik**
133 Seiten · ISBN 3-89675-074-7
- 75 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 76 **Berührungslose Handhabung · Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapselfel zur aseptischen Ampulle**
95 Seiten · ISBN 3-89675-076-3
- 77 **ERP-Systeme · Einführung in die betriebliche Praxis · Erfahrungen, Best Practices, Visionen**
153 Seiten · ISBN 3-89675-077-7
- 78 **Mechatronik · Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen**
155 Seiten · ISBN 3-89675-078-X
- 79 **Produktionsmanagement**
267 Seiten · ISBN 3-89675-079-8
- 80 **Rapid Manufacturing · Fertigungsverfahren für alle Ansprüche**
154 Seiten · ISBN 3-89675-080-1
- 81 **Rapid Manufacturing · Heutige Trends – Zukünftige Anwendungsfelder**
172 Seiten · ISBN 3-89675-081-X
- 82 **Produktionsmanagement · Herausforderung Variantenmanagement**
100 Seiten · ISBN 3-89675-082-8
- 83 **Mechatronik · Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen**
160 Seiten · ISBN 3-89675-083-6
- 84 **Virtuelle Inbetriebnahme · Von der Kür zur Pflicht?**
104 Seiten · ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 **3D-Erfahrungsforum · Innovation im Werkzeug- und Formenbau**
375 Seiten · ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 **Rapid Manufacturing · Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung**
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 **Produktionsmanagement · Schlank im Mittelstand**
102 Seiten · ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 **Mechatronik · Vorsprung durch Simulation**
134 Seiten · ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 **RFID in der Produktion · Wertschöpfung effizient gestalten**
122 Seiten · ISBN 978-3-89675-089-1

Forschungsberichte iw b

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

Forschungsberichte iw b ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utz.de

- 122 Schneider, Burghard
Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
1999 · 183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-559-5
- 123 Goldstein, Bernd
Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung
1999 · 170 Seiten · 65 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-546-3
- 124 Mößmer, Helmut E.
Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
1999 · 164 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Gräser, Ralf-Gunter
Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
1999 · 167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-603-6
- 126 Trossin, Hans-Jürgen
Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
1999 · 162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-614-1
- 127 Kugelmann, Doris
Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
1999 · 168 Seiten · 68 Abb. · 2 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-615-X
- 128 Diesch, Rolf
Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
1999 · 160 Seiten · 69 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-618-4
- 129 Lulay, Werner E.
Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
1999 · 182 Seiten · 51 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-620-6
- 130 Murr, Otto
Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
1999 · 178 Seiten · 85 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-636-2
- 131 Macht, Michael
Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
1999 · 170 Seiten · 87 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-638-9
- 132 Mehler, Bruno H.
Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbänden
1999 · 152 Seiten · 44 Abb. · 27 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-645-1
- 133 Heitmann, Knut
Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle
1999 · 146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-675-3
- 134 Blessing, Stefan
Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
1999 · 160 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-690-7
- 135 Abay, Can
Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik
2000 · 159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-697-4

- 136 Brandner, Stefan
Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken
2000 · 172 Seiten · 61 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-715-6
- 137 Hirschberg, Arnd G.
Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung
2000 · 165 Seiten · 49 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-729-6
- 138 Reek, Alexandra
Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen
2000 · 193 Seiten · 103 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-730-X
- 139 Sabbah, Khalid-Alexander
Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen
2000 · 148 Seiten · 75 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-739-3
- 140 Schliffenbacher, Klaus U.
Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken
2000 · 187 Seiten · 70 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-754-7
- 141 Sprengel, Andreas
Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung
2000 · 144 Seiten · 55 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-757-1
- 142 Gallasch, Andreas
Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion
2000 · 150 Seiten · 69 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-781-4
- 143 Cuiper, Ralf
Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen
2000 · 168 Seiten · 75 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-783-0
- 144 Schneider, Christian
Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion
2000 · 180 Seiten · 66 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-789-X
- 145 Jonas, Christian
Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen
2000 · 183 Seiten · 82 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-870-5
- 146 Willnecker, Ulrich
Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen
2001 · 175 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-891-8
- 147 Lehner, Christof
Beschreibung des Nd:Yag-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss
2001 · 205 Seiten · 94 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0004-X
- 148 Rick, Frank
Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen
2001 · 145 Seiten · 57 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0008-2
- 149 Höhn, Michael
Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme
2001 · 171 Seiten · 74 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0012-0
- 150 Böhl, Jörn
Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung
2001 · 179 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0020-1
- 151 Bürgel, Robert
Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben
2001 · 185 Seiten · 60 Abb. · 10 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0021-X
- 152 Stephan Dürrschmidt
Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion
2001 · 914 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0023-6
- 153 Bernhard Eich
Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung
2001 · 132 Seiten · 48 Abb. · 6 Tabellen · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0028-7

