

**MARCEL MERTIN**

**Kooperative Planung und Steuerung  
in logistischen Netzwerken**

**BAND 95**

**Wissenschaftliche Berichte des Instituts für Fördertechnik und  
Logistiksysteme des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)**

 **KIT** Scientific  
Publishing



Marcel Mertin

## Kooperative Planung und Steuerung in logistischen Netzwerken

WISSENSCHAFTLICHE BERICHTE

Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme  
am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

BAND 95

# Kooperative Planung und Steuerung in logistischen Netzwerken

von  
Marcel Mertin

Karlsruher Institut für Technologie  
Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme

Kooperative Planung und Steuerung in logistischen Netzwerken

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) genehmigte Dissertation

von Marcel Mertin

Tag der mündlichen Prüfung: 24. Juli 2020  
Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans  
Zweiter Gutachter: Jun.-Prof. Dr.-Ing. Anne Meyer

#### Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
KIT Scientific Publishing  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark  
of Karlsruhe Institute of Technology.  
Reprint using the book cover is not allowed.

[www.ksp.kit.edu](http://www.ksp.kit.edu)



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2021 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 0171-2772  
ISBN 978-3-7315-1067-3  
DOI 10.5445/KSP/1000125605





# **Kooperative Planung und Steuerung in logistischen Netzwerken**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktors der Ingenieurwissenschaften**

von der Fakultät für Maschinenbau  
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

**Dissertation**

von

**M.Sc. Marcel Mertin**

aus Mülheim an der Ruhr

Tag der mündlichen Prüfung: 24. Juli 2020

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans

Zweiter Gutachter: Jun.-Prof. Dr.-Ing. Anne Meyer



# Kurzfassung

In einem von Kostendruck geprägten Wettbewerb konkurrieren nicht nur einzelne Unternehmen, sondern vielmehr ganze Wertschöpfungsketten um die Gunst der Kunden. Dem Supply Chain Management kommt durch die übergeordnete Sicht auf die logistischen Prozesse die Aufgabe einer ganzheitlichen Planung und Steuerung über Unternehmensgrenzen hinweg zu. Es mangelt derzeit noch an Verfahren zur effizienten Koordination von Entscheidungsproblemen unterschiedlicher logistischer Teildisziplinen sowie der Verknüpfung des operativen mit dem taktisch-strategischen Planungshorizont. Einen Beitrag zum Schluss dieser Lücke liefert das vorgeschlagene kooperative Planungs- und Steuerungsverfahren auf Basis von Softwareagenten. Die Evaluierung der entwickelten Modelle erfolgt mithilfe von Simulation. Da zu den Auswirkungen von Ablaufkomplikationen bei der Ausführung physischer Logistikprozesse sowie von Eingriffsmaßnahmen auf der taktischen und operativen Ebene nur vereinzelt Arbeiten zu Teilaspekten vorhanden sind, erfolgt eine tiefere Analyse im Rahmen der Simulationsstudie.

Es konnte der Einfluss von Einzelstörungen im Zusammenspiel mit Anpassungen auf der taktischen Ebene gezeigt werden. Dabei hat vor allem die Auslegung der Parameter einer Bestellpolitik erheblichen Einfluss auf das System. In den Experimenten konnten Wechselwirkungen zwischen der Bestellmenge und der Wiederbeschaffungszeit, bedingt durch die Struktur des logistischen Netzwerks, aufgezeigt werden. Die kooperative Planung und Steuerung mittels Softwareagenten wurde im Vergleich zu einer Ablaufsteuerung nach dem FIFO-Prinzip evaluiert. Das Verfahren der dynamischen Dringlichkeitsbewertung zeigte in den Versuchen eine wirksame Priorisierung von Aufträgen. Durch den Einsatz dieses Ansatzes konnte für das untersuchte Szenario eine Reduzierung der Fehlmengen sowie eine Steigerung der Effizienz im Transport erzielt werden. Mit den Modelldaten wurde die Durchführung einer

Wirtschaftlichkeitsbewertung aufgezeigt, bei der eine Gesamtkostenbetrachtung über den gesamten Beschaffungsprozess durchgeführt wird.

# Abstract

In a competition characterized by cost pressure, not only individual companies compete, but entire value chains for the favour of customers. Supply chain management has the task of holistic planning and control across company boundaries due to the superordinate view of the logistical processes. At present, there is still a lack of methodology for the efficient coordination of decision-making problems of different logistic sub-disciplines and the linking of the operational with the tactical-strategic planning horizon. The proposed cooperative planning and control procedure based on software agents makes a contribution to closing this gap. The evaluation of the developed models takes place with the help of simulation. Since there is only isolated work on partial aspects of the effects of process complications during the execution of physical logistics processes and of intervention measures on the tactical and operational level, a more in-depth analysis is carried out within the framework of the simulation study.

The influence of individual disturbances in interaction with adaptations on the tactical level could be shown. In particular, the interpretation of the parameters of an ordering policy has a considerable influence on the system. Interactions between the order quantity and the replenishment time could be shown in the experiments, caused by the structure of the logistic network. The cooperative planning and control by means of software agents was evaluated in comparison to a sequencing rule according to the FIFO principle. The dynamic urgency assessment procedure showed effective prioritisation of orders in the evaluation. By using this method, it was possible to achieve a reduction in shortfalls and an increase in transport efficiency for the investigated scenario. With the model data, the execution of an economic evaluation was shown, in which a total cost consideration is carried out over the entire procurement process.



# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	i
Abstract.....	iii
Abbildungsverzeichnis.....	ix
Tabellenverzeichnis .....	xiii
Abkürzungsverzeichnis .....	xv
Symbolverzeichnis.....	xvii
Vorwort.....	xxi
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung.....	2
1.2 Ziele der Arbeit .....	4
1.3 Aufbau der Arbeit .....	5
<b>2 Volatilität in logistischen Netzwerken.....</b>	<b>9</b>
2.1 Aufbau logistischer Netzwerke .....	9
2.1.1 Die Supply Chain aus Prozesssicht.....	10
2.1.2 Die Netzwerkaspekte von Supply Chains .....	14
2.1.3 Die Bedeutung von Informationen .....	18
2.2 Ursachen und Folgen von Volatilität in logistischen Prozessen.....	22
2.2.1 Begriffe eines ereignisbasierten Supply Chain Managements.....	22
2.2.2 Langfristige Perspektive – Dynamik in Supply Chains .....	26
2.2.3 Kurzfristige Perspektive – Abweichungen in der Ausführungsphase.....	30
2.3 Systemzustandsbewertung in logistischen Netzwerken .....	34

<b>3</b>	<b>Planung und Steuerung in logistischen Netzwerken .....</b>	<b>41</b>
3.1	Planungs- und Steuerungsaufgaben im Supply Chain	
	Management .....	41
3.1.1	Bestandsmanagement.....	43
3.1.2	Reihenfolgeplanung .....	50
3.1.3	Transportplanung.....	55
3.1.4	Lean-Management im Logistikumfeld .....	60
3.2	Konzepte des Risiko- und Störungsmanagements .....	64
3.2.1	Proaktiver Ansatz – Supply Chain	
	Risikomanagement.....	66
3.2.2	Reaktiver Ansatz – Supply Chain	
	Störungsmanagement .....	69
3.2.3	Ansätze einer kooperativen Planung und Steuerung .....	73
3.3	Zusammenfassung und resultierender Forschungsbedarf .....	77
<b>4</b>	<b>Das Konzept einer kooperativen Planung und Steuerung .....</b>	<b>81</b>
4.1	Abgrenzung des Anwendungsfalls.....	81
4.1.1	Beschreibung der Prozesse aus logistischer Sicht .....	81
4.1.2	Ablauf der Planung und Steuerung .....	83
4.1.3	Handlungsrahmen und Maßnahmenkatalog.....	88
4.2	Modelle und Verfahren zur Planung und Steuerung.....	92
4.2.1	Prozesszeitbewertung .....	92
4.2.2	Prozesskostenbewertung .....	96
4.2.3	Einleitung von Maßnahmen .....	104
4.2.4	Komposition der Dienste .....	109
<b>5</b>	<b>Modellierung einer agentenbasierten Simulationsumgebung .....</b>	<b>113</b>
5.1	Modellierungsansatz und Implementierung .....	113
5.1.1	Simulationswürdigkeit der Aufgabenstellung .....	115
5.1.2	Implementierung in der Simulationsumgebung.....	117
5.1.3	Zusammenspiel der Komponenten und	
	Informationsfluss.....	120
5.1.4	Umsetzung eines User Interface .....	122
5.2	Prozessabläufe der Modellagenten .....	124

---

5.3	Modellgrößen .....	127
5.3.1	Eingangs- und Stellgrößen .....	127
5.3.2	Zielgrößen.....	130
<b>6</b>	<b>Planung und Bewertung der Experimente.....</b>	<b>133</b>
6.1	Generierung von Testdatensätzen .....	133
6.2	Statistische Experimentplanung .....	140
6.3	Untersuchung des Systemverhaltens .....	143
6.3.1	Untersuchungen zur Experimentplanung.....	145
6.3.2	Untersuchungen zu den Störeinflüssen.....	148
6.3.3	Untersuchungen zur Maßnahmenwirksamkeit .....	157
6.4	Untersuchung einer kooperativen Planung und Steuerung in logistischen Netzwerken .....	168
6.4.1	Beschreibung des Verfahrensablaufs und der Systemkonfiguration .....	168
6.4.2	Untersuchung der Verfahrenswirksamkeit .....	172
6.5	Zusammenfassende Bewertung .....	179
<b>7</b>	<b>Fazit und Ausblick .....</b>	<b>183</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>187</b>
<b>A.</b>	<b>Testinstanzen.....</b>	<b>211</b>



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Ablauf der Untersuchung .....	7
Abbildung 2.1:	Die Funktionsbereiche eines Unternehmens aus logistischer Sicht.....	10
Abbildung 2.2:	Die Prozessfolge einer Supply Chain im SCOR- Modell (in Anlehnung an (APICS 2018)) .....	12
Abbildung 2.3:	Die hierarchischen Ebenen des SCOR-Modells (in Anlehnung an (APICS 2018)) .....	13
Abbildung 2.4:	Struktur eines logistischen Netzwerks mit seinen Beteiligungen und Verbindungen zur Außenwelt (in Anlehnung an (Vahrenkamp et al. 2012)) .....	15
Abbildung 2.5:	Strukturebenen und mögliche Strukturdefekte von mathematischen Entscheidungsproblemen (in Anlehnung an (Scholl 2008)) .....	21
Abbildung 2.6:	Herausforderungen der Logistik durch Entwicklungen und Trends.....	27
Abbildung 2.7:	Gesetzmäßigkeiten der Dynamik in Supply Chains .....	28
Abbildung 2.8:	Strategisches Viereck der Determinanten in der Prozessperspektive (in Anlehnung an Werner 2013) .....	35
Abbildung 2.9:	Ziele der Logistik (in Anlehnung an VDI 4400 Blätter 1-3) .....	36
Abbildung 2.10:	Der grundsätzliche Aufbau einer Balanced Scorecard (in Anlehnung an Werner 2013) .....	39
Abbildung 3.1:	Ausgewählte Planungs- und Steuerungsaufgaben in der Supply Chain.....	42

Abbildung 3.2:	Gantt-Diagramm der Auftragsfolge aus Maschinensicht .....	52
Abbildung 3.3:	Das Beispiel einer dreistufigen Lieferkette .....	56
Abbildung 3.4:	Klassifizierung von Lösungsverfahren für Tourenplanungsprobleme.....	58
Abbildung 3.5:	Das Prinzip der kontinuierlichen Verbesserung bei Lean-Konzepten .....	62
Abbildung 3.6:	Die Phasen eines Risiko- und Störungsmanagements (in Anlehnung an Sheffi 2005) .....	65
Abbildung 3.7:	Bausteine eines Risikomanagements.....	67
Abbildung 3.8:	Bausteine eines Störungsmanagements .....	70
Abbildung 3.9:	Einordnung von Verfahren zur Planung und Steuerung in logistischen Netzwerken (in Anlehnung an Scholz-Reiter et al. 2008) .....	75
Abbildung 4.1:	Akteure und Prozesse des Anwendungsfalls aus Auftragssicht .....	82
Abbildung 4.2:	Interaktionsmodell für einen idealtypisch sequentiellen Planungsfall auf der höchsten Hierarchieebene im zeitlichen Verlauf.....	84
Abbildung 4.3:	Interaktionsmodell für einen idealtypisch simultanen Planungsfall auf der höchsten Hierarchieebene im zeitlichen Verlauf.....	87
Abbildung 4.4:	Prozesszeitmodell aus Auftragssicht über die Zeit.....	93
Abbildung 4.5:	Modell zur monetären Bewertung der Ankunftszeit eines Auftrags im Ziel.....	103
Abbildung 4.6:	Verfahrensebenen für den operativen Zeithorizont bis zur Entscheidungsfindung .....	106
Abbildung 4.7:	Hierarchie der Agenten und Zuordnung von Diensten .....	110

---

Abbildung 5.1:	Grundsätzlicher Aufbau der Modellumgebung.....	115
Abbildung 5.2:	Der Modellbildungszyklus (VDI 4465 Blatt 1:2016, Gründruck) .....	118
Abbildung 5.3:	Zusammenspiel der Komponenten und Informationsfluss in der Modellumgebung.....	121
Abbildung 6.1:	Räumliche Struktur des untersuchten logistischen Netzwerks.....	136
Abbildung 6.2:	Teilaspekte und Ablauf der statistischen Experimentplanung.....	140
Abbildung 6.3:	Einschwingverhalten des mittleren physischen Bestands ( $w=10$ ).....	146
Abbildung 6.4:	Einschwingverhalten der mittleren Lieferzeit ( $w=10$ ) .....	147
Abbildung 6.5:	Einfluss der Bestellmenge $q$ auf die Bestandsreichweite und die Anzahl der täglichen Anlieferungen.....	152
Abbildung 6.6:	Einfluss der Bestellmenge $q$ auf die mittleren Prozesszeiten.....	153
Abbildung 6.7:	Mittlere Tourdauer in verschiedenen Vorholgebieten.....	155
Abbildung 6.8:	Einfluss der Nachfragevariabilität auf das Bestandsniveau und die Fehlmengen .....	156
Abbildung 6.9:	Histogramm der Wiederbeschaffungszeit in der Grundkonfiguration.....	157
Abbildung 6.10:	Einfluss der Annahme über die Wiederbeschaffungszeit auf das Bestandsniveau, die Fehlmengen und die Liefertermintreue .....	158
Abbildung 6.11:	Mittlere Prozesszeiten für die untersuchten Planungsintervalle.....	163

Abbildung 6.12: Mittlere Prozesszeiten für die untersuchte Anzahl priorisierter Lieferanten .....	166
Abbildung 6.13: Zusammenspiel der Softwareagenten bei der Berücksichtigung der Dringlichkeit am Beispiel der Reihenfolgeplanung im Hub .....	170
Abbildung 6.14: Entscheidungsregeln und Toleranzmaße im untersuchten Szenario .....	171
Abbildung 6.15: Abweichung zwischen Ankunftsprognose und -zeit ( $w=10$ ).....	173
Abbildung 6.16: Verteilung der gesetzten Priorisierungsmerkmale .....	174
Abbildung 6.17: Gesamtkosten der untersuchten Verfahren im Vergleich für unterschiedliche Kostensatzannahmen über ein Betriebsjahr .....	178

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Umfeldrisiken in Supply Chains.....	31
Tabelle 2.2:	Risiken auf Seiten der Hersteller und Lieferanten in Supply Chains .....	32
Tabelle 2.3:	Risiken auf Seiten der Logistikdienstleister in Supply Chains .....	33
Tabelle 3.1:	Merkmale zur Klassifikation stochastischer Lagerhaltungspolitiken .....	46
Tabelle 3.2:	Merkmale zur Klassifikation von Maschinenbelegungsproblemen (Auswahl).....	51
Tabelle 3.3:	Merkmale zur Klassifikation von Tourenplanungsproblemen (Auswahl).....	57
Tabelle 4.1:	Übersicht der betrachteten Maßnahmen .....	91
Tabelle 4.2:	Bedeutung der Zeichen im Prozesszeitmodell .....	94
Tabelle 6.1:	Konfidenzintervalle für mittleren physischen Bestand ( $\alpha=0,05$ ) .....	148
Tabelle 6.2:	Faktoreinstellungen zur Untersuchung der Störgrößen der physischen Logistikprozesse .....	149
Tabelle 6.3:	Haupteffekte der Faktorgruppen auf die Zielgrößen .....	150
Tabelle 6.4:	Einfluss der Bestellmenge $q$ auf die Tourkennzahlen.....	154
Tabelle 6.5:	Einfluss der Transportkapazität auf die Tourkennzahlen.....	160
Tabelle 6.6:	Einfluss der Transportkapazität auf die Kennzahlen des Herstellers .....	161

Tabelle 6.7:	Einfluss des Planungsintervalls der Lieferanten und Hub-Logistikdienstleister auf die untersuchten Zielgrößen.....	162
Tabelle 6.8:	Kennzahlen der zweiten Grundkonfiguration ohne Anwendung operativer Maßnahmen im Vergleich zur Ausgangslage.....	165
Tabelle 6.9:	Einfluss eines fixen Priorisierungsmerkmals auf die untersuchten Zielgrößen .....	167
Tabelle 6.10:	Einfluss der kooperativen Planung und Steuerung auf die untersuchten Zielgrößen im Vergleich zur Ablaufsteuerung mittels FIFO .....	175
Tabelle 6.11:	Einfluss der kooperativen Planung und Steuerung auf die Tourkennzahlen im Vergleich zur Ablaufsteuerung mittels FIFO .....	176
Tabelle 6.12:	Berechnung der Gesamtkosten für einen Fehlmengenkostensatz von 100% und einen Priorisierungskostensatz von 5%.....	177
Tabelle A.1:	Standorte und mittlerer Bedarf im Vorholgebiet R (Random).....	211
Tabelle A.2:	Standorte und mittlerer Bedarf im Vorholgebiet RC (Random-Clustered).....	212
Tabelle A.3:	Bestellpunkte $s$ für die Sekundärprodukte der Lieferanten im Vorholgebiet R (Random) .....	213
Tabelle A.4:	Bestellpunkte $s$ für die Sekundärprodukte der Lieferanten im Vorholgebiet RC (Random-Clustered).....	214
Tabelle A.5:	Bestellpunkte $s$ für die Sekundärprodukte der Lieferanten in den Vorholgebieten R und RC für eine Planlieferzeit von vier Tagen .....	215

# Abkürzungsverzeichnis

ARIS	Architektur integrierter Informationssysteme
B&B	Branch-and-Bound-Verfahren
EDD	Earliest Due Date
EDI	Electronical Data Interchange
EDIFACT	Electronic Data Interchange for Administration, Commerce and Transport
EODD	Earliest Operation Due Date
EPK	Ereignisgesteuerte Prozesskette
ETE	Estimated Time Enroute
FCFS	First Come First Serve
FIFO	First In First Out
FPE	Frühester Plan-Endtermin
GIS	Geographisches Informationssystem
KOZ	Kürzeste Operationszeit
LDL	Logistikdienstleister
LST	Least Slack Time
ME	Mengeneinheit
MPS	Master Production Scheduling

MRP	Material Requirements Planning
OEM	Original Equipment Manufacturer
OSM	OpenStreetMap
RFID	Radio-Frequency Identification
SCM	Supply Chain Management
SCEM	Supply Chain Event Management
SCRM	Supply Chain Risk Management
SCOR	Supply Chain Operations Reference Model
SPT	Shortest Processing Time
SQL	Structured Query Language
ST	Slack Time
TSP	Traveling Salesman Problem
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VRP	Vehicle Routing Problem
WBZ	Wiederbeschaffungszeit
WGS	World Geodetic System
WKD	Wertschöpfungskettendiagramm

# Symbolverzeichnis

## Dimensionen

$km$	Kilometer
$km^2$	Quadratkilometer
$m$	Meter
$m/s$	Meter/Sekunde
$s$	Sekunde
$Std$	Stunde

## Deskriptive Statistik

$\bar{x}$	Arithmetisches Mittel
$\sigma$	Standardabweichung
$Var$	Varianz
$CV$	Variationskoeffizient
$SCV$	Variabilität

## Bestandsmanagement

$n$	Vielfaches der Bestellmenge $q$
$r$	Überwachungsintervall
$S$	Bestandsobergrenze

$s$	Untere Bestellgrenze
$q$	Bestellmenge
$\alpha$	Skalenparameter der Gammaverteilung
$k$	Formparameter der Gammaverteilung
$l$	Wiederbeschaffungszeit
$c_b$	Bestellfixe Kosten
$h$	Lagerkostensatz
$E$	Erwartungswert
$\beta$	$\beta$ -Servicegradrestriktion
$I[k, x * \alpha]$	Incomplete gamma function
$\mu_3$	Drittes zentrales Moment der Wahrscheinlichkeitsverteilung

### **Reihenfolgeplanung**

$\alpha_1$	Maschinenart und -anordnung
$\alpha_2$	Maschinenanzahl
$\beta_1$	Auftragszahl
$\beta_2$	Unterbrechbarkeit
$\beta_3$	Reihenfolgebeziehungen
$\beta_4$	Auftragsfreigabeterminale
$\beta_5$	Bearbeitungszeiten

$\beta_6$	Rüstzeiten
$\beta_7$	Ressourcenbeschränkungen
$\beta_8$	Fertigstellungstermine
$\beta_9$	Arbeitsgangzahl
$\beta_{10}$	Lagerkapazitätsbeschränkungen
$\gamma$	Zielsetzung
$Z$	Minimierung der Zykluszeit
$T_{max}$	Minimierung der maximalen Terminabweichung
$F$	Flow-Shop-Problem
$J$	Job-Shop-Problem
$A_j$	Auftragsgruppe

### **Statistische Experimentplanung**

$Y_{ji}$	Beobachtungswert der j-ten Replikation zum i-ten Zeitpunkt
$w$	Fenster des gleitenden Mittelwerts
$\alpha$	Irrtumswahrscheinlichkeit
$n$	Anzahl Replikationen
$l$	Simulationsdauer



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans, Leiter des Instituts für Fördertechnik und Logistiksysteme, für die Übernahme des Hauptreferats und die Unterstützung während meiner Tätigkeit am Institut. Durch die Möglichkeit der eigenverantwortlichen Arbeit, anregende Diskussionen und die richtigen Fragen zur richtigen Zeit wurde ein wesentlicher Beitrag geleistet, die Promotion erfolgreich abzuschließen.

Der Zweitgutachterin Jun.-Prof. Dr.-Ing. Anne Meyer danke ich für die Übernahme des Koreferats und die eingehende Durchsicht des Manuskripts. Ebenfalls gedankt sei an dieser Stelle dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die Förderung des Forschungsprojekts „ProveIT“, bei dessen Bearbeitung die Grundlagen dieser Arbeit gelegt wurden.

Ebenfalls danke ich meinen Kollegen und Freunden für die wertvollen Anregungen, die Unterstützung bei der Korrektur der Arbeit sowie die angenehme und kollegiale Zusammenarbeit während meiner Zeit am Institut. Auch möchte ich mich bedanken bei den Abschlussarbeitern und studentischen Hilfskräften, ohne die eine Promotion meist nicht möglich wäre.

Mein größter und herzlichster Dank gilt meiner Partnerin Katharina für die fortwährende Unterstützung, die mir stets die nötige Motivation und Kraft zum Gelingen der Arbeit gegeben hat. Ebenso danke ich meinen Eltern für die Förderung und das Vertrauen.

Karlsruhe, im Juli 2020  
Marcel Mertin



# 1 Einleitung

Um als Unternehmen langfristig am Markt bestehen zu können, reicht es nicht aus, nachgefragte Produkte und Dienstleistungen anzubieten. Vielmehr kann sich in einem von Kostendruck geprägten Wettbewerb derjenige durchsetzen, der sowohl die Prozesse im eigenen Unternehmen als auch die in der gesamten Lieferkette in Zusammenarbeit mit seinen Geschäftspartnern effizient planen, überwachen und steuern kann. Es konkurrieren nicht einzelne Unternehmen, sondern ganze Wertschöpfungsketten um die Gunst der Kunden (Christopher 2016). Es stellt jedoch eine hohe Herausforderung dar, die Planung und Steuerung der Prozesse gesamtwohlfahrtsoptimierend durchzuführen. Eine erhöhte Koordinationskomplexität ergibt sich zudem bei geographisch weit gespannten Supply Chains, vielen Akteuren in den Wertschöpfungsprozessen sowie anspruchsvollen Fertigungs- und Belieferungskonzepten (etwa Just-In-Sequence) (Meyr und Stadler 2015).

Aktuell stehen den hohen Anforderungen an die Leistungsfähigkeit von Supply Chains viele Chancen der Weiterentwicklung gegenüber. Neben der Erweiterung bestehender Konzepte und Modelle des Supply Chain Managements sind vor allem neue Technologien zu nennen, die eine echtzeitnahe Vernetzung sowie die Nutzbarmachung von Massendaten ermöglichen. So bietet etwa das „Internet der Dinge“ Lösungsansätze, um detaillierte Informationen zum Zustand einer Supply Chain bereitzustellen oder direkt am Ort des Geschehens zu nutzen. Durch den Beitrag von Big-Data-Technologien können die anfallenden Massendaten für den Anwender sinnvoll verknüpft und zur Entscheidungsunterstützung genutzt werden (Bauernhansl 2014). Softwareagenten-basierte Ansätze bieten in der Logistik interessante Möglichkeiten, um auch bei komplexen Systemstrukturen eine Lösungsfindung zu erzielen (Scholz-Reiter et al. 2008).

Vor diesem Hintergrund ergeben sich neuartige Anwendungen bei der Planung und Steuerung in logistischen Netzwerken. So kann etwa auf der operativen Ebene durch die rasche Identifikation und Bewertung einer Störung eine angemessene Reaktion wesentlich früher und situationsgerecht auf der Grundlage von Realdaten, anstatt nach einem festen Schema oder nach Erfahrungswissen, getroffen werden. Auf der taktischen und strategischen Ebene können die gesammelten Informationen einen Beitrag zur langfristigen Plananpassung und kontinuierlichen Verbesserung des Systems leisten. Die Entscheidungsfindung kann dabei durch die bessere Vernetzung der Akteure kooperativ mit Blick auf das Gesamtoptimum des Systems erfolgen. Da entsprechende Modelle und Methoden, der Praxis bislang nicht oder nur ansatzweise zur Verfügung stehen, erfolgt im Rahmen dieser Arbeit eine Untersuchung, Weiterentwicklung und Verknüpfung mit den vorhandenen theoretischen Grundkonzepten aus dem Supply Chain Management.

### **1.1 Problemstellung**

Beschaffungsnetzwerke sind in der betrieblichen Praxis einer Vielzahl stochastischer Einflüsse unterworfen. Auf der Lieferantenseite kommt es zu Abweichungen, weil bestimmte Teile entgegen der ursprünglichen Planung nicht in der geforderten Zeit, Menge oder Qualität bereitgestellt werden können. Transporte werden durch Staus, technische Störungen oder andere unvorhersehbare Ereignisse beeinflusst. Selbst der Empfänger kann das System stören, indem er durch die Änderung von Produktionsplänen Bedarfszeitpunkte kurzfristig verschiebt. Eigentlich reibungslos laufende Beschaffungsprozesse können dadurch zu Problemen in der Materialversorgung führen.

Klassischerweise werden die genannten Risiken durch Puffer im logistischen Netzwerk in Kombination mit einem Engpassmanagement abgefangen. So dient die Lagerhaltung einem zeitlichen und mengenmäßigen Ausgleich zwischen Materialzugang und Materialverbrauch. Zeitliche Puffer und das Vorhalten von Kapazitäten in Produktions- und Logistikprozessen können ebenso

vor unvorhersehbaren Ablaufkomplikationen schützen. Problematisch wird es, wenn diese Sicherheiten nicht mehr ausreichen. Dann ist eine Suche nach geeigneten Wegen zur Bewältigung eines drohenden Materialengpasses erforderlich. Die eingeleiteten Maßnahmen führen zu direkten oder indirekten Kosten, die es soweit wie möglich zu minimieren gilt. Es findet in der Praxis im Fall von Problemen meist keine systematische und computergestützte Lösungssuche statt. Die Steuerung geschieht vielmehr durch Disponenten im zeitaufwändigen Dialog zwischen den beteiligten Akteuren und unter einem meist sehr eingeschränkten Kenntnisstand über das Gesamtsystem. Der Erkenntnisgewinn für zukünftige Planungsperioden bleibt dabei allerdings überschaubar, da keine systematische Erfassung der Maßnahmen und Eingriffsgründe erfolgt. Bei scheinbar reibungslos laufenden Prozessen stellt sich dennoch die Frage nach der Effizienz. So sind die voran genannten Puffer an einigen Stellen im System nicht selten so großzügig gewählt, dass Fehler in den täglichen Abläufen verdeckt werden. Eine systematische Beobachtung und Ursachenforschung könnten zu einer Reduzierung kostspieliger Sicherheiten führen.

Die am Beschaffungsprozess beteiligten Unternehmen agieren autark, unter Berücksichtigung der eigenen unternehmerischen Ziele. Selbst wenn der Wille zur Kooperation und der Suche nach global optimalen Lösungen unterstellt wird, fehlt es in der Praxis an geeigneten Methoden zur Koordination. Die vorherrschende zentral-hierarchisch organisierte Systemlandschaft zur Planung und Steuerung der Prozesse in einem logistischen Netzwerk stößt früher oder später an ihre Grenzen. Agentenbasierte und in Teilen dezentral organisierte Lösungsansätze bieten an dieser Stelle die Möglichkeit, Potentiale bei der effizienten Planung und Steuerung von logistischen Netzwerken auszuschöpfen und diese Vorteile gerechter auf die beteiligten Akteure aufzuteilen.

## 1.2 Ziele der Arbeit

Vor dem Hintergrund der skizzierten Problemstellung dienen die folgenden forschungsleitenden Fragen als Rahmen dieser Arbeit.

### **Untersuchung des Systemverhaltens unter stochastischem Einfluss**

Zur Evaluation von Verfahren zur Planung und Steuerung in logistischen Netzwerken, bedarf es der Kenntnis über das Verhalten eines solchen Systems unter stochastischen Einflüssen und nach der Einleitung von Maßnahmen auf der operativen und taktischen Ebene. Es wird daher folgenden Fragen nachgegangen:

- Welche *Auswirkungen* haben typische Planabweichungsszenarien auf die logistischen Kennzahlen an unterschiedlichen Stellen eines Beschaffungsnetzwerks?
- Welche *Handlungsoptionen und -spielräume* stehen zur Verfügung, um Abweichungen auf der operativen Ebene durch Steuerungseingriffe zu begegnen und das System auf der taktischen Ebene kontinuierlich zu verbessern?

### **Entwicklung eines Konzepts zur kooperativen Planung und Steuerung**

Es erfolgen im Rahmen der Arbeit die Konzeptionierung, Implementierung und Evaluation eines Konzepts, das eine kooperative Planung und Steuerung von logistischen Netzwerken vorsieht. Dabei werden die Fragen untersucht:

- Wie lässt sich die *Dringlichkeit* von Abweichungen von den ursprünglich geplanten Abläufen bewerten und situationsgerecht eine geeignete Maßnahme einleiten?
- Wie können die Teilprobleme verschiedener logistischer Teildisziplinen über mehrere Akteure hinweg im Sinne einer Gesamtwohlfahrtsmaximierung *koordiniert* werden?

Im Rahmen der Arbeit soll der Entscheidungsfindungsprozess in einem komplexen logistischen System aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht betrachtet werden. In dieser Perspektive werden als Gegenstand der Untersuchung der Entwurf einer Infrastruktur von Softwareagenten unter dem Einsatz verschiedener regelbasierter und optimierender Lösungsansätze entwickelt und die Wirkweise am Beispiel eines logistischen Beschaffungsnetzwerks in einer Simulationsumgebung aufgezeigt. Die Arbeit verfolgt dabei einen empirischen Ansatz, um über die Induktion der Ergebnisse aus den Simulationsstudien Aussagen und Handlungsempfehlungen ableiten zu können.

## **1.3 Aufbau der Arbeit**

Die Arbeit beginnt mit der Untersuchung der Ursachen und Folgen von Volatilität in den regelmäßigen Abläufen eines logistischen Netzwerks. Dazu wird zunächst der Aufbau von Logistiksystemen unter Berücksichtigung von Prozess- und Netzwerkaspekten erörtert. Dies ordnet die Arbeit thematisch ein und dient dem Verständnis der Komplexität der Entscheidungsprobleme. Die Untersuchung der Volatilität erfolgt sowohl mit einer langfristigen als auch mit einer kurzfristigen Perspektive. Darüber hinaus gibt das zweite Kapitel einen Überblick über die Leistungs- und Zustandsbewertung logistischer Netzwerke mit Hilfe von Kennzahlensystemen. Im dritten Kapitel folgt die Einführung in die für das Konzept relevanten Planungs- und Steuerungsaufgaben des Beschaffungsprozesses. Konzepte des Supply Chain Managements zur Beherrschung von Risiken und Störungen werden untersucht. Das dritte Kapitel zeigt darüber hinaus die theoretischen Grundlagen und den aktuellen Stand der wissenschaftlichen Literatur zu Multiagentensystemen für die Logistik auf. Den Abschluss des Kapitels bildet die Formulierung des resultierenden Forschungsbedarfs.

Im vierten Kapitel wird die Entwicklung eines Konzepts zur kooperativen Planung und Steuerung in logistischen Netzwerken dokumentiert. Dazu werden die verwendeten und erweiterten Modelle und Methoden entlang des

gesamten Entscheidungsfindungsprozesses vorgestellt und diskutiert. Das fünfte Kapitel beschreibt die Entwicklung einer Simulationsumgebung, in der das Systemverhalten eines logistischen Netzwerks unter stochastischen Einflüssen und die Wirksamkeit der entwickelten Verfahren untersucht werden. Im sechsten Kapitel werden die Durchführung der Experimente sowie deren Bewertung aus logistischer Sicht dargestellt. Es wird dabei auf die Generierung geeigneter Testdatensätzen sowie die Durchführung einer statistischen Experimentplanung eingegangen. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung und Bewertung der Untersuchungsergebnisse ab. Kapitel 7 fasst schließlich die Ergebnisse und Erkenntnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf weiterführende Forschungsfragen, die sich im Laufe der Arbeit entwickelt haben. Abbildung 1.1 zeigt schematisch den Ablauf der Untersuchung.

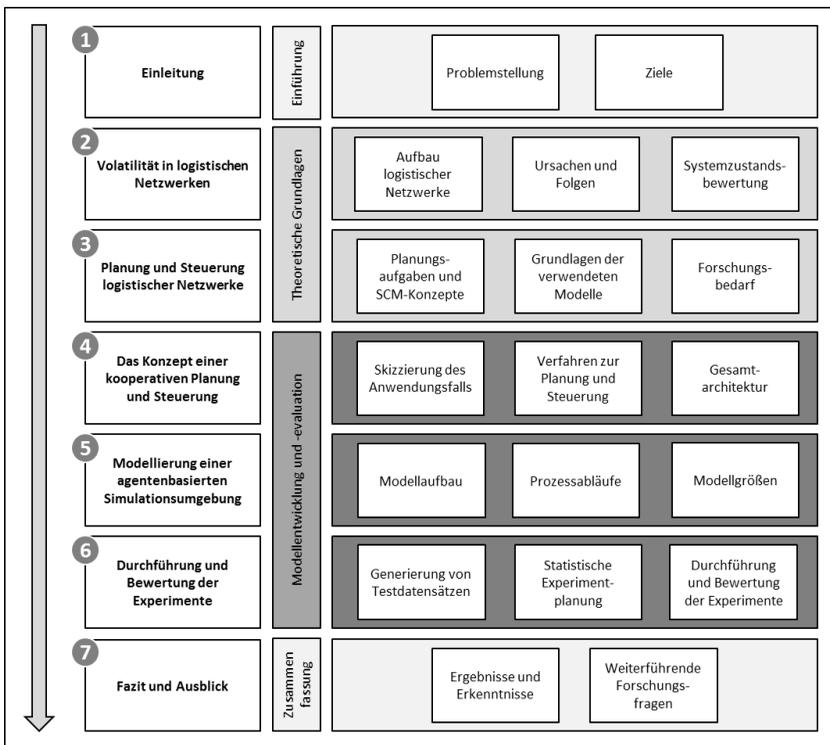


Abbildung 1.1: Ablauf der Untersuchung



## **2 Volatilität in logistischen Netzwerken**

Dieses Kapitel befasst sich mit dem Phänomen der Volatilität in den Prozessen logistischer Netzwerke. Zunächst wird der Aufbau logistischer Netzwerke aus Prozesssicht sowie unter Berücksichtigung von Netzwerkaspekten beschrieben und erörtert. Daraus ergeben sich Anforderungen an Systeme zur Planung und Steuerung logistischer Netzwerke, die bei der weiteren Konzeptentwicklung Berücksichtigung finden. Im Anschluss erfolgt die Untersuchung der Ursachen von lang- und kurzfristigen Prozessschwankungen sowie deren Auswirkungen. Zum Schluss des Kapitels wird auf die kennzahlenbasierte Leistungs- und Zustandsbewertung eines logistischen Systems eingegangen. als Unternehmen langfristig am Markt bestehen zu können, reicht es nicht aus, nachgefragte Produkte und Dienstleistungen anzubieten. Vielmehr kann sich in einem von Kostendruck geprägten Wettbewerb derjenige

### **2.1 Aufbau logistischer Netzwerke**

Im Folgenden werden der Aufbau und die Ausgestaltung logistischer Netzwerke beschrieben, was ein grundlegendes Verständnis für die Problemstellung dieser Arbeit schafft. Dabei wird zunächst eine prozessorientierte Sichtweise eingenommen, wie sie im Supply Chain Management Verwendung findet. Anschließend erfolgt die Erweiterung durch die Betrachtung der Netzwerkaspekte. Der Einfluss der Komplexität logistischer Netzwerke wird in diesem Zusammenhang ebenfalls erläutert. Abschließend wird die Bedeutung von Informationen für die effiziente Planung und Steuerung erörtert, da dieser Aspekt häufig über die erfolgreiche Umsetzung von Geschäftsprozessen entscheidet.