- 154 Wolfgang Rudorfer
Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
 2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier
Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe
 2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak
Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
 2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner
Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
 2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz
Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung
 2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald
Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung
 2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner
Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen
 2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller
Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen
 2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3
- 162 Michael Loferer
Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen
 2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg Fahrer
Ganzeitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses
 2002 · 176 Seiten · 69 Abb. · 13 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0124-0
- 164 Jürgen Höppner
Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler
 2002 · 132 Seiten · 24 Abb. · 3 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0125-9
- 165 Hubert Götte
Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik
 2002 · 258 Seiten · 123 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0126-7
- 166 Martin Weißberger
Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess
 2002 · 210 Seiten · 86 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0138-0
- 167 Dirk Jacob
Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik
 2002 · 200 Seiten · 82 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0142-9
- 168 Ulrich Roßgoderer
System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen
 2002 · 175 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0154-2
- 169 Robert Klingel
Anziehverfahren für hochfeste Schraubverbindungen auf Basis akustischer Emissionen
 2002 · 164 Seiten · 89 Abb. · 27 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0174-7
- 170 Paul Jens Peter Ross
Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung
 2002 · 144 Seiten · 38 Abb. · 38 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0191-7
- 171 Stefan von Praun
Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess
 2002 · 250 Seiten · 62 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0202-6

- 172 Florian von der Hagen
Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen
 2002 · 220 Seiten · 104 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0208-5
- 173 Oliver Kramer
Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe
 2002 · 212 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0211-5
- 174 Winfried Dohmen
Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme
 2002 · 200 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0214-X
- 175 Oliver Anton
Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsenster Montagesysteme
 2002 · 158 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0215-8
- 176 Welf Broser
Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke
 2002 · 224 Seiten · 122 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0217-4
- 177 Frank Breitingner
Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen
 2003 · 156 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0227-1
- 178 Johann von Pieverling
Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling
 2003 · 163 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0230-1
- 179 Thomas Baudisch
Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine
 2003 · 190 Seiten · 67 Abb. · 8 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0249-2
- 180 Heinrich Schieferstein
Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems
 2003 · 132 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0251-4
- 181 Joachim Berlak
Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen
 2003 · 244 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0258-1
- 182 Christian Meierlohr
Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung
 2003 · 181 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0292-1
- 183 Volker Weber
Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzorientierten Unternehmensnetzwerken
 2004 · 210 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0330-8
- 184 Thomas Bongardt
Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern
 2004 · 170 Seiten · 40 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0332-4
- 185 Tim Angerer
Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten
 2004 · 180 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0336-7
- 186 Alexander Krüger
Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme
 2004 · 197 Seiten · 83 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0371-5
- 187 Matthias Meindl
Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing
 2005 · 222 Seiten · 97 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0465-7
- 188 Thomas Fusch
Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie
 2005 · 190 Seiten · 99 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0467-3

- 189 Thomas Mosandl
Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme
2005 · 182 Seiten · 58 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0471-1
- 190 Christian Patron
Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung
2005 · 150 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0474-6
- 191 Robert Cisek
Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen
2005 · 200 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0475-4
- 192 Florian Auer
Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen
2005 · 160 Seiten · 65 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0485-1
- 193 Carsten Selke
Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung
2005 · 137 Seiten · 53 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0495-9
- 194 Markus Seefried
Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern
2005 · 216 Seiten · 82 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0503-3
- 195 Wolfgang Wagner
Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion
2006 · 208 Seiten · 43 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0586-6
- 196 Christopher Ulrich
Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen
2006 · 178 Seiten · 74 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0590-4
- 197 Johann Härtl
Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern
2006 · 140 Seiten · 55 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0611-0
- 198 Bernd Hartmann
Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge
2006 · 208 Seiten · 105 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0615-3
- 199 Michael Schilp
Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage
2006 · 130 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0631-5
- 200 Florian Manfred Grätz
Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme
2006 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0643-9
- 201 Dieter Eireiner
Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding
2006 · 214 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0650-1
- 202 Gerhard Volkwein
Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation
2007 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 Sven Roeren
Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse
2007 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 Henning Rudolf
Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie
2007 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 Stella Clarke-Griebsch
Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia
2007 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 Michael Ehrenstraßer
Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage
2008 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0743-3

- 207 Rainer Schack
Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik
2008 · 248 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 Wolfgang Sudhoff
Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion
2008 · 276 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 Stefan Müller
Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen
2008 · 240 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 Ulrich Kohler
Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme
2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 Klaus Schlickerrieder
Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile
2008 · 204 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 Niklas Möller
Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme
2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 Daniel Siedl
Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrbewegungen
2008 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 Dirk Ansorge
Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen
2008 · 146 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 Georg Wünsch
Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme
2008 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 Thomas Oertli
Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben
2008 · 194 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 Bernd Petzold
Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsenste Mikromontage
2008 · 234 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 Loucas Papadakis
Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains
2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 Mathias Mörtl
Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung
2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 Sebastian Weig
Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten
2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 Tobias Hornfeck
Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie
2008 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 Hans Egermeier
Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen
2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 Matthäus Sigl
Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns
2008 · 185 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0841-6

- 224 Mark Harfensteller
Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets
2009 · 196 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0849-8
- 225 Jochen Werner
Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie
2009 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 Florian Hagemann
Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen
2009 · 226 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0861-4
- 227 Haitham Rashidy
Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry
2009 · 212 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 Wolfgang Vogl
Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern
2009 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 Sonja Schedl
Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess
2009 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 Andreas Trautmann
Bifocal Hybrid Laser Welding – A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels
2009 · 268 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 Patrick Neise
Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models
2009 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 Christian Habicht
Einsatz und Auslegung zeitfensterbasierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten
2009 · 204 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 Michael Spitzweg
Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen
2009 · 180 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0931-4