### 2.1.1 Die Supply Chain aus Prozesssicht

Der englische Begriff *Supply Chain* steht für ein Netzwerk von Unternehmen, die zum Zweck der Wertschöpfung miteinander in Beziehung stehen. Dabei entsteht ein Fluss von Material und Informationen, der für eine bedarfsorientierte Versorgung von Kunden mit Produkten und Dienstleistungen sorgt (Christopher 2016). Es werden dabei innerhalb der Unternehmen aus logistischer Sicht die Funktionsbereiche Beschaffung, Produktion und Distribution durchlaufen (Schuh und Stich 2013). Um eine Zuordnung von Kosten und Wertschöpfung zu erleichtern, ist eine Aufteilung der Aktivitäten ratsam. Dabei lassen sich primäre Aktivitäten (Eingangs- und Ausgangslogistik, Transformation in endgültige Produktform, Marketing und Vertrieb sowie Kundendienst) und unterstützende Aktivitäten (Beschaffung, Technologieentwicklung, Personalwirtschaft, Unternehmensinfrastruktur und weitere unterstützende Aktivitäten) unterscheiden (Porter 2010). Durch die voran genannten unternehmerischen Funktionsbereiche werden Beschaffungs- und Absatzmärkte miteinander verbunden (vgl. Abb. 2.1).



Abbildung 2.1: Die Funktionsbereiche eines Unternehmens aus logistischer Sicht

In der Literatur und in der betrieblichen Praxis ist der Begriff Supply Chain meist unscharf abgegrenzt, es werden weitere Begriffe synonym verwendet. So sind ebenso *Wertschöpfungskette* und *Logistikkette* gebräuchlich (Werner 2013), oder es werden, bei einer Betrachtung bestimmter Aufgaben und Aspekte, Begriffe wie *Frachtkette* oder *Entsorgungskette* verwendet (Gudehus 2012b). Um zu betonen, dass unter der Supply Chain keine streng sequentielle Abfolge der übergreifenden Prozesse zu verstehen ist, finden auch die Begriffe *Logistiknetzwerk* oder *Supply Network* Verwendung (Thaler 2007). Im

weiteren Verlauf dieser Arbeit wird für die Verbindung von Unternehmen zum Zwecke der gemeinsamen Wertschöpfung einheitlich der Begriff Supply Chain genutzt, der sich auf den Managementansatz des Supply Chain Management (SCM) stützt (Beckmann 2004).

Dem Konzept der Supply Chain liegt eine prozessorientierte Sichtweise zu Grunde. So bildet sich durch die geordnete Abfolge von Aktivitäten eine Prozesskette, die einen definierten Input in einen definierten Output überführt und Prozesskettenelemente entlang der Zeitachse miteinander verknüpft (Kuhn 2009). Die Modellierung von Prozessketten bietet dabei einen Beitrag zur Beherrschung der Gestaltungskomplexität durch die Detaillierung von Input- und Outputgrößen sowie prozessinterner Ablaufalternativen in Teilprozessen. Dies ist die Ausgangslage für die systematische Ableitung von Kennzahlen. Es hat sich dabei nach Kuhn eine Typisierung der logistischen Prozesse in Auftragsbearbeitungs-, Materialfluss-, Informations- und Lenkungsprozesse bewährt (Kuhn 2009).

Zur Umsetzung der Prozesskettenmodellierung wurde mittlerweile eine Reihe von Referenzmodellen entwickelt. Ein international bekanntes und in der Praxis etabliertes Konzept ist das „Supply Chain Operations Reference Model“, kurz SCOR, der Organisation *APICS Supply Chain Council* (APICS 2018). Es lassen sich damit sowohl inner-, als auch überbetriebliche Material- und Informationsflussbeziehungen in einer funktionalen Sichtweise abbilden (Thaler 2007). Die Prozessfolge einer Supply Chain wird dabei in die Prozesskategorien *Planen*, *Beschaffen*, *Herstellen*, *Liefern* und *Rückliefern* unterteilt und erstreckt sich von den Lieferanten der eigenen Lieferanten bis zu den Kunden der eigenen Kunden (vgl. Abb. 2.2). Teile der Prozesse lassen sich den *Planungs-*, *Ausführungs-* oder *Unterstützungsprozessen* zuordnen.

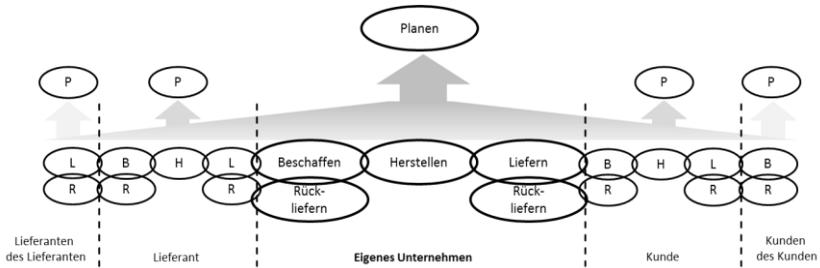


Abbildung 2.2: Die Prozessfolge einer Supply Chain im SCOR-Modell (in Anlehnung an (APICS 2018))

Das SCOR-Modell enthält eine vierstufige hierarchische Gliederungsstruktur. Auf der ersten Ebene werden zunächst die Kernprozesse und somit auch Inhalt und Umfang der betrachteten Supply Chain definiert. Die zweite Ebene ermöglicht die Kategorisierung dieser Prozesselemente über Referenzkategorien und auf der dritten Ebene wird schließlich die Gestaltung detailliert. Die vierte Ebene ist nicht Teil des Referenzmodells und sieht eine unternehmensspezifische Implementierung vor (Bolstorff et al. 2007). Abbildung 2.3 verdeutlicht das Ebenenkonzept des SCOR-Modells an einem Beispiel.

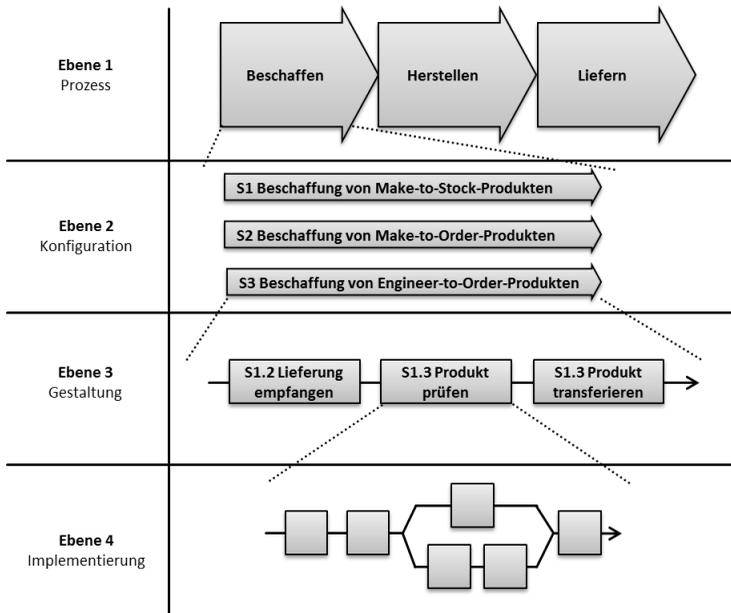


Abbildung 2.3: Die hierarchischen Ebenen des SCOR-Modells (in Anlehnung an (APICS 2018))

Im deutschsprachigen Raum hat sich, gerade bei kleinen und mittelgroßen Unternehmen, die Prozessmodellierung mittels Wertschöpfungskettendiagrammen (WKD) und (erweiterter) ereignisgesteuerter Prozessketten (EPK bzw. eEPK) etabliert. Ziel ist zum einen die Schaffung von Transparenz über komplexe Prozesse, zum anderen lassen sich Prozesse durch das Erkennen von Engpässen optimieren (Arndt 2015). Solche Modelle werden zudem für die erforderliche Prozessdokumentation im Rahmen einer Qualitätsmanagementzertifizierung nach der ISO 9000 Normenreihe eingesetzt (DIN EN ISO 9000:2015, DIN EN ISO 9001:2015). Den ereignisgesteuerten Prozessketten liegt das Konzept einer Architektur integrierter Informationssysteme (ARIS) zugrunde. Im ARIS-Modell wird die Prozessmodellierung in mehrere Beschreibungssichten (Funktionssicht, Organisationssicht, Datensicht, Leistungssicht und Prozesssicht) und Beschreibungsebenen (Fachkonzept, DV-Konzept und

Implementierungsebene) untergliedert, um so eine Vereinfachung zu erzielen (Scheer 1991). Für eine tiefergehende Darstellung zu diesem Thema wird auf (Scheer et al. 2005) und (Seidlmeier 2015) verwiesen.

Es ist erforderlich, dass Systeme zur Planung und Steuerung logistischer Netzwerke der prozessorientierten Sichtweise der gängigen SCM-Konzepte Rechnung tragen. Dazu sollten die Strukturen einer Supply Chain adäquat abgebildet werden können, indem auf die Konzepte zur Modellierung von Prozessketten so weit wie möglich zurückgegriffen wird und die im Unternehmen definierten Input-, Output- und Stellgrößen bei der Analyse und Optimierung der logistischen Prozesse Einzug finden.

### **2.1.2 Die Netzwerkaspekte von Supply Chains**

Ein logistisches Netzwerk eines Industrieunternehmens ist nach Fleischmann ein den gesamten Güterfluss umfassendes System, das sich durch Quellen und Senken, Kanten und Knoten sowie Schnittstellen zur Außenwelt auszeichnet (Fleischmann 2009). Die Quellen stehen für den Eintritt von Rohstoffen oder Gütern zur Supply Chain bei den Lieferanten, die Senken für den Abfluss von Gütern bei den Kunden. Die Knoten im Netz sind zum einen fokale Unternehmen mit einer Führungsrolle, ihre Lieferanten und Vorlieferanten sowie die Zwischen- und Endkunden. Dem können Umschlagpunkte zwischengeschaltet sein. Die Kanten des logistischen Netzwerks verknüpfen die in Beziehung stehenden Akteure miteinander, beispielsweise über Transportrelationen (Schuh und Stich 2013).

Die Schnittstellen solcher Netzwerke zur Außenwelt ergeben sich unter anderem dadurch, dass Lieferanten und Kunden der fokalen Unternehmen in der Regel Bestandteil weiterer Supply Chains sind. Dadurch ergibt sich eine Konkurrenz um Ressourcen, obwohl keine direkte Beteiligung der fokalen Unternehmen zu den übrigen Netzwerken besteht. Abbildung 2.4 verdeutlicht die Struktur eines logistischen Netzwerks aus Sicht der Beschaffungs- und Distributionslogistik. Bretzke macht deutlich, dass die Betrachtung von

Wertschöpfungsketten eine Pipelinesicht fördert. Er sieht vielmehr „sich überlappende, nicht konvergierende, polyzentrische Netze, die man nicht an irgendwelchen Rändern scharf abgrenzen kann, die jeweils nicht über eine eigene Identität verfügen und die deshalb auch nicht unternehmensübergreifenden Strategien und Zielen folgen“ (Bretzke 2015).

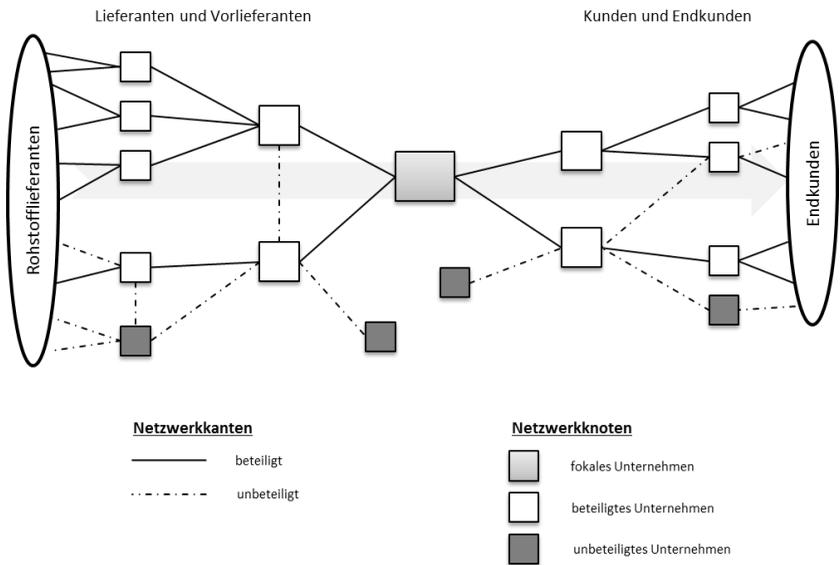


Abbildung 2.4: Struktur eines logistischen Netzwerks mit seinen Beteiligungen und Verbindungen zur Außenwelt (in Anlehnung an (Vahrenkamp et al. 2012))

Das logistische Netzwerk eines einzelnen Unternehmens ordnet sich demnach in ein übergeordnetes Netz aus gemeinsam genutzten Ressourcen mit Abhängigkeiten ein. Wechselwirkungen mit Problemfortpflanzungspotential über mehrere Supply Chains hinweg ergeben sich durch die folgenden Gegebenheiten:

- Rohstoffe und Vorprodukte können branchenübergreifend für eine Vielzahl von Zwischen- und Endprodukten von Bedeutung sein.

Nachfrageschwankungen einzelner Unternehmen oder Branchen können daher auch Auswirkungen auf weitere Unternehmen oder Branchen haben.

- Transportressourcen (etwa LKW- oder Bahn-Kapazitäten) werden, sofern sie nicht in der eigenen Organisation vorgehalten werden, durch Logistikdienstleister am Markt angeboten. Nachfrageschwanken einzelner Unternehmen oder Branchen können auch dort zu einer Verknappung oder zu einem Überangebot führen. Dies kann kurzfristig Probleme bei der Ausführung nach sich ziehen sowie mittel- und langfristig zu Angebots- und Preisänderungen am Markt führen. Die Transportnetzwerke aller betroffenen Unternehmen müssten in der Folge an die neuen Gegebenheiten angepasst werden, etwa durch das Schließen neuer Verträge mit den Logistikdienstleistern oder die unternehmensinterne Anpassung an die neuen Gegebenheiten.
- Es darf nicht außer Acht gelassen werden, dass außerbetriebliche Transportvorgänge zwangsläufig in einem gemeinsamen öffentlichen Verkehrsnetz erbracht werden. Eine lokale Überlastung oder Einschränkung der Leistungsfähigkeit, etwa durch Unfälle oder Baustellen, führt in Form von Stauereignissen bei allen Beteiligten zu Wartezeiten.

Die Komplexität eines logistischen Netzwerks resultiert nach Ramanathan und Ramanathan (2014) aus der Komplexität der Produkte und der Prozesse. Die Produktkomplexität resultiert aus der Anzahl und den Unterschieden der verbauten Komponenten im Endprodukt und der Zahl der Prozessschritte in der Herstellung. Darüber hinaus finden zur Komplexitätsbewertung der technologische Schwierigkeitsgrad bei Design und Herstellung, Wechselbeziehungen zwischen einzelnen Komponenten und besondere Anforderungen hinsichtlich Sicherheit und Handhabung Berücksichtigung. Auf die Komplexität der Prozesse in einer Supply Chain lässt sich unter anderem über die Anzahl und Entfernung der Lieferanten, die Wiederbeschaffungszeit, die Anzahl und Variation der Beschaffungs- und Distributionskanäle, die Anzahl und Variation

von operativen Anforderungen und Handlungsweisen sowie des Vorhandenseins von besonderen kulturellen, infrastrukturellen oder politischen Herausforderungen schließen (Ramanathan und Ramanathan 2014). Nach Mentzer et al. lassen sich Supply Chains in ihrer Komplexität nach der horizontalen, vertikalen und lateralen Verflechtung unterscheiden. So bestehen *direkte Supply Chains* lediglich aus einem fokalen Unternehmen und den direkten Partnern, etwa Lieferanten oder Kunden. *Erweiterte Supply Chains* umfassen darüber hinaus auch die Lieferanten der Lieferanten sowie die Kunden der Kunden. In einer *ultimativen Supply Chain* sind schließlich alle Organisationen beteiligt, die zum physischen, informationellen und monetären Fluss beitragen (Mentzer et al. 2001).

Der Komplexitätsgrad eines logistischen Netzwerks hat Einfluss auf die Planbarkeit, die Möglichkeiten zur Überwachung und Steuerung und somit letztlich auch auf die Leistungsfähigkeit sowie die Robustheit gegenüber äußeren Einflüssen. Es ist nachvollziehbar, dass sehr komplexe Systeme sowohl von der menschlichen Auffassungsgabe als auch in Form von mathematischen Modellen und Lösungsverfahren nur unzureichend zu erfassen und abzubilden sind. Getroffene Entscheidungen sind dann zwangsläufig mit Defiziten durch Vereinfachungen oder unvollständige Informationen behaftet (Laux et al. 2012). Der Informationsfluss für eine effiziente Planung und Steuerung der Supply Chain müsste demnach nicht nur innerhalb des eigenen Unternehmens oder gar Netzwerks umfassend und ohne Zeitverzug erfolgen, sondern idealerweise auch über die Netzwerkgrenzen hinaus die Abhängigkeiten zur Außenwelt abdecken. Dem Supply Chain Management kommt in diesem Zusammenhang auch die Aufgabe der erfolgreichen Netzwerkkoordination zuteil, die Planungsthemen der innerbetrieblichen und außerbetrieblichen Logistik miteinander verknüpft (Werner 2013).

Systeme zur Planung und Steuerung müssen den Netzwerkaspekten Rechnung tragen und trotz hoher Komplexität und verteilter Strukturen der logistischen Anwendungsfälle eine hinreichend zuverlässige Entscheidung in angemessener Zeit ermöglichen. Dabei sind dezentrale Ansätze mit einer

verteilten Entscheidungsfindung vielversprechend, weil sie Teilabschnitte des logistischen Netzwerks mit geringerer Komplexität geeignet abbilden und diese Ergebnisse der übergeordneten Suche nach einem Optimum aus Gesamtsystemsicht zuführen können.

### 2.1.3 Die Bedeutung von Informationen

In einer Supply Chain ist der physische Fluss von Material und Gütern in der Regel offensichtlich. Verborgener ist hingegen der Fluss der dazugehörigen Informationen. Dieser ist jedoch von besonderer Bedeutung, um entscheidungsfähig zu bleiben und die Geschäftsprozesse effizient betreiben zu können. So sieht Alicko eine Reduzierung von Beständen, Zusatztransporten und Verschrottung sowie eine Steigerung der Kundenzufriedenheit, wenn im Supply Chain Management Informationen in Echtzeit durch die gesamte Kette propagiert werden (Alicko 2005). Tempelmeier beschreibt ebenfalls Unsicherheiten in der betrieblichen Praxis, die sich aus unvollständigen, unsicheren oder nur mit Verzögerung vorliegenden Informationen zu Bedarfsmengen und -zeitpunkten sowie Wiederbeschaffungszeiten ergeben. Gegen diese Unsicherheiten erfolgt im Bestandsmanagement eine Pufferung in Form von kostenerzeugenden Sicherheitsbeständen (Tempelmeier 2015).

Es lassen sich *Informationen* und *Daten* voneinander abgrenzen (VDI EN ISO 9000:2015). Während eine Information einer Nachricht den Neuigkeitswert für den Empfänger beimisst und somit auf den inhaltlichen Aspekt abzielt, beschreibt ein Datum einen gemessenen, beobachteten oder anderweitig erhobenen Wert oder Fakt (Schönsleben 2001). Der tatsächliche Informationsgehalt der Daten ergibt sich aus dem möglichen Nutzen für die Anwendung. Die Daten in einer Supply Chain sind vielfältig und lassen sich unterscheiden hinsichtlich der zeitlichen Perspektive (Vergangenheitsdaten, Aktualdaten, Prognosedaten), der Granularität (Rohdaten, aggregierte Daten), der Verfügbarkeit (Echtzeitdaten, Intervalldaten) sowie dem Besitzverhältnis (eigene Daten, fremde Daten). In der Praxis werden die Begriffe Daten und Informationen häufig synonym verwendet. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird einheitlich

das Datum für die technische Sichtweise und die Information für die inhaltliche Sichtweise verwendet.

Für den Austausch von Informationen zwischen Lieferanten, Empfängern und Logistikdienstleistern entlang des Beschaffungsprozesses haben sich in einigen Industriebranchen Standards etabliert. In der Automobilbranche vereinheitlichten Verfahrensbeschreibungen des Verbands der Automobilindustrie (VDA) zwischen den beteiligten Akteuren Begriffe, den Kommunikationsprozess sowie Datenformate und Inhalte (vgl. VDA 4984:2016, VDA 4985:2013 und VDA 4986:2016 für Lieferabrufe, vgl. VDA 4987:2016 für Lieferavise, vgl. VDA 4933:2017 für Transportaufträge). Etwas weiter gefasst sind die Möglichkeiten zum elektronischen Austausch von Dokumenten zwischen gängigen ERP-Systemen. Auch dort führen Protokolle des *Electronical Data Interchange (EDI)* zu einem strukturierten Informationsfluss für Standardgeschäftsvorfälle. Ein international etablierter Standard ist UN/EDIFACT der Vereinten Nationen (UNECE 2018).

Trotz eines in Teilen strukturierten Informationsflusses zwischen den Unternehmen kommt es in der Praxis häufig zu zeitlichen Verzögerungen oder Medienbrüchen bei der Abbildung der physischen Prozesse. Automatisierte oder teilautomatisierte Identifikationssysteme wie Barcode oder RFID können an dieser Stelle Abhilfe bei der echtzeitnahen Erfassung und Zuordnung von logistischen Ereignissen liefern. Solche Systeme sind allerdings nach wie vor nicht flächendeckend im Einsatz oder haben spezifische systembedingte Fehlerquellen. Ebenso müssen für eine korrekte Verarbeitung und Nutzung der Daten die IT-Systeme im Hintergrund entsprechend konfiguriert und die erforderlichen Stammdaten gepflegt sein (vgl. dazu Lepratti et al. 2014 und Kern 2007). Es bilden daher in der betrieblichen Praxis nach wie vor papierbasierte Dokumente (etwa Lieferscheine) eine wichtige Rolle im Informationsfluss, mit allen systembedingten Nachteilen.

Aus Optimierungssicht sind unvollständige und verzögert verfügbare Informationen aus vielerlei Hinsicht problematisch. Die Abbildung 2.5 zeigt die Strukturebenen mathematischer Entscheidungsprobleme sowie die jeweiligen

Fragestellungen zur Umsetzung eines vollständig definierten oder in Teilen defekten Problems. Bereits auf den oberen Ebenen führen falsche oder mit Unsicherheit behaftete Informationen zu wesentlichen Strukturdefekten. So lassen sich heterogene Datenströme aus mehreren Quellen einer Supply Chain nicht mit Optimierungsproblemen in Einklang bringen und müssen vereinfacht oder ausgelassen werden. Wirkzusammenhänge, Handlungsalternativen und Zielsetzungen lassen sich dann ebenfalls nicht adäquat abbilden (Scholl 2008). Im Kontext von Industrie 4.0 ist auch von Real World Awareness die Rede, also dem Bewusstsein für den Grad der Abbildung der realen Welt in den vereinfachten Modellen mathematischer Entscheidungsprobleme (Kagermann et al. 2016). Zu Entscheidungssituationen unter Unsicherheit in quantitativen Modellen gibt des weiteren Werners einen Überblick (Werners 2013).

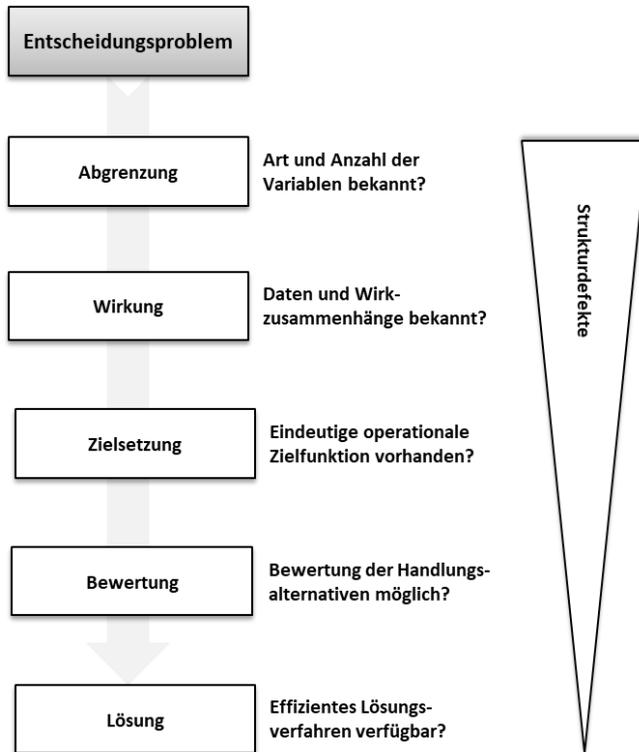


Abbildung 2.5: Strukturebenen und mögliche Strukturdefekte von mathematischen Entscheidungsproblemen (in Anlehnung an (Scholl 2008))

In Hinblick auf Systeme zur Planung und Steuerung logistischer Netzwerke ist festzuhalten, dass die entwickelten Modelle und Lösungsverfahren nur ein Teil der Problemlösung sein können. Mindestens ebenso wichtig ist die zuverlässige Beschaffung der einer Entscheidung zu Grunde liegenden Informationen. Es besteht sonst schnell die Gefahr, Probleme (nahezu) optimal zu lösen, die nur eine sehr unzureichende Abbildung des realen Problems darstellen. Um dies zu umgehen, müssen Daten weitgehend strukturiert und automatisiert übertragen und die Informationen möglichst ohne Zeitverzug

verarbeitet werden. Gerade bei komplexen System- und Entscheidungsstrukturen liegt die Herausforderung in einer geeigneten Dekomposition der Probleme sowie in der raschen Erfassung von Ereignissen des physischen Materialflusses und der Verteilung der Planungsergebnisse an alle Akteure.

## **2.2 Ursachen und Folgen von Volatilität in logistischen Prozessen**

Eine Herausforderung vieler Logistik- und Einkaufsplaner ist die ständige Abweichung abgeleiteter Prozessstati von den Zielwerten der ursprünglichen Planung. Logistische Prozesse sind nicht deterministisch, sondern unterliegen durch Staus, technische Störungen, nicht bereitgestellte Ware oder andere unvorhersehbare Ereignisse stochastischen Effekten. Dies erfordert eine geeignete Reaktion und fortlaufende Anpassung der Pläne. In diesem Unterkapitel wird untersucht, was die Ursachen von Volatilität in logistischen Prozessen sind und welche Folgen sich daraus ergeben. Dazu werden zunächst grundlegende Begriffe eingeführt. Im Anschluss werden die Auslöser von Volatilität zunächst in einer langfristigen und später auch in einer kurzfristigen Perspektive betrachtet.

### **2.2.1 Begriffe eines ereignisbasierten Supply Chain Managements**

Bei der Untersuchung von Systemen zur Planung und Steuerung von logistischen Netzwerken hat sich gezeigt, dass wesentliche Begriffe zur Beschreibung von ereignisbasierten Planungsergebnissen, Systemzuständen und Vorgehensweisen sowohl in der Literatur als auch in der betrieblichen Praxis nicht einheitlich definiert sind. Teils werden Begriffe synonym verwendet, teils verhindert sogar eine differente Belegung ein gemeinsames Begriffsverständnis. Es werden daher die für den weiteren Verlauf der Arbeit relevanten Begriffe eingeführt und deren Verständnis erörtert.

Unter einem *Sollprozess* wird eine geplante Abfolge von logistischen Ereignissen verstanden, die sich durch definierte Zeit-, Orts- und Mengenangaben auszeichnet (etwa die Ankunft eines LKW an einem Tourpunkt und die Übergabe von Packstücken an den Empfänger). Der Sollprozess ist das Ergebnis der vorangegangenen Planung und bildet die Grundlage zur Erfassung und Bewertung von Abweichungen. Es ergeben sich Soll-Größen, gegen die während der Ausführung der Prozesse gemessen werden kann. In der Verfahrensbeschreibung VDA 5002 beschreibt der *Termin* den Soll-Zeitpunkt eines Transport- und Lieferprozesses (VDA 5002:2016). Die im vorigen Unterkapitel beschriebenen Prozessmodelle des Supply Chain Management (vgl. SCOR-Modell) oder Ansätze des Lean Management enthalten ebenso als zentrales Element die Definition von Sollprozessen, um über die Beobachtung und Bewertung der Prozessausführung eine Verbesserung voranzutreiben. Sofern ein Nichterreichen der vorgegeben Sollwerte bis zu einem gewissen Grad aus Gesamtsystemsicht ertragen werden kann, gibt die Angabe einer *Toleranz* den Spielraum bei der Ausführung vor.

Während der Ausführungsphase logistischer Prozesse ergeben sich Ist-Werte durch Messung (für die bereits vollzogenen Prozessschritte) sowie Prognosewerte durch Vorausschau (für die noch zu absolvierenden Prozessschritte). Weichen diese Ist- oder Prognosewerte von den zuvor geplanten Soll-Größen ab, ergibt sich eine *Abweichung*. Das Ausmaß der Abweichung lässt sich in Bezug zur Soll-Größe setzen und wird in derselben Maßeinheit angegeben. Die erfassten Abweichungen bilden die Grundlage für die weitere Beurteilung, sind für sich genommen jedoch noch nicht aussagekräftig. Im Gegensatz zur Abweichung enthält der Begriff der *Störung* eine Wertung in Hinblick auf die Folgen eines Ereignisses für das logistische System. Sofern Sollwerte zusammen mit einer Toleranz gegeben sind, führt ein Abweichungsereignis außerhalb dieser Toleranzgrenzen formal zu einem Störungsereignis (dies entspricht der *Nichterfüllung von Anforderungen* gemäß VDI EN ISO 9000:2015).

Wenn der Störungsbegriff über einzelne Messpunkte hinausgeht, muss für jede Abweichung eine Abschätzung der messbaren Beeinträchtigung der

betrieblichen Leistungserstellung für angrenzende Teilprozesse oder das Gesamtsystem erfolgen. Im Rahmen der Arbeit wird der Begriff der *Dringlichkeit* eingeführt. Es handelt sich dabei um ein Bewertungsmaß für Abweichungen und spiegelt die Wahrscheinlichkeit für den Eintritt zuvor definierter Schadenereignisse wider. In diesem Zusammenhang ist auch auf die Verwendung der entsprechenden englischsprachigen Begriffe verwiesen. Dort wird im Supply Chain Management die zeitlich begrenzte und in ihren Auswirkungen beschränkte *Disturbance* (entspricht einer Beeinträchtigung der betrieblichen Abläufe) von der in der Wirksamkeit wesentlich mächtigeren *Disruption* (entspricht einer Unterbrechung der betrieblichen Abläufe) unterschieden (Pfohl 2016).

Der Begriff der *Volatilität* leitet sich vom lateinischen Wort *volatilis* – fliegend, flüchtig ab. In den Wirtschaftswissenschaften wird der Begriff verwendet, um etwa negative Einflüsse aus schwankenden Preisen an den Märkten abzubilden. Dabei wird mathematisch meist die *Standardabweichung* als Streuungsmaß herangezogen, die für eine Beobachtungsreihe mit dem arithmetischen Mittel  $\bar{x}$  spezifisch berechnet wird (Hartung 2009):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.1)$$

Im logistischen Kontext des Anwendungsfalls dieser Arbeit beschreibt die Volatilität die Schwankung einzelner Werte in einer Zeitreihe von Messdaten, die bei der Erbringung von logistischen Leistungen erhoben werden können (etwa die Zeit zur Beladung eines LKW). Das Ziel ist es dabei, bei der Durchführung der Prozesse eine möglichst geringe Streuung zu erzeugen, um die Planbarkeit zu erhöhen. Ähnlich wie eine hohe Volatilität an den Aktienmärkten für unruhige Zeiten und hohe Risiken für die Anleger steht, deutet auch eine hohe Volatilität in einem Logistiksystem auf Unruhe und asynchron laufende Prozesse hin, einhergehend mit einem erhöhten Planungsaufwand und Bedarf an kostenträchtigen Puffern im System (Hopp und Spearman 2001). Weitere wichtige statistische Maße sind in diesem Zusammenhang die häufig

verwendete Varianz sowie, zur Darstellung der Streuung mit Bezug zum arithmetischen Mittel, der Variationskoeffizient und die Variabilität (Tempelmeier 2015):

$$Var = \sigma^2 \quad (2.2)$$

$$CV = \frac{\sqrt{Var}}{\bar{x}} \quad (2.3)$$

$$SCV = \frac{Var}{\bar{x}^2} \quad (2.4)$$

Der Begriff des *Risikos* wird in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen verwendet und intensiv diskutiert. Gemein ist den meisten Definitionen, dass durch das Eingehen eines Risikos (bewusst oder unbewusst) aus zukünftigen Ereignissen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit negative Folgen erwachsen können. In den Ingenieurwissenschaften wird das Risiko als quantifizierbare Größe verstanden, die das mögliche Schadensausmaß, die Eintrittswahrscheinlichkeit und in einigen Anwendungsfällen auch die Entdeckungswahrscheinlichkeit in Bezug setzt. Diesem Verständnis von Risiko wird in der Arbeit gefolgt, so dass folgender Zusammenhang gilt:

$$\begin{aligned} Risiko = & \text{Schadensausmaß} * \text{Eintrittswahrscheinlichkeit} \\ & * \text{Entdeckungswahrscheinlichkeit} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Zuletzt gilt es noch die Begriffe der *Planung* und der *Steuerung* zu erläutern. Unter der Planung wird in Anlehnung an Dangelmaier ein Entscheidungsprozess verstanden, der logistische Probleme strukturiert löst und aus den zur Verfügung stehenden Ablaufvarianten, diejenige mit dem höchsten Zielerreichungsgrad auswählt. Dabei werden Teilpläne koordiniert, Aufgaben und Mittel definiert, Reserven für mögliche Planabweichungen berücksichtigt und schließlich die Planumsetzung veranlasst (Dangelmaier 2009). Die Steuerung ist im Kontext der Arbeit in Anlehnung an die regelungstechnische Begriffsbelegung zu verstehen, bei der die Beeinflussung der Outputgrößen eines definierten Systems durch Modifikation der Inputgrößen erfolgt (DIN IEC 60050-

351:2014). Die Steuerung zielt also im kurzfristigen Zeithorizont auf eine Beeinflussung des Systems zur Laufzeit unter möglichst genauer Kenntnis der Wirkzusammenhänge ab, wohingegen die Planung durch die Abwägungs- und Entscheidungsprozesse geprägt ist. Scholz-Reiter et al. nehmen weiterhin eine Unterscheidung zwischen der Steuerung und der Regelung eines logistischen Systems vor. Während die Steuerung auf der Grundlage eines Wirkmodells ohne Rückkopplung arbeitet, kann die Regelung unter Einbeziehung einer Stellgröße in einem geschlossenen Kreis wirken (Scholz-Reiter et al. 2008). Da die Übergänge zwischen Planungs- und Steuerungsverfahren meist fließend sind, erfolgt im weiteren Verlauf der Arbeit keine explizite Unterteilung.

### **2.2.2 Langfristige Perspektive – Dynamik in Supply Chains**

Bei der Untersuchung von Ursachen und Folgen der Volatilität in logistischen Netzwerken wird zunächst die langfristige Perspektive betrachtet. Supply Chains operieren nicht als starres Gebilde isoliert von der Außenwelt (vgl. Kapitel 2.1.2). Sie sind vielmehr ständigen Änderungen des Umfelds unterworfen und müssen sich diesem anpassen. So führen politische, gesellschaftliche aber vor allem auch technologische Entwicklungen zu neuen Herausforderungen. Kersten et al. sehen in einer aktuellen Studie der Bundesvereinigung Logistik (BVL) als maßgebliche Trends für die Logistik und das Supply Chain Management einen zunehmenden Kostendruck, die Steigerung des Individualisierungsgrads und der Komplexität von Produkten, die Digitalisierung von Geschäftsprozessen und einhergehende Anforderungen an die Transparenz von Supply Chains sowie zunehmenden Personalmangel durch veränderte Kompetenzanforderungen im Zuge der digitalen Transformation (Kersten et al. 2017). Wittenbrink zeichnet ein ähnliches Bild. Er sieht gesteigerte Anforderungen für die Logistik unter anderem durch den Trend zu einer stärkeren Globalisierung von Supply Chains, gestiegene Kundenanforderungen hinsichtlich Komplexität und Individualität der Produkte, den Abbau von Lagerbeständen, eine Verknappung von Verkehrsinfrastruktur sowie die demographische Wandlung des Arbeitsmarkts (Wittenbrink 2014). Bauernhansl sieht die gestiegenen Anforderungen an Produktion und Logistik und den

damit einhergehenden Wettbewerbsdruck als Auslöser für die derzeit grundlegende Wandlung des Wirtschaftssektors. Die digitale Transformation ist im deutschsprachigen Raum als *Industrie 4.0* bekannt und verspricht die Tragweite einer vierten industriellen Revolution zu haben (Bauernhansl 2014). Die Abbildung 2.6 zeigt die relevantesten der derzeit in der Literatur diskutierten Entwicklungen und Trends, der sich die Logistik aktuell und zukünftig stellen muss.

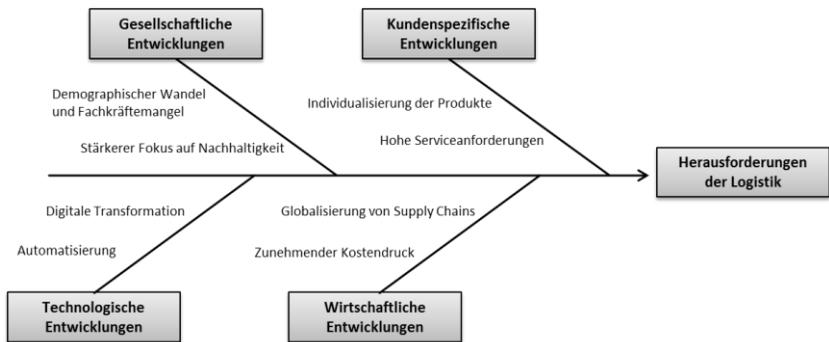


Abbildung 2.6: Herausforderungen der Logistik durch Entwicklungen und Trends

Bei der wissenschaftlichen Untersuchung von dynamischen Vorgängen in Supply Chains werden zwei Phänomene branchenübergreifend immer wieder beobachtet. Zum einen nimmt die Varianz der Bestellmenge flussaufwärts zu und zum anderen beschleunigen sich die Innovationszyklen flussabwärts (vgl. Abb. 2.7). Beide Wirkzusammenhänge wurden mehrfach empirisch belegt, so dass diesen der Charakter einer Gesetzmäßigkeit zugesprochen wird.

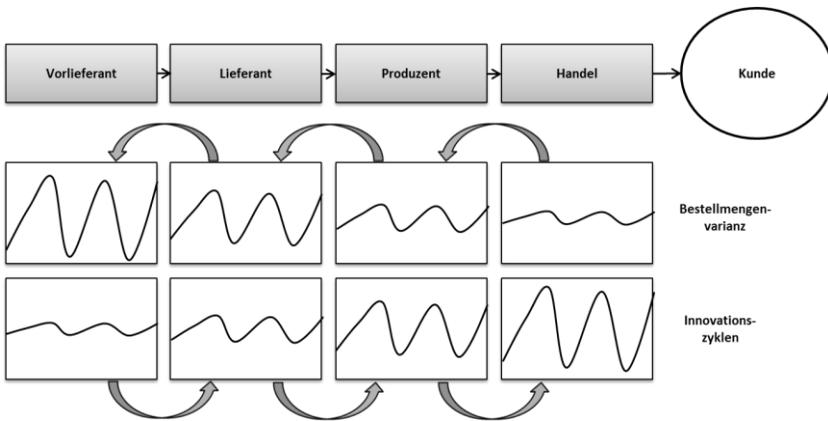


Abbildung 2.7: Gesetzmäßigkeiten der Dynamik in Supply Chains

Das erste Phänomen ist in der Literatur als *Bullwhip-Effekt* bekannt und geht in der initialen Beschreibung zurück auf Studien von Forrester (1958 und 1961). In den 1990-er Jahren konnten die Wirkzusammenhänge bei Procter & Gamble am Renner-Produkt Pampers sowie bei Hewlett-Packard bei Laserdruckern beobachtet werden, beides Produkte mit einem stabilen Absatz am Endverbrauchermarkt. In der Folge wurde der Bullwhip-Effekt unter anderem von Lee et al. (1997) sowie Chen et al. (2000) quantifiziert und analytisch beschrieben. Gründe für das Auftreten der Bestellmengenvarianz über mehrere Stufen einer Supply Chain sind (vgl. Alicke 2005):

- Durch eine ausschließlich lokale Verarbeitung von Nachfrageinformationen werden Entscheidungen über die Belegung von Produktionsressourcen und die Bestellung von Vorprodukten auf der Grundlage von Prognosen ohne Kenntnis der tatsächlichen Kundennachfrage getroffen. Ein Über- oder Unterschätzen setzt sich mit einem zeitlichen Verzug flussaufwärts fort.
- Die Bündelung von Aufträgen begünstigt ebenfalls eine steigende Varianz der Bestellmenge flussaufwärts. So wird die Nachfragemenge

mehrerer Perioden zusammengefasst und lässt den Bezug zur tatsächlichen Periodennachfrage für die Lieferanten und Vorlieferanten verwischen. Die großen Bestelllosgrößen können das Ergebnis der Planung sein (etwa durch den Einsatz von Losgrößenformeln zur Bestellkostenoptimierung) oder technische bzw. organisatorische Gründe haben (etwa bei der Bestellung von ganzen Paletten oder Transportmittelladungen).

- Marktphänomene wie Preisschwankungen oder begrenzte Mengenkontingente bei den Lieferanten und Vorlieferanten können ebenfalls das Auftreten des Bullwhip-Effekts in Supply Chains begünstigen. In beiden Fällen korreliert die Nachfrage der einzelnen Stufen im ungünstigen Fall nicht mehr mit dem tatsächlichen Bedarf des Endkundenmarkts, etwa weil Preisnachlässe für eine Bestellmengenbündelung genutzt werden oder absichtlich überhöhte Bestellungen zur Sicherung eines möglichst hohen Anteils an den knappen Gütern getätigt werden.
- Schließlich können auch Fehleinschätzungen der Akteure zu, aus rationaler Sicht, über- oder unterdimensionierten Bestellungen führen und die Bestellmengenvarianz über die Stufen der Supply Chain verstärken. Dies kann durch funktionell eingeschränkte oder falsch eingestellte Planungssysteme begünstigt werden. Wie anfällig der menschliche Entscheider für eine falsche Interpretation von Nachfrageinformationen ist, konnte Serman mithilfe der Management-Simulation *Beer Distribution Game* zeigen (Serman 1989).

Bereits geringe Nachfrageschwankungen bei den Endkunden können zu starken Ausschlägen (bis zu Faktor 10) bei den Rohstofflieferanten führen. In der Folge kommt es zu einer ineffizienten Nutzung von Kapazitäten, da diese für die Spitzenzeiten vorgehalten werden müssen und in schwachen Phasen nicht ausgelastet werden können. Ebenso kommt es durch den Bullwhip-Effekt zu einer Schwankung der Durchlaufzeit, der Ausbildung eines höheren Bestandsniveaus und der Verschlechterung von Servicegrad- und Liefertreue-

Kennzahlen. Die Kosten für die Logistik nehmen insgesamt zu (Alicke 2005). Es wird deutlich, welchen Beitrag die Weitergabe und Nutzung von Informationen entlang der Planungsprozesse einer Supply Chain liefern kann. Ebenso ist ersichtlich, dass eine Logistik der kleinen Lose einen Beitrag zu einer schwankungsarmen Supply Chain leisten kann (Gadanzo 2003).

Die *Beschleunigung der Innovationszyklen*, die flussabwärts einer Supply Chain auftreten, wurden von Corsten und Gabriel (2002) untersucht und beschrieben. Es hat sich gezeigt, dass die Dynamik technologischer Neuerungen mit zunehmender Nähe zum Endkundenmarkt zunimmt. Während sich bei hochspezialisierten Lieferanten und Vorlieferanten meist nur wenig Spielraum für technologische Neuerungen ergibt, müssen Unternehmen nah am Endkundemarkt mit innovativen Produkten in relativ kurzer Abfolge den Kundenanforderungen Rechnung tragen. Es ergeben sich also Nachfrage- und Angebotsschwankungen durch die Lebenszyklen der Produkte und Vorprodukte einer Supply Chain.

### **2.2.3 Kurzfristige Perspektive – Abweichungen in der Ausführungsphase**

Betrachtet man die Volatilität in logistischen Netzwerken aus der kurzfristigen Perspektive, fällt der Blick auf die Abweichungen von den ursprünglich geplanten Abläufen in der Ausführungsphase. Während die voran beschriebenen Gesetzmäßigkeiten der Dynamik einer Supply Chain in der Literatur sehr präsent sind, werden die Ursachen und Folgen von alltäglichen Prozessschwankungen weniger intensiv betrachtet. Ein tiefergehender Blick lohnt sich allerdings, da die Beseitigung von Ineffizienz und Abweichungsrisiken ein erhebliches Kostensparpotential bietet. Eine Kategorisierung von Risiken kann nach unterschiedlichen Aspekten erfolgen. So nehmen Chopra und Sodhi (2004) eine Unterteilung nach der Tragweite vor, wobei nach langwierigen *Unterbrechungen* (etwa durch Naturkatastrophen oder Lieferanteninsolvenz) und kurzfristigen *Verspätungen* unterschieden wird. Als Ursachen werden Kapazitäts- und Qualitätsprobleme, Prognosefehler, falsch aus-

gelegte Bestände sowie eine mangelnde Flexibilität der vorgelagerten Stufen der Supply Chain genannt. Wagner und Bode (2006) unterscheiden nach der Tragweite zwischen *Katastrophen* (Naturkatastrophen oder politische Instabilität) und kürzer andauernden Risiken. Diese werden aufgeteilt in die *Nachfrage-* und *Versorgerseite*. Jüttner et al. (2003) schlagen eine Kategorisierung in Risikogruppen vor, die die Einflüsse auf die Supply Chain in *Umgebungsrisiken*, *Netzwerkrisiken* und *Organisationsrisiken* unterteilen.

Risikogruppe	Einzelrisiken	Literatur
Natur	Unwetter Erdbeben, Tsunami Vulkanausbruch	Haraguchi und Lall 2014, Waters 2011,
Gesellschaft/ Politik	Streik Terror Regulierung/Vorschriften	Knemeyer et al. 2009, Trkman und
Wirtschaft	Marktschwankung Finanzkrise	McCormack 2009, Sheffi 2001

Tabelle 2.1: Umfeldrisiken in Supply Chains

Eine einheitliche Kategorisierung von Risiken fehlt in der Literatur. Es wird daher eine Einteilung in Anlehnung an die einschlägige Literatur vorgenommen, die die Schemata einzelner Quellen kombiniert. Die Tabelle 2.1 zeigt eine Übersicht der am häufigsten diskutierten *Umfeldrisiken* in Supply Chains und eine Auswahl von Literaturquellen, die sich mit der jeweiligen Risikogruppe ausschließlich befassen oder mitbefassen. Ein Schwerpunkt der Quellen liegt im Bereich der Naturrisiken, wobei meist reale Ereignisse der Vergangenheit als Motivation herangezogen werden (etwa der Ausbruch des Eyjafjallajökull im Jahr 2010). Bei den gesellschaftlichen und politischen Risiken liegt der Fokus der Untersuchungen auf Streikereignissen und Terrorlagen. Bei anstehenden Gesetzesänderungen mit möglichen Folgen für die Wirtschaft rücken diese ebenfalls regelmäßig ins Licht. Bei der Betrachtung von wirtschaftlichen Aspekten werden in der Risikoforschung vor allem Marktänderungen mit branchenweiten Auswirkungen (etwa schwankende Rohstoffpreise) betrach-

tet. Die Finanzkrise der Jahre 2008/2009 hat ebenfalls zu einer Erweiterung der diskutierten Risiken geführt. Es zeigt sich, dass der Fokus der Arbeiten vornehmlich auf Risiken mit einem hohem Schadensausmaß (und in der Regel geringer Eintrittswahrscheinlichkeit) liegt. Die Lösungsansätze sind dabei häufig konzeptionell und zielen auf die Gefährdungsbeurteilung oder die strategische Ausrichtung des Supply Chain Managements zur Risikovorbeugung ab.

Risikogruppe	Einzelrisiken	Literatur
Gesamtunternehmen	IT-Ausfall (inkl. Cyber-Attacke)	Miroglio 2014, Baghalian et al. 2013, Chen und Wu 2013, Sun et al. 2012, Schmitt 2011, Oke und Gopalakrishnan 2009
Beschaffung	Lieferengpass (Menge/Qualität) Mangelnde Risikotransparenz Kosten-/Leistungs-änderung	
Kunde	Nachfrageschwankung Prognosefehler der Nachfrage Zahlungsausfall	
Produktion	Qualitätsprobleme Maschinenausfall Unfall/Personenschaden	

Tabelle 2.2: Risiken auf Seiten der Hersteller und Lieferanten in Supply Chains

In Tabelle 2.2 sind häufig diskutierte *Risiken auf Seiten der Hersteller und Lieferanten* in einem logistischen Netzwerk und eine Literaturliste zu diesem Themenkomplex skizziert. Beide Akteure werden an dieser Stelle gemeinsam betrachtet, da ein Unternehmen in der Supply Chain jede dieser Rollen einnehmen kann. Das Thema mangelnder Transparenz in Supply Chains ist seit Beginn der 2010-er Jahre zunehmend Gegenstand der Betrachtung und wurde inzwischen durch etliche Beratungs- und Softwareunternehmen als Anlass zur Entwicklung eigener Ansätze genutzt. Hier sind vor allem die Konzepte der *Supply Chain Control Tower* zu nennen, die eine durchgehende Risikobewertung und -kontrolle versprechen. Empirische Studien zur Wirksamkeit oder eine Übersicht von Best-Practice-Lösungen oder gar Branchenstandards fehlen allerdings. Durch die Vernetzung der Unter-

nehmen mit dem Internet rücken zunehmend Risiken durch IT-Ausfälle und Cyber-Attacken in den Fokus der Risikoforschung. Ähnlich wie bei den Naturrisiken sind diese seltenen Ereignisse allerdings schwer zu greifen und werden vornehmlich konzeptionell bei der Entwicklung von Vorsorge- und Abwehrstrategien betrachtet. Risiken durch Schwankungen der Kundennachfrage und Fehler bei der Prognose eben dieser sind hingegen Gegenstand der quantitativen Forschung und werden bei Modellen zur Auslegung von Sicherheitsbeständen berücksichtigt. Ähnliches gilt für Qualitätsprobleme und Maschinenausfälle, die sich über eine Zeitreihenanalyse quantifizieren lassen und über entsprechende Puffer Berücksichtigung bei der Planung finden. Unfälle und das zu Schaden kommen von Personen sind glücklicherweise seltene Ereignisse und somit Gegenstand der Risikoanalyse und -bewertung auf der strategischen Ebene.

Risikogruppe	Einzelrisiken	Literatur
Transport	Unfall/Panne/Ausfall Stau Transportschaden	Bauer et al. 2017, Lepratti et al. 2014,
Handling	Verspätete Bereitstellung Unklare/Falsche Dokumente Fehlverladung	Vilko und Hallikas 2012, Tuncel und Alpan 2010

Tabelle 2.3: Risiken auf Seiten der Logistikdienstleister in Supply Chains

Die Betrachtung der *Risiken auf Seiten der Logistikdienstleister* erfolgt in Tabelle 2.3. Es werden in der Literatur Risiken diskutiert, die sich auf die Ausführung der physischen Logistikprozesse beziehen. Im Transport sind Störungen der Abläufe durch den Ausfall von Transportmitteln, das Auftreten von Staus oder Transportschäden Gegenstand der Betrachtung. Hier zielen aktuelle Konzepte darauf ab, durch eine engmaschigere Identifikation und Kontrolle der Sendungen schneller auf Zeit-, Mengen- oder Qualitätsabweichungen reagieren zu können. Es kommen dazu Smartphone-Apps oder vernetzte Ladungsträger mit Sensoren zum Einsatz. Beim Handling von Sendungen spielen

Verzögerungen in der Bereitstellung oder Fehler bei der Verladung eine Rolle der Untersuchungen. Zeitverzögerungen durch unklare Dokumente oder Medienbrüche gewinnen im Zuge der digitalen Transformation ebenfalls zunehmend an Bedeutung.

Insgesamt ist die Risikoforschung auf dem Gebiet der physischen Logistikprozesse wenig ausgeprägt. Die Einzelrisiken gehen in der Regel als eines von vielen Teilaspekten in übergeordnete Risikomanagementkonzepte auf der strategischen Ebene ein. Es fehlt an empirischer Forschung zur Tragweite der Prozessabweichungen, deren Wirkzusammenhänge in zusammenhängenden logistischen Netzwerken und zur Wirksamkeit von Lösungsansätzen und Einzelmaßnahmen. Im sechsten Kapitel leistet diese Arbeit dazu einen Beitrag.

### **2.3 Systemzustandsbewertung in logistischen Netzwerken**

Für nachvollziehbare Aussagen zur Zielerreichung einer Supply Chain sind die Definition von Zielen sowie die Bewertung eines Geflechts aus unternehmensübergreifenden Kennzahlen erforderlich. Dabei wird zunächst das übergeordnete Ziel, nämlich in der Regel die Wettbewerbsfähigkeit der Supply Chain, in strategische Ziele (vgl. Abb. 2.8) übersetzt (Arndt 2015). Diese werden mit dem Wunsch nach einem Gesamtoptimum gleichzeitig angestrebt, stehen jedoch in komplementärer, konkurrierender oder indifferenter Relation zueinander (Koch 2012). So können Planungsentscheidungen, die primär auf eine Kostensenkung abzielen, eine Verschlechterung der Ausführungsqualität oder der Durchlaufzeit nach sich ziehen, was wiederum in der Folge zu höheren Gesamtkosten führt (Werner 2013).

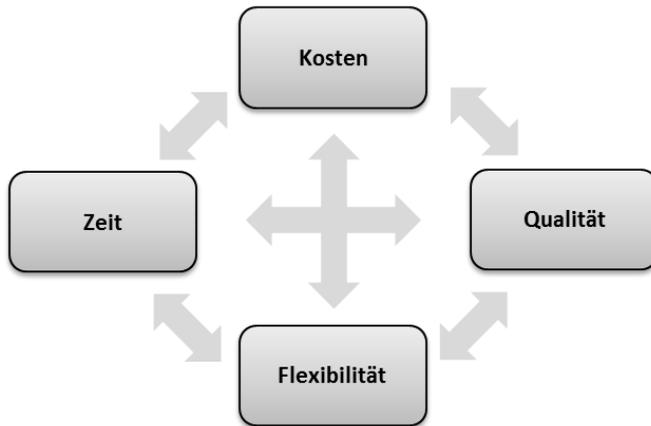


Abbildung 2.8: Strategisches Viereck der Determinanten in der Prozessperspektive (in Anlehnung an Werner 2013)

Um die voran genannten strategischen Ziele umsetzbar und in ihrer Umsetzung nachvollziehbar zu machen, erfolgt die Auflösung in geeignete Unterziele eines Kennzahlensystems. Die einschlägige Literatur gibt einen Überblick über die Auswahl und die Verwendung von Kennzahlen in der Logistik. Die VDI-Richtlinien der Reihe 4400 schlagen Logistikkennzahlensysteme für die Beschaffung, die Produktion sowie die Distribution vor und erklären deren Einbindung in die Prozesslandschaft (vgl. VDI 4400 Blätter 1-3). Schmidt und Schneider (2008) führen in Kennzahlen und Kennlinien als Steuerungsinstrumente des Materialflusses ein. Dabei klassifizieren sie die Kennzahlen nach ihren mathematisch-statischen Eigenschaften (absolut oder relativ), gehen auf die Hierarchie von Kennzahlensystemen ein und erläutern die thematische Unterscheidung in *Kostenkennzahlen*, *Leistungskennzahlen* und *Servicekennzahlen*. Mit starkem Bezug zur betriebswirtschaftlichen Sichtweise gibt Weber ebenfalls eine Einführung in Kennzahlensysteme für die Logistik und vertieft die Handhabung und Umsetzung im Unternehmen (vgl. Weber 2002 und Weber 2012). Gemein ist den vorgestellten Ansätzen, dass die Auflösung der

*Logistikeffizienz* als übergeordnetes Ziel in die Unterziele der *Logistikleistung* sowie der *Logistikkosten* erfolgt. Es gilt folgender Zusammenhang:

$$\text{Logistikeffizienz} = \frac{\text{Logistikleistung}}{\text{Logistikkosten}} \quad (2.6)$$

Die Logistikleistung unterteilt sich in die Teilaspekte der Produktivität und der Qualität. Dabei gilt es, die Verfügbarkeit und den Lieferservice zu maximieren und die Durchlaufzeit der Aufträge zeitgleich zu minimieren. Der Teilaspekt der Wirtschaftlichkeit spiegelt die Verwendung von Kapazitäten (Mitarbeiter und technische Betriebseinrichtungen) und Beständen (Lager- und Prozessbestand) wider, die zu einer zielgemäßen Durchführung der Prozesse vorgehalten werden müssen (vgl. Abb. 2.9).

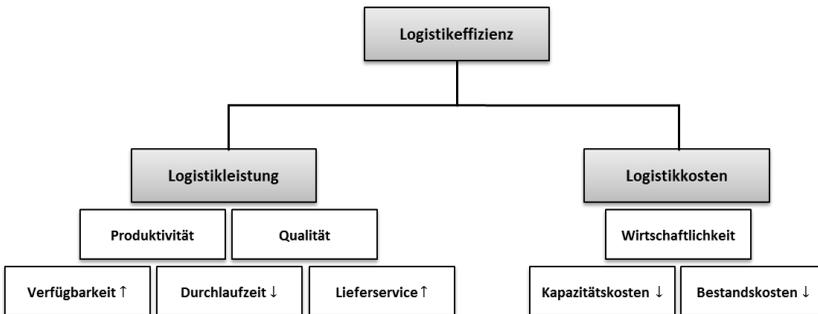


Abbildung 2.9: Ziele der Logistik (in Anlehnung an VDI 4400 Blätter 1-3)

Hierarchisch unterhalb der vorgestellten Ober- und Unterziele erfolgt die Darstellung direkter oder indirekter Kennzahlen. Diese können für unternehmensinterne Überwachungs-, Planungs- und Steuerungsaufgaben genutzt, aber auch für unternehmensübergreifende Vergleiche herangezogen werden. Relevante Kostenkennzahlen für die Arbeit sind Transportkosten, Handlingkosten (für die Bereitstellung und den Umschlag von Sendungen),

Bestandskosten sowie weitere Systemkosten (etwa für IT-Infrastruktur und Transaktionen). Die eingesetzten Verfahren zur Planung und Steuerung logistischer Netzwerke lassen sich ebenfalls hinsichtlich der Kosten bewerten. Folgende *Leistungs- und Servicekennzahlen* bilden im Kontext dieser Arbeit die Leistung logistischer Netzwerke ab:

- Der *Nutzungsgrad der Transportmittel* gibt an, in welchem Verhältnis die tatsächliche Nutzung der Kapazitäten zur theoretisch möglichen steht. Dabei kann sich die Kennzahl unabhängig von der Ladung auf die Verwendung der Transportmittel beziehen (eingesetzte zu nicht eingesetzten Transportmittel) oder die Ladekapazität der eingesetzten Transportmittel betrachten (genutzte zu nicht genutzter Ladekapazität). Letztere Kennzahl ist auch als *Auslastung* bekannt. Diese kann wegstreckenabhängig oder in vereinfachter Weise mit Blick auf die maximale Zuladung einer Tour erhoben werden. Je nach Anwendungsfall können Massen, Volumen oder eine Kombination aus beidem betrachtet werden (Domschke und Scholl 2010).
- Für die logistischen Ressourcen (Mitarbeiter und technische Betriebs-einrichtungen) der übrigen Teilprozesse in einem logistischen Netzwerk lässt sich der Nutzungsgrad ebenso erheben. Dabei kann die Betrachtung nach voran beschriebenem Schema auf die Auslastung als relative Größe abzielen oder es wird die *Anzahl fertiggestellter Aufträge je Zeiteinheit* als absolute Größe ermittelt. Bei der Quantifizierung der Produktivität von Mitarbeitern oder Maschinen ist dieser Ansatz üblich (etwa über die Angabe einer stündlichen Ausbringungsmenge) (Pfohl 2016).
- Auf der Auftragsebene lässt sich die *durchschnittliche Durchlaufzeit* für den Gesamtprozess und einzelne Teilabschnitte erheben. Die *durchschnittliche Transportzeit* je Auftrag spiegelt wider, wie viel Zeit zwischen der Sendungsübernahme und der Sendungsübergabe im Schnitt verstreicht. Darüber hinaus können explizit erhobene *durchschnittliche Störungs- und Wartezeiten* eine Prozessverbesserung initiieren. Es

wird deutlich, dass diese Form der Betrachtung einen hohen Standardisierungsgrad der Prozesse und deren Abfolge erfordert (Bolstorff et al. 2007).

- Die *Liefertreue* drückt die Wahrscheinlichkeit aus, mit der Sendungen den gewünschten Anforderungen entsprechen. Dabei sind mehrere Aspekte relevant. Die *Liefertermintreue* stellt den Bezug zu zuvor definierten Lieferterminen her. Die *Lieferqualität* drückt aus, inwieweit Sendungen hinsichtlich Menge und Beschaffenheit dem ursprünglichen Empfängerwunsch entsprechen. Die Termintreue ist zentrales Element vieler Modelle der Logistik und besitzt hohe praktische Relevanz (vgl. Nyhuis und Wiendahl 1999, Lödging 2016). Es ist jedoch zu beachten, dass die Betrachtung fixer Liefertermine bei einer zunehmend dynamischen Planung und Steuerung zu einem Verlust der Aussagekraft führt und die Liefertermintreue daher zur Bewertung mit weiteren Kennzahlen kombiniert werden sollte.
- Falls es nach Auftragerstellung noch zu räumlichen, zeitlichen oder mengenmäßigen Änderungen kommt, drückt die *Lieferflexibilität* die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Anpassung an die neuen Gegebenheiten vor (Schuh und Stich 2013).
- Über *Servicegrade* kann die Lieferfähigkeit aus dem Bestand quantifiziert werden. Der  $\alpha$ -*Servicegrad* gibt als ereignisorientierte Kennzahl die Wahrscheinlichkeit an, mit der die Nachfragemenge in einem Zeitintervall aus dem physischen Bestand zu Beginn des Zeitintervalls gedeckt werden kann. Über den mengenorientierten  $\beta$ -*Servicegrad* wird der Erwartungswert der Fehlmenge pro Periode in Bezug zur erwarteten Periodennachfragemenge gesetzt. Der  $\gamma$ -*Servicegrad* ist mengen- und zeitorientiert und setzt den Erwartungswert des Fehlbestands pro Periode in Bezug zur erwarteten Periodennachfragemenge (Tempelmeier 2015). Eine Erläuterung der unterschiedlichen Bestandsarten und des Einsatzes der Servicegrade bei der Auslegung von Lagerhaltungspolitiken erfolgt im dritten Kapitel dieser Arbeit.

*Balanced Scorecards* dienen der Berücksichtigung mehrerer Zieldimensionen über Abteilungs- und Unternehmensgrenzen hinweg. Nach Werner erfolgt die Optimierung der Supply Chain auf der Grundlage einer zentralen Vision und abgeleiteten Strategie unter Berücksichtigung verschiedener Perspektiven. So bündelt die *Finanzperspektive* die monetär geprägten Indikatoren. Das Ziel ist die Steigerung des Erfolgs (als Ergebnis der Gewinn- und Verlustrechnung) sowie der Rentabilität, die Sicherung der Finanzströme, die Wertsteigerung, die Reduzierung der Kapitalbindung (etwa in Form von Beständen) sowie die Reduzierung von direkten Kosten. Die *Kundenperspektive* beschreibt Kennzahlen, die auf Kundenzufriedenheit und -treue, Kundenakquisition und Auftragsabwicklung abzielen. Die Effizienz der internen Prozesse wird über die *Prozessperspektive* abgebildet. Die Wandlungsfähigkeit des Produktportfolios zeigen schließlich die Kennzahlen der *Innovationsperspektive* an (Werner 2013). Die Abbildung 2.10 zeigt den grundsätzlichen Aufbau und die Dimensionen einer Balanced Scorecard.

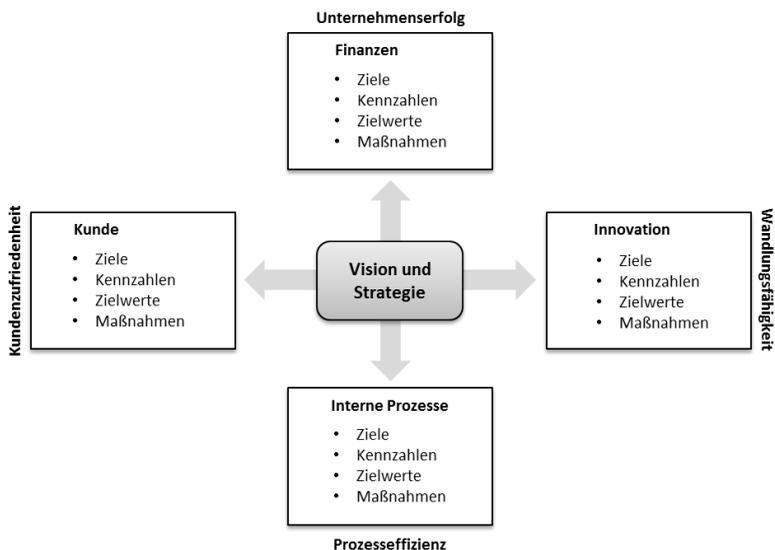


Abbildung 2.10: Der grundsätzliche Aufbau einer Balanced Scorecard (in Anlehnung an Werner 2013)



## **3 Planung und Steuerung in logistischen Netzwerken**

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die für die Untersuchung relevanten Konzepte und Methoden zur Planung und Steuerung logistischer Netzwerke. Es wird in Kapitel 3.1 zunächst die Sicht eines produzierenden Unternehmens mit dessen Beschaffungsprozessen eingenommen und im weiteren Verlauf um die Planungs- und Steuerungsthemen der weiteren beteiligten Akteure (Lieferanten und Logistikdienstleister) erweitert. Das Kapitel 3.2 vertieft die Ansätze des Supply Chain Management zum Umgang mit Volatilität, unterteilt nach der in der Literatur oftmals vorzufindenden proaktiven und reaktiven Ausrichtung der Konzepte. Im Anschluss wird auf der Grundlage des Stands von Wissenschaft und Technik der resultierende Forschungsbedarf abgeleitet.

### **3.1 Planungs- und Steuerungsaufgaben im Supply Chain Management**

Entlang des Güterflusses einer Supply Chain ergeben sich für die beteiligten Akteure Planungs- und Steuerungsaufgaben, die sich sowohl in zeitlicher als auch in thematischer Hinsicht klassifizieren lassen (vgl. Abb. 3.1).

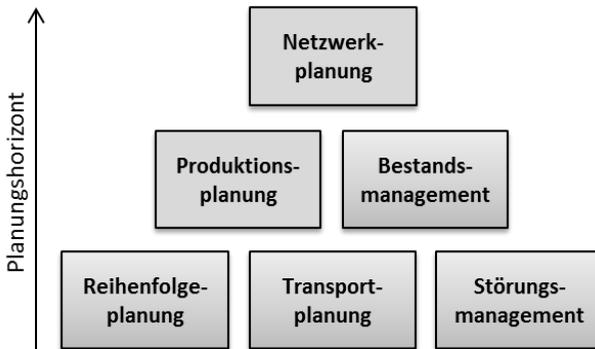


Abbildung 3.1: Ausgewählte Planungs- und Steuerungsaufgaben in der Supply Chain

Die logistische Planung beginnt zunächst auf der strategischen Ebene mit der langfristigen Gestaltung des Netzwerks. Es werden in dieser Phase aus logistischer Sicht Produkt- und Beschaffungsstrategien festgelegt, Standortentscheidungen getroffen, Kapazitäten geplant und nicht zuletzt Zielvorgaben für die weiteren Planungsphasen definiert. Die strategische Ebene umfasst einen Planungshorizont bis zu mehreren Jahren (Fleischmann und Koberstein 2015). Auf der taktischen Ebene werden die strategischen Vorgaben in einen Handlungsrahmen mit einem Planungshorizont von mehreren Wochen bis zu einigen Monaten umgesetzt. Es werden Prognosen über den Bedarf erstellt, Kapazitäten für bestimmte Zeiträume vorgehalten sowie aggregierte Produktionsprogramme geplant und der resultierende Materialbedarf abgeschätzt (MPS- und MRP-Planung). Schließlich werden auf der operativen Ebene, mit einem Planungshorizont von einigen Tagen bis hin zu einigen Wochen, die Vorgaben der vorangegangenen Planungsstufen in operationalisierbare Ablaufpläne überführt. Dazu werden Aufträge freigegeben, die Abarbeitungsreihenfolge bestimmt und Bestellungen aufgegeben. Darüber hinaus werden Transporte und weitere physische Logistikprozesse geplant. Ebenso wird auf der operativen Ebene auf unvorhergesehene Ereignisse reagiert, indem alternative Ablaufvarianten gesucht werden, die nach wie vor den

Zielvorgaben der vorgelagerten Planungsstufen entsprechen (Fleischmann et al. 2015).

### 3.1.1 Bestandsmanagement

Die Entscheidung über Höhe und Positionierung von Beständen hat erheblichen Einfluss auf die Stabilität und die Kosteneffizienz eines logistischen Netzwerks. So dienen Sicherheitsbestände als Puffer, um zeitliche und mengenmäßige Unsicherheiten bei Materialzugang und Materialnachfrage auszugleichen. Werden diese Puffer zu gering dimensioniert, kommt es in der Folge zu Störungen im Wertschöpfungsprozess. Bei einer Überdimensionierung von Beständen fallen im Gegenzug vermeidbare Kosten an, die Effizienz der Lagerhaltung verschlechtert sich (Wensing 2011). Im Rahmen des Bestandsmanagements werden daher Bestände in einem logistischen Netzwerk gezielt dimensioniert und positioniert.

Der Begriff des Bestands ist zunächst einmal ein Überbegriff und bedarf der weiteren Differenzierung in verschiedene Bestandsarten und Mengengrößen bei Fehlmengenergebnissen. Tempelmeier (2015) nimmt dazu folgende Einteilung vor:

- Der *physische Bestand* gibt den tatsächlich vorhandenen Bestand in einem Lager an.
- Ist der physische Bestand Null und kommt es zu einer weiteren Nachfrage, so tritt ein *Fehlmengenergebnis* ein.
- Die *Fehlmenge* ist in diesem Zusammenhang die Nachfragemenge, die nicht sofort, sondern erst nach einer verfügbarkeitsbedingten Wartezeit gedeckt werden kann. Je nach Bereitschaft des Kunden kommt es entweder zu einem Auftragsverlust oder einer Erhöhung des Fehlbestands.

- Der *Fehlbestand* ist die kumulierte Nachfragemenge, die am Ende einer Periode nicht ausgeliefert werden konnte und daher als Rückstand vorgemerkt worden ist.
- Der physische Bestand abzüglich des Fehlbestands ergibt den *Nettobestand*. Sofern keine Rückstände vorliegen, entspricht dieser dem physischen Bestand. Bei einem leeren Lager und einem aufgelaufenen Fehlbestand nimmt der Nettobestand negative Werte an.
- Die Summe der aufgegebenen Bestellungen, die noch nicht im Lager eingetroffen sind, ergibt den *Bestellbestand*.
- Der *disponible Bestand* setzt sich zusammen aus der Summe des Nettobestands und des Bestellbestands. Die Auslösung der Bestellung bei Bestellpunktverfahren erfolgt auf der Grundlage dieser Bestandsart.

Darüber hinaus sind weitere Begriffe aus dem Bestandsmanagement für diese Arbeit relevant:

- Beim *Sicherheitsbestand* spricht man von der Menge im Lager, die zum Schutz vor Unsicherheiten bei Nachfrage und Nachschub im Risikozeitraum zusätzlich zur prognostizierten durchschnittlichen Nachfrage vorgehalten wird (Schönsleben 2016).
- Der *Risikozeitraum* setzt sich zusammen aus dem *Überwachungsintervall*, also dem Zeitraum zwischen den möglichen Bestellvorgängen, sowie der *Wiederbeschaffungszeit*, dem Zeitraum zwischen dem Auslösen der Bestellung und dem Eintreffen der Ware im Lager (Tempelmeier 2015).
- Die *Bestandsreichweite* errechnet sich aus dem aktuellen physischen Bestand dividiert durch die durchschnittliche Nachfrage. Diese Kennzahl wird in der Praxis häufig stichtagsbezogen erhoben und für unternehmensübergreifende Vergleiche herangezogen. Niedrigere Werte

suggestieren zwar eine leistungsfähigere Logistik, es ist jedoch eine kritische Bewertung im Einzelfall durchzuführen (Tempelmeier 2015).

Sofern kein deterministischer Planungsfall vorliegt, bei dem exakt planbaren Nachfragen aus dem Lager eine synchrone und fehlerfreie Wiederbeschaffung gegenübergestellt werden kann, liefern *stochastische Lagerhaltungspolitiken* Entscheidungsregeln für das Auslösen von Bestellungen. Dabei lassen sich diese Politiken nach den Regeln zur Bestimmung des Bestellzeitpunkts sowie der Bestellmenge unterscheiden (Axsäter 2015). Sofern die Bestellungen einem zeitlichen Intervall  $r$  folgen, ist von *Bestellrhythmuspolitiken* die Rede. Bei der Auslösung der Bestellungen durch das Absinken des disponiblen Bestands auf oder unter einen Bestellpunkt  $s$ , erfolgt die Zuordnung zu den *Bestellpunktpolitiken*. Tabelle 3.1 stellt die vier Lagerhaltungspolitiken gegenüber, die sich eindeutig hinsichtlich Bestellzeitraum und Bestellmenge kategorisieren lassen. Darüber hinaus gibt es Mischformen. So kombiniert etwa die  $(r,s,S)$ -Politik eine Lagerüberwachung in konstanten Zeitabständen mit der Überwachung eines unteren Bestellpunkts und einer variablen Bestellmenge eines oberen Bestandsniveaus.

<b>Politik</b>	<b>Bestellzeitraum</b>	<b>Bestellmenge</b>	<b>Entscheidungsregel</b>
(s,S)-Politik	variabel	variabel	Sinkt der disponible Bestand auf s, löse eine Bestellung aus, die den disponiblen Bestand auf das Niveau S anhebt.
(s,q)-Politik	variabel	konstant	Sinkt der disponible Bestand auf s, löse eine Bestellung in Höhe von q aus.
(r,S)-Politik	konstant	variabel	Löse alle r Perioden eine Bestellung aus, die den disponiblen Bestand auf das Niveau S anhebt.
(r,q)-Politik	konstant	konstant	Löse alle r Perioden eine Bestellung in Höhe von q aus.

Tabelle 3.1: Merkmale zur Klassifikation stochastischer Lagerhaltungspolitiken

Die Wahl einer geeigneten Lagerhaltungspolitik hängt von den konkreten Anforderungen des Anwendungsfalls ab. Während die (r,q)-Politik aufgrund der konstanten Bestellzeiträume und -mengen nahezu keine praktische Relevanz besitzt, können die übrigen Politiken alternativ eingesetzt werden (Robrade 1991). Bei der Gegenüberstellung der Politiken bieten sich die Bestellhäufigkeit, der durchschnittliche Lagerbestand, der Risikozeitraum, resultierende Transport- und Packungsgrößen sowie der Planungsaufwand als Vergleichsgrößen an (Wensing 2011). Tempelmeier vergleicht die Lagerhaltungspolitiken für eine normalverteilte Nachfrage und zeigt, dass die (s,S)-Politik die kostengünstigste Variante hinsichtlich der Lager- und Bestellkosten ist, da sie die übrigen Politiken als Grenzfall einschließt. Sollen im Transportbereich zeitliche Synergieeffekte ausgenutzt werden, führt die (r,S)-Politik zu einer besseren Koordination der Bestellungen. Allerdings führt dieses Vorgehen durch die längere Reaktionszeit gegenüber einer (s,q)-Politik zu einer größeren Streuung der Lieferzeitverteilung (Tempelmeier 2015).

Im Rahmen der Arbeit kommt eine Variante der in der Praxis häufig angewendeten (s,q)-Politik zum Einsatz. Diese Politik trägt durch die konstante Bestellmenge organisatorischen und technischen Vorgaben Rechnung, in dem etwa Mengenrabatte bei den Lieferanten realisiert oder Transportkapazitäten planbar ausgeschöpft werden können. Es wird im Rahmen der Untersuchungen eine gammaverteilte Nachfrage aus dem Lager unterstellt, so dass im Folgenden die Auslegung der Bestellparameter für diesen Anwendungsfall erläutert wird. Dabei stützen sich die Nomenklatur und die Vorgehensweise auf Tempelmeier (2015).

Mit Hilfe der Gammaverteilung lassen sich Nachfrageverteilungen unterschiedlicher Struktur flexibel abbilden. Dabei setzt sich die Periodennachfrage  $D$  zusammen aus einem Skalenparameter  $\alpha_D$  sowie dem Formparameter  $k_D$ . Unterstellt man eine konstante Wiederbeschaffungszeit (WBZ) von  $l$ , so ergibt sich über die WBZ ebenfalls eine gammaverteilte Nachfrage mit den Parametern:

$$\alpha_Y = \alpha_D \quad (3.1)$$

$$k_Y = k_D * l \quad (3.2)$$

Mit der Momentenmethode (vgl. Hartung 2009) lassen sich beide Parameter aus empirischen Daten über den Erwartungswert  $E\{Y\}$  und die Varianz  $Var\{Y\}$  wie folgt schätzen:

$$k_Y = \frac{E\{Y\}^2}{Var\{Y\}} \quad (3.3)$$

$$\alpha_Y = \frac{E\{Y\}}{Var\{Y\}} \quad (3.4)$$

Da bei gegebener Servicegradrestriktion die Bestellmenge ebenso einen Einfluss auf den Bestellpunkt hat wie umgekehrt auch der Bestellpunkt die Bestellmenge beeinflusst, müssten beide Größen simultan bestimmt werden, um das Kostenminimum zu erreichen. Weil die Lagerkostenfunktion im

Bereich der optimalen Bestellmenge allerdings sehr flach verläuft, haben Abweichungen von der optimalen Bestellmenge nur einen geringen Einfluss auf die Gesamtkosten. Es wird daher im Folgenden auf die üblichere Vorgehensweise einer sequentiellen Bestimmung der Bestellparameter eingegangen.

Im ersten Schritt wird die Bestellmenge  $q_{opt}$  mithilfe einer Losgrößenformel bestimmt. Ein verbreiteter Ansatz ist dabei die *Economic Order Quantity (EOQ)* nach Harris bzw. Andler (Harris 1913; Andler 1929). Unter Berücksichtigung von bestellfixen Kosten  $c_b$ , eines Lagerkostensatzes  $h$  und dem Erwartungswert der Nachfrage  $E\{D\}$  ergibt sich durch Ableitung und Nullsetzung der Kostenfunktion:

$$q_{opt} = \sqrt{\frac{2 * c_b * E\{D\}}{h}} \quad (3.5)$$

Im Anschluss wird der Bestellpunkt gesucht, der bei zuvor ermittelter Bestellmenge und angestrebtem  $\beta$ -Servicegrad eine gerade noch tolerierte Fehlmenge erwarten lässt. Die Fehlmenge setzt sich dabei aus dem Fehlbestand am Periodenanfang  $I_{Anf}^f$  und -ende  $I_{End}^f$  zusammen, so dass folgende Bedingung bei der Suche nach dem optimalen Bestellpunkt gilt:

$$(1 - \beta) * q_{opt} \geq E\{I_{End}^f(s)\} - E\{I_{Anf}^f(s)\} \quad (3.6)$$

Unter Berücksichtigung der *incomplete gamma function* ergibt sich:

$$E\{I_{End}^f(s)\} = \frac{k}{\alpha} - s - \frac{k}{\alpha} * I[k + 1, s * \alpha] + s * I[k, s * \alpha] \quad (3.7)$$

$$E\{I_{Anf}^f(s)\} = \frac{k}{\alpha} - (s + q) - \frac{k}{\alpha} * I[k + 1, (s + q) * \alpha] + (s + q) * I[k, (s + q) * \alpha] \quad (3.8)$$

Sofern nur Aufträge mit der Losgröße=1 eintreffen und eine kontinuierliche Lagerüberwachung und Bestellauslösung sichergestellt werden kann, erfolgt die Ermittlung des Bestellpunkts auf Grundlage eingangs beschriebener

Nachfrage in der Wiederbeschaffungszeit (vgl. Formeln 3.3 und 3.4). Bei einer realitätsnäheren Betrachtung werden Bestellungen jedoch meist periodisch (täglich) ausgelöst, wobei der Bestellpunkt dabei möglicherweise bereits unterschritten wurde. Bleibt dieses Defizit  $U$  zu Beginn der Wiederbeschaffungszeit bei der Auslegung der Parameter unberücksichtigt, führt dies zu einer Nichterfüllung des angestrebten Servicegrads (Tempelmeier und Fischer 2010). Sofern keine Korrelation zwischen dem Defizit und der Periodennachfrage besteht, gilt für den Erwartungswert des Defizits:

$$E\{U\} = \frac{E\{D\}^2 + Var\{D\}}{2 * E\{D\}} \quad (3.9)$$

Die Varianz des Defizits lässt sich über das dritte zentrale Moment  $\mu_3$  der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Periodennachfragemenge ermitteln. Es gilt somit:

$$\mu_3 = \frac{2 * k_D}{\alpha_D^3} \quad (3.10)$$

$$Var\{U\} = \frac{k_D^2 + 6 * k_D + 5}{12 * \alpha_D^2} \quad (3.11)$$

Für den Erwartungswert und die Varianz der Nachfragemenge in der Wiederbeschaffungszeit unter Berücksichtigung des Defizits ergibt sich:

$$E\{Y^*\} = E\{Y\} + E\{U\} \quad (3.12)$$

$$Var\{Y^*\} = Var\{Y\} + Var\{U\} \quad (3.13)$$

Die Ermittlung des optimalen Bestellpunkts  $s_{opt}$  erfolgt schließlich durch das Absuchen der Fehlmengenfunktion  $E\{F(s)\}$ . Der Bestellpunkt liegt somit bei:

$$s_{opt} = \min[s | E\{I_{End}^f(s)\} - E\{I_{Anf}^f(s)\} \leq (1 - \beta) * q_{opt}] \quad (3.14)$$

Auf der Grundlage der Parameter  $q_{opt}$  und  $s_{opt}$  kann schließlich die Lagerhaltungspolitik gemäß Entscheidungsregel (vgl. Tabelle 3.1) eingesetzt werden.

### 3.1.2 Reihenfolgeplanung

In einem logistischen Netzwerk erfolgt an verschiedenen Stellen eine Planung der Reihenfolge von Aufträgen oder einzelnen Arbeitsgängen. Gegenstand dieser Problemklasse ist es, eine zeitliche Zuordnung von Aufträgen zu den gegebenen Ressourcen vorzunehmen, so dass eine möglichst kostenoptimale Ablaufvariante unter Einhaltung der Restriktionen erzielt wird. Es entstehen dabei Zielkonflikte (etwa Minimierung der Durchlaufzeit vs. Maximierung der Kapazitätsauslastung), die durch eine geeignete Zieldefinition aufgelöst werden müssen. Im Produktionsumfeld bilden in der kombinatorischen Optimierung *Maschinenbelegungsprobleme* (engl. *scheduling problems*) die Klasse der Modelle und Lösungsverfahren zur Zuordnung von Aufträgen zu Arbeitsträgern (Domschke et al. 1997). Als Klassifizierungssystem hat sich für deterministische Maschinenbelegungsprobleme ein Schema etabliert, das auf die Maschinencharakteristik  $\alpha$ , die Auftragscharakteristik  $\beta$  sowie die Zielsetzung  $\gamma$  eingeht. Die Merkmale eines Problems lassen sich als Tripel in der Form  $[\alpha|\beta|\gamma]$  darstellen (Muth und Thompson (1963), Graham et al. (1979)). Die folgende Tabelle zeigt eine Auswahl gängiger Merkmalsausprägungen für Maschinenbelegungsprobleme.

<b>Merkmal</b>	<b>Bedeutung</b>
$\alpha_1 = F$	Flow-Shop-Problem (zur Abbildung einer Fließfertigung)
$\alpha_1 = J$	Job-Shop-Problem (zur Abbildung einer Werkstattfertigung)
$\alpha_2 = m$	Gegebene Anzahl verfügbarer Maschinen/ benötigter Arbeitsgänge
$\beta_1 = n$	Gegebene Anzahl der zu bearbeitenden Aufträge
$\beta_2 = \text{pmtn}$	Möglichkeit der Unterbrechung von Aufträgen
$\beta_3 = \text{prec}$	Gegebene Reihenfolgebeziehungen zwischen den Aufträgen
$\beta_4 = a_j$	Gegebene Freigabetermine (Vorlaufzeiten) je Auftrag
$\beta_5 = t_j$	Gegebene Bearbeitungszeiten je Auftrag
$\beta_6 = r_{jk}^i$	Gegebene Rüstzeiten je Reihenfolge- und Maschinenkombination
$\beta_7 = \circ$	Unbeschränkte Rohstoffe, Hilfsmittel oder Arbeitskräfte
$\beta_8 = \bar{f}_j$	Gegebene Fertigstellungstermine je Auftrag
$\beta_9 = g_j$	Gegebene Arbeitsganganzahlen je Auftrag
$\beta_{10} = k_i$	Gegebene Lagerkapazitäten je Maschine
$\gamma = Z$	Minimierung der Zykluszeit
$\gamma = T_{max}$	Minimierung der maximalen Terminabweichung

Tabelle 3.2: Merkmale zur Klassifikation von Maschinenbelegungsproblemen (Auswahl)

Im Kontext logistischer Netzwerke ist insbesondere das Flow-Shop-Problem von Relevanz, da dies eine Abbildung der Prozesse bei den Lieferanten und Logistikdienstleistern ermöglicht. Es können logistische Aufgaben wie die Kommissionierung, die Konsolidierung oder die Wareneingangs- und Warenausgangsbearbeitung als Arbeitsstationen eines Maschinenbelegungsproblems aufgefasst werden. Da die Reihenfolge der Prozessschritte dabei in der Regel vorgegeben ist, sind die Merkmale einer Fließfertigung erfüllt. Die Beschreibung der Auftragscharakteristik und der Zielsetzung lassen sich

ebenfalls für den logistischen Anwendungsfall mit der vorgestellten Klassifikationsmethode vornehmen.

Bei der Lösung solcher Probleme gilt es zu beachten, dass diese in der Regel NP-schwer sind. Dies macht eine realitätsnahe Modellierung und optimale Lösung für umfangreiche Fragestellungen und Datensätze meist unrealistisch. Für den einfachen Fall eines Flow-Shop-Problems mit zwei Maschinen und Zykluszeitminimierung ohne weitere Einschränkungen  $[F2|Z]$  und mit fester Maschinenfolge bietet der Johnson-Algorithmus eine exakte Lösung des Problems an. Die Komplexität des Problems ist dabei mit  $O(n \log n)$  angegeben (Domschke et al. 1997). Der Algorithmus geht in zwei Schritten vor. Zunächst werden die Aufträge in zwei disjunkte Teilmengen unterteilt, wobei eine Gruppe  $A_1$  die Aufträge mit kürzeren Bearbeitungszeiten auf der ersten als auf der zweiten Maschine enthält und die andere Gruppe  $A_2$  die übrigen Aufträge umfasst. Anschließend werden die Aufträge aus  $A_1$  auf der ersten Maschine nach monoton zunehmenden Bearbeitungszeiten eingeplant. Die Sortierung der Gruppe  $A_2$  auf der zweiten Maschine erfolgt im Gegensatz dazu nach monoton abnehmenden Bearbeitungszeiten (Johnson 1954). Die Abbildung 3.2 zeigt exemplarisch einen resultierenden Plan für fünf Aufträge.

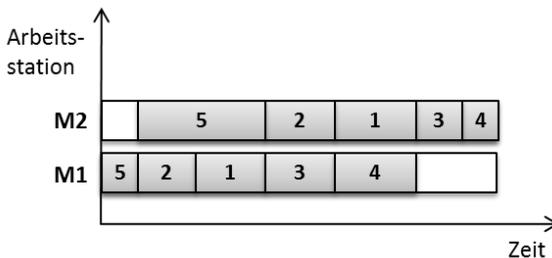


Abbildung 3.2: Gantt-Diagramm der Auftragsfolge aus Maschinensicht

In der betrieblichen Praxis haben sich zur Reihenfolgeplanung einfache Lösungsverfahren etabliert, die bei der Suche nach möglichst günstigen

Ablaufvarianten unter Einhaltung der gegebenen Restriktionen unterstützen. Es sind Prioritätsregelverfahren zu nennen, die durch eine Sortierung der Aufträge nach einem zuvor definierten Schema zu einer Reihenfolgeplanung für die einzelnen Maschinen führen. Diese heuristischen Verfahren dienen einer Feinterminierung im kurzfristigen Zeithorizont oder erzeugen eine erste Lösung als Grundlage für weitergehende Verbesserungsverfahren (Domschke et al. 1997). Es kann mithilfe von Prioritätsregeln auf die Liefertreue, den Servicegrad oder die Leistung eines Systems Einfluss genommen werden. Eine Kombination mehrerer Regeln ist ebenso denkbar, um eine Erfüllung von Mehrfachzielen anzustreben oder Zielkonflikte teilweise aufzulösen (Lödding 2016). Im Folgenden werden relevante Entscheidungsregeln mit Logistikbezug vorgestellt und diskutiert.

- FIFO (*First-In-First-Out*), auch FCFS (*First-Come-First-Serve*) genannt: Eine erste naheliegende Prioritätsregel ist es, die Aufträge in der Reihenfolge ihrer Ankunft abzuarbeiten. Dabei werden Vertauschungen von Aufträgen nicht zugelassen, was in einigen Anwendungsfällen sogar durch physische oder softwareseitige Vorkehrungen sichergestellt wird (etwa durch ein Durchlaufregal oder eine entsprechende Implementierung im Warenwirtschaftssystem). Der Vorteil dieser Regel liegt in einer Reduzierung der Streuung von Durchlaufzeiten, da Aufträge weder vorgezogen noch zurückgestellt werden können. Allerdings geht damit auch das Fehlen jeglicher Flexibilität einher, etwa um dringliche Aufträge den weniger dringlichen vorzuziehen (Lödding 2016).
- SPT (*Shortest-Processing-Time*), auch KOZ (*Kürzeste Operationszeit*) genannt: Bei dieser Prioritätsregel erfolgt die Sortierung der Aufträge nach monoton wachsenden Bearbeitungszeiten. Es konnte gezeigt werden, dass diese Regel einen positiven Einfluss auf das Bestandsniveau, die mittleren Durchlaufzeiten, die mittlere Verspätung sowie die Liefertreue hat (Conway et al. 1967). Im Gegenzug führt die Regel jedoch zu einer stärkeren Streuung der Durchlaufzeiten, was die Planbarkeit für nachgelagerte Prozessschritte verschlechtert. Ebenso

können einzelne Aufträge lange im System verweilen, wenn kontinuierlich Aufträge mit kürzeren Bearbeitungszeiten eintreffen und vorgezogen werden. Es empfiehlt sich daher die Kombination mit einer Regel zur Begrenzung der Wartezeit. Die SPT-Regel wird in der Literatur differenziert betrachtet. Während die Vorzüge der Regel in weiten Teilen der Literatur geschätzt werden, heben Wiendahl, Nyhuis und Lödding die Einschränkungen hervor. Es nehme zum einen die Wirksamkeit bei niedrigem Bestandsniveau ab und zum anderen werden die positiven Effekte bei der Betrachtung der ungewichteten mittleren Durchlaufzeit (ohne Bezug zur Auftragsgröße) überschätzt (Wiendahl 1997, Nyhuis und Wiendahl 1999, Lödding 2016).

- EOOD (*Earliest-Operation-Due-Date*), auch FPE (*Frühester-Plan-Endtermin*) genannt: Im Zuge dieser Regel erfolgt die Priorisierung der Aufträge auf Grundlage der Plan-Endtermine der jeweiligen Arbeitsvorgänge. Sofern die Sortierung unter Berücksichtigung der Plan-Endtermine des gesamten Auftrags (über alle Arbeitsvorgänge) erfolgt, handelt es sich um die EDD-Regel (*Earliest-Due-Date*). Mit dieser Regel lässt sich eine recht einfache Dringlichkeitspriorisierung umsetzen, sofern die Plan-Endtermine das Ergebnis einer plausiblen Planung sind und praktisch ermittelt werden können (etwa durch Auftragsdokumente). Durch die schwer vorhersehbare Auftragsfolge führt diese Regel zu einer Streuung der Durchlaufzeiten (Lödding 2016).
- LST (*Least-Slack-Time*), auch Schlupfzeitregel genannt: Bei der Schlupfzeitregel wird der Zeitraum zwischen der voraussichtlichen Fertigstellung eines Auftrags und dem Plan-Fertigstellungstermin betrachtet. Aufträge mit einem niedrigen oder sogar negativen Schlupfwert werden priorisiert behandelt, da diese am ehesten bei weiteren Verzögerungen zu Problemen führen würden. Mit dieser Regelung ist im Vergleich zu EDD eine Dringlichkeitspriorisierung möglich, die sich am aktuellen Auftragsstatus und der Möglichkeit zukünftiger Störungen orientiert. Es ist jedoch anzumerken, dass die Schlupfzeitregelung in

ungünstigen Fällen zu einer hohen Zahl an Reihenfolgeänderungen führen kann. Neu ankommende Aufträge haben in der Regel zunächst einen großen Schlupfwert und werden durch die niedrige Priorität zurückgestellt. Erst mit zunehmender Dringlichkeit erfolgt das Vorziehen dieser Aufträge durch eine erneute Reihenfolgeänderung (Lödding 2016).

### 3.1.3 Transportplanung

Aus Sicht der Transportlogistik ist eine Lieferkette eine Aneinanderreihung von Transportverbindungen, die Lieferstellen, Zwischenstationen und Empfangsstellen miteinander verknüpft. Dabei resultiert für diese Transportverbindungen eine Dreiecksbeziehung zwischen den beteiligten Akteuren *Lieferant*, *Logistikdienstleister* und *Empfänger*. Die Transportleistung kann auf unterschiedlichen Verkehrsträgern erbracht werden (Straße, Schiene, Wasserweg oder Luft), entweder ausschließlich oder auch kombiniert in Form einer intermodalen Transportkette (Gudehus 2012b).

Bei einer Zustellfahrt sind der Lieferant und der Empfänger in einer direkten Beziehung miteinander verbunden. Man spricht auch von einer Direktbelieferung oder einer einstufigen Lieferkette. Werden mehrere Lieferstellen auf einer Tour kombiniert und schließlich in einem Umschlagpunkt gemeinsam bearbeitet so handelt es sich um eine Sammelfahrt. Werden ab dem Umschlagpunkt mehrere Empfänger auf einer Tour kombiniert, liegt eine Verteilfahrt vor. Eine Kombination von Liefer- und Empfangsstellen auf einer Tour in Form einer Verteil- und Sammelfahrt ist ebenso möglich (Gudehus 2012b). Aus Sicht des einzelnen Auftrags unterteilt sich die Lieferkette, je nach Anzahl der Umschlagpunkte, in einen Vorlauf, einen Hauptlauf sowie einen Nachlauf (vgl. Abb. 3.3).

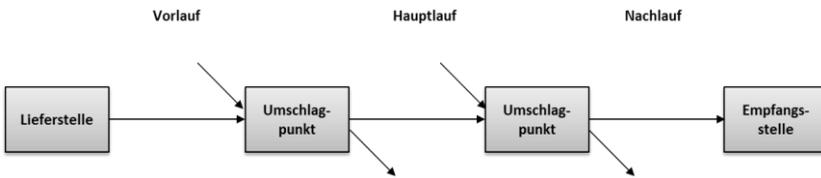


Abbildung 3.3: Das Beispiel einer dreistufigen Lieferkette

Der Güterverkehr in Deutschland ist geprägt von einer starken Konkurrenzsituation mit geringen Margen sowie einem kontinuierlich steigenden Verkehrsaufkommen. Ebenfalls steigend ist aktuell der Leerkilometeranteil (Bundesamt für Güterverkehr 2017). Die dringliche Aufgabe der Transportplanung ist es daher, die Sendungen unter einem möglichst effizienten Ressourceneinsatz von den Liefer- zu den Empfangsstellen unter Einhaltung von Zeit- und Qualitätsrestriktionen sowie rechtlichen Vorgaben (etwa Fahrzeitbeschränkungen) zu überführen. Es ergeben sich Zuordnungs- und Reihenfolgeprobleme, die sich als mathematische Optimierungsprobleme modellieren lassen. Ausgangspunkt der Überlegungen ist aufgrund der guten Nachvollziehbarkeit das Problem eines Handlungsreisenden, auch *Travelling Salesman Problem* (TSP) genannt. Dabei müssen die Wegpunkte so miteinander zu einer Route verbunden werden, dass die resultierende Wegstrecke minimal wird.

Erste mathematische Formulierungen des TSP wurden in der Mitte des 20. Jahrhunderts publiziert (Dantzig et al. 1954). Die Umsetzung von Tourenplanungsproblemen für mehrere Fahrzeuge als lineares Programm gehen zurück auf Dantzig und Ramser (1959). Die Problemklasse der *Vehicle Routing Problems* (VRP) wurde in der Folgezeit in der Literatur intensiv behandelt und fortlaufend erweitert. Einen herausragenden Beitrag lieferte etwa Solomon (1987) mit der Erweiterung um Zeitfenster und die Entwicklung von Testinstanzen für eine bessere Vergleichbarkeit von neu entwickelten Lösungsverfahren. Die Erweiterung um Teillieferungen nahmen Dror und Trudeau (1989) vor, um mehr Realitätsnähe zu schaffen und weitere Einsparpotentiale in der Planung zu heben. Auf die Kombination von Abhol- und Zustellaufträgen

innerhalb einer Tour gehen Ropke und Cordeau (2009) ein. Einen Gesamtüberblick über gängige Tourenplanungsprobleme und Methoden und Verfahren zur Lösung geben Toth und Vigo (2014) sowie Grünert und Irnich (2005a, 2005b). Die Tabelle 3.3 zeigt eine Auswahl gängiger Merkmale zur Klassifizierung von Tourenplanungsproblemen, die bei der Modellierung Berücksichtigung finden können (in Anlehnung an Gietz 2009).

<b>Merkmal</b>	<b>Ausprägung</b>
Kunden: Datenbestimmtheit	Deterministisch, stochastisch oder dynamisch
Auftragsart	Einsammeln, Ausliefern oder kombiniert
Servicebeginn	Mit oder ohne Zeitfenster
Fuhrpark: Zusammensetzung Einsatzhäufigkeit Größe	Homogen oder heterogen Einfach oder mehrfach Beschränkt oder beliebig
Touren: Art Beschränkungen	Offen oder geschlossen Tourdauer, Kapazität, Wegstrecke, Anzahl Stopps
Netzwerk: Art Fahrzeiten	Koordinaten- oder Straßennetz Konstant oder variabel
Planungshorizont: Länge Besuchsfrequenz	Ein- oder mehrperiodisch Ein- oder mehrfach
Ziele: Kosten Ersatzkriterien	Fixe und variable Kosten Auslastung, Lieferservice, Fahrstrecke

Tabelle 3.3: Merkmale zur Klassifikation von Tourenplanungsproblemen (Auswahl)

Bei der Lösung von Tourenplanungsproblemen mit mehreren Fahrzeugen ergeben sich zwei kombinatorische Teilprobleme, nämlich ein Zuordnungsproblem (Aufträge zu Touren) und ein Reihenfolgeproblem (Auftragsfolge innerhalb einer Tour). Dabei gehören sowohl das TSP als auch die VRP zur Komplexitätsklasse der NP-schweren Probleme, was eine exakte Lösung realitätsnaher Modelle mit vielen Kunden und schwierigen Nebenbedingungen in vertretbarer Zeit oftmals unrealistisch werden lässt. So unterliegt etwa die Anzahl der möglichen Touren beim TSP einer Fakultätsfunktion. In der praktischen Anwendung haben daher vor allem heuristische Verfahren einen hohen Stellenwert bei der Lösung von Tourenplanungsproblemen erlangt (Grünert und Irnich 2005a). Die Abbildung 3.4 zeigt eine Übersicht von Verfahrenskonzepten zur Lösung von Problemen der Tourenplanung, basierend auf dem Klassifizierungsschema, das Domschke et al. (2015) vertreten.

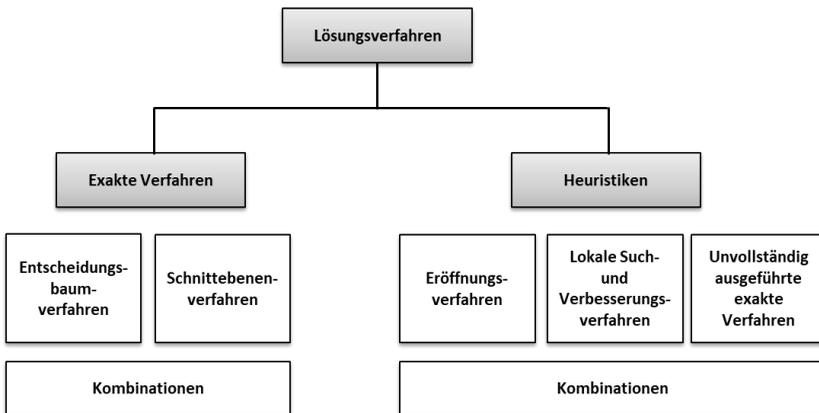


Abbildung 3.4: Klassifizierung von Lösungsverfahren für Tourenplanungsprobleme

Zu den Entscheidungsbaumverfahren gehört die naheliegende *vollständige Enumeration* des Problems durch das Ausführen und Bewerten aller Kombinationsmöglichkeiten der Entscheidungsvariablen. Zu den Verfahren der begrenzten Enumeration des Entscheidungsbaums gehört das *Branch-and-Bound-Verfahren* (B&B). Zur Entwicklung dieses Ansatzes wird an dieser Stelle

auf Land und Doig (1960) verwiesen. Bei B&B werden im Laufe des Verfahrens obere und untere Schranken des Zielfunktionswerts ermittelt und zur Beschränkung des Suchraums herangezogen, um dadurch den Aufwand zur Lösungssuche zu reduzieren. Die *Schnittebenenverfahren* führen bei ganzzahligen Optimierungsproblemen durch die iterative Aufhebung der Ganzzahligkeitsbedingung und das Hinzufügen weiterer Ungleichungen zu einem eingeschränkten Suchraum, der zuletzt nur noch die exakte Lösung des Problems enthält (vgl. Gomory 1958, Conforti et al. 2014). Eine Kombination von B&B mit weiteren Ansätzen liefern die *Branch-and-Cut-Verfahren* sowie die *Branch-and-Price-Verfahren*. Dabei werden die Suchräume des Entscheidungsbaums durch Schnittebenen oder Ansätze zur Spaltengenerierung reduziert, um für möglichst große Probleme exakte Lösungen erzeugen zu können. Diese erweiterten Branch-Verfahren sind aktuell die führende Methode zur exakten Lösung von Tourenplanungsproblemen (Toth und Vigo 2014).

Bei der Einordnung der Heuristiken fällt eine Klassifizierung aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Algorithmen und Entscheidungsregeln in der Literatur nicht leicht. Die Klasse der Heuristiken für Tourenplanungsprobleme lässt sich jedoch im Wesentlichen unterscheiden in die *Eröffnungsverfahren* zur Suche einer ersten (nicht notwendig optimalen) Lösung, die *Verbesserungsverfahren* zur lokalen Suche nach (möglichst optimalen) Lösungen sowie die *unvollständig ausgeführten exakten Verfahren* und *kombinierte Verfahren* aus mehreren verschiedenen Ansätzen. Bedeutende Eröffnungsverfahren sind der *Sweep-Algorithmus* nach Gillett und Miller (1974), der *Savings-Algorithmus* nach Clarke und Wright (1964) und der Einfügealgorithmus *Nächster-Nachbar* (NN) als Eröffnungsverfahren für das TSP. Dieser ist beispielsweise in Domschke und Scholl (2010) beschrieben. Zu den Verbesserungsverfahren gehören Heuristiken mit Tauschoperationen, wie etwa das *2-opt-Verfahren* oder das *3-opt-Verfahren* (beschrieben in Mattfeld und Vahrenkamp 2014). Dabei werden Vertauschungen der Kanten einer Tour auf ihre Profitabilität geprüft und im positiven Fall eine neue Reihenfolge mit geringeren Kosten erzeugt. Die Leistungsfähigkeit dieser Ansätze konnte insbesondere in

Kombination mit NN-Eröffnungsverfahren aufgezeigt werden (Golden und Stewart 1985).

### **3.1.4 Lean-Management im Logistikumfeld**

Einen Weg zur Reduzierung der Systemkomplexität auf ein gut zu beherrschendes Maß sowie zur Überwachung und Steuerung mit einfachen Mitteln liefert das japanische Konzept des Lean Management. Das von Eiji Toyoda und Taiichi Ohno entwickelte Produktionssystem des Automobilherstellers Toyota entstand in schweren wirtschaftlichen Zeiten nach dem Ende des Zweiten Weltkriegs. Das Ziel war es, auch unter ungünstigen Rahmenbedingungen aus unternehmerischer Sicht konkurrenzfähig sein zu können. Es wurden Konzepte und Methoden für einen möglichst schonenden Einsatz der nur sehr knapp zur Verfügung stehenden Ressourcen entwickelt (Brunner 2017). Diese Ansätze blieben der westlichen Welt jedoch zunächst verborgen, bis Womack et al. in der 1990 veröffentlichten MIT-Studie „The Machine That Changed the World“ die Produktionsmethoden der damals im harten Wettbewerb zunehmend zur Konkurrenz werdenden japanischen Automobilindustrie beschreiben (Womack et al. 2007).

Der Lean-Ansatz beinhaltet die folgenden Säulen als wesentliches Erfolgsrezept einer nachhaltig kosteneffizienten Prozessgestaltung (vgl. Schniederjans et al. 2010, Liker 2011):

- Die Prozesse sind konsequent auf den Kunden ausgerichtet und das Pull-Prinzip wird zur Materialversorgung angewandt.
- Es wird die Aufrechterhaltung eines kontinuierlichen Materialflusses angestrebt.
- Durch die Identifikation und Beseitigung von Verschwendung werden nicht wertschöpfende Zeitanteile nach und nach aus den Prozessabläufen eliminiert.

- Ein konsequentes Qualitätsmanagement führt zur deutlichen Reduzierung von Ausschuss und Stillstand.
- Durch die Stärkung der Mitarbeiterverantwortung und eine zielorientierte Führung wird der einzelne Mitarbeiter in die Verbesserung der Prozesse eingebunden.

Lean Management wurde in der westlichen Welt nach Bekanntwerden der Idee rasch aufgegriffen und verbreitete sich zunehmend. In Europa, und insbesondere in Deutschland, hat sich in den 1990-er Jahren eine erste große Welle der Lean-Adaption vollzogen. Der Erfolg war jedoch zunächst noch mäßig, was vor allem an mangelndem Verständnis und in der Folge in einer unvollständigen oder falschen Umsetzung der Konzepte begründet war. Dabei war vor allem eine Fokussierung auf Organisations- und Rationalisierungsmaßnahmen zu erkennen. Wichtigen Aspekten, wie etwa der konsequenten Umsetzung eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses, wurde noch zu wenig Bedeutung beigemessen (vgl. Abb. 3.5 zum Wirkprinzip von Lean). Abgesehen von wenigen positiven Beispielen machte sich bei den Anwendern zunehmend Ernüchterung breit, da sich langfristige Erfolge nicht einstellen wollten (Benders und van Bijsterveld 2000).

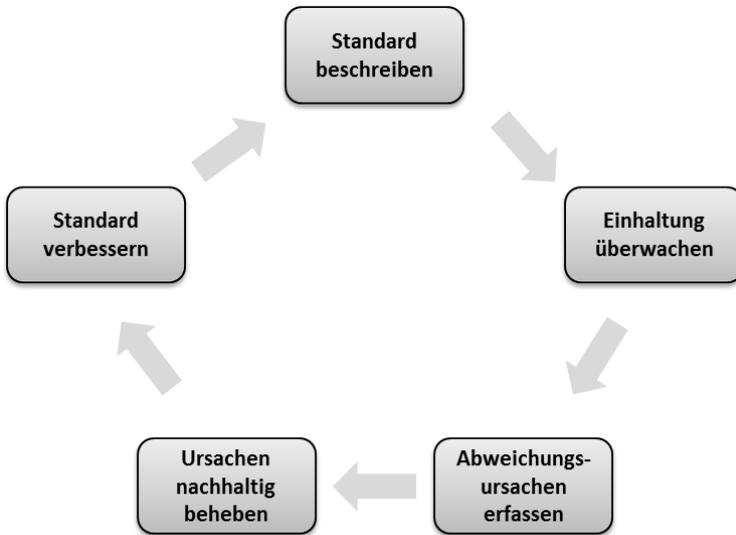


Abbildung 3.5: Das Prinzip der kontinuierlichen Verbesserung bei Lean-Konzepten

Etwa um die Jahrtausendwende erlebte der Lean-Ansatz aber ein Revival und gewann in einer zweiten Welle erneut an Popularität. Diesmal konnte, mit einer systematischeren Herangehensweise und umfassenderen Umsetzung der Konzepte, die erfolgreiche Implementierung bei vielen Unternehmen realisiert werden. Vor allem in der westlichen Automobil- und Automobilzulieferindustrie hielten auf die jeweiligen Bedürfnisse zugeschnittene Produktionssysteme Einzug. Diese beinhalten im Kern die Säulen des Toyota-Konzepts (Schlag und Runzheimer 2001). Der wachsende internationale Wettbewerb und die einsetzende Wirtschaftskrise der Jahre 2008/2009 erhöhten den Kostendruck auf viele Unternehmen immens und führten zu weiteren Anreizen, durch eine Verschlankeung der Prozesse konkurrenzfähige Kostenstrukturen zu erzeugen und zu erhalten (Faust 2009).

Die Umsetzung von Lean in der produktionsnahen Logistik ist inzwischen in der Literatur gut beschrieben. So geben etwa Günthner et al. (2013a, 2013b)

einen Überblick über Gestaltungsmöglichkeiten von effizienten und zuverlässigen Logistikprozessen. Die VDI-Richtlinien der Reihe 2870 geben weitere Hinweise zur Gestaltung von ganzheitlichen Produktionssystemen sowie dem Einsatz von Lean-Methoden im Produktionsumfeld (VDI 2870 Blatt 1:2012, VDI 2870 Blatt 2:2013). Der Lean-Gedanke hält aber darüber hinaus zunehmend auch in produktionsfernen Bereichen der Logistik Einzug. So beschreiben Furmans und Wlcek (2012) die Übertragungsmöglichkeit auf das Lagerumfeld. Dabei wird der Kundenauftrag zur Entnahme von Material aus dem Lager als Pull-Auslöser aufgefasst und die vorgelagerten Schritte (etwa das Kommissionieren, das Konsolidieren sowie das Bereitstellen der Ware im Warenausgang) entsprechen dem Produktionsprozess der klassischen Ansätze. Auch entlang dieser Schritte lässt sich Verschwendung, etwa durch ungleiche Auslastung der Mitarbeiter oder Fehler bei der Ausführung, identifizieren und durch geeignete Maßnahmen abstellen. Die positiven Auswirkungen von Lean Warehousing auf ausgewählte Leistungskennzahlen von Distributionszentren konnte Dehdari (2013) in seiner Dissertation erklären und anhand von Feldstudien exemplarisch aufzeigen.

Im Umfeld der Transportlogistik sind Lean-Konzepte bislang nicht etabliert. Dies liegt an der starken räumlichen Verteilung der transportlogistischen Prozesse. Während in der Produktionslogistik die Einflussfaktoren auf das System in der Regel vollständig zu erfassen und zu kontrollieren sind, entziehen sich diese im Transport häufig der Kenntnis und Beeinflussbarkeit der Prozessverantwortlichen. Die prozessausführenden Personen (also die LKW-Fahrer oder Mitarbeiter in Wareneingängen oder -ausgängen) können zwar noch den jeweiligen konkreten Prozessschritt erfassen, ein Verständnis für den Gesamtprozess besteht jedoch nicht. Die Folgen von Handlungsalternativen können nur unzureichend abgeschätzt und mögliche Probleme kaum adäquat kommuniziert werden. Die Führung vor Ort, in der Produktionslogistik ein wichtiger Bestandteil von Lean, ist in der Transportlogistik nur erschwert möglich. Dennoch scheint, trotz der voran genannten Hürden, die Übertragung von Ansätzen des Lean Managements auch auf die Transportlogistik vielversprechend zu sein. Durch die Einführung von Regelkreisen könnte, ähnlich wie in

der Produktions- oder Lagerlogistik, für strukturierte Prozesse eine Überwachung von Soll- und Ist-Größen in Verbindung mit der konsequenten Erhebung von Abweichungsgründen erfolgen und bei zukünftigen Planungen berücksichtigt werden. Dazu bedarf es jedoch im Vergleich zum Produktions- oder Lagerumfeld einer deutlich stärkeren Unterstützung durch geeignete IT-Infrastruktur (vgl. Bauer et al. 2017).

## **3.2 Konzepte des Risiko- und Störungsmanagements**

Für die Beherrschung der Planungs- und Steuerungsthemen entlang von Wertschöpfungsketten hat sich der Managementansatz des Supply Chain Management etabliert. Es ist das Ziel, die Komplexität einer unternehmensübergreifenden Prozesslandschaft handhabbar zu machen und die unterschiedlichen Planungsaufgaben (sowohl zeitlich als auch thematisch) zu integrieren (Stadtler 2015). Es wird nicht von deterministischen Planungsfällen ausgegangen, sondern Unsicherheiten bezüglich zukünftiger Entwicklungen in der Supply Chain werden explizit bei der Optimierung berücksichtigt (etwa über Prognosen oder Verteilungsannahmen) (Shao et al. 2015). Dabei ergibt sich ein Korridor, in dem sich die physischen Prozesse einer Supply Chain bewegen können. Puffer, in Form von Bestand, Kapazität oder zeitlichen Reserven sorgen in der Theorie für reibungslose Abläufe (Hopp und Spearman 2001). Dennoch führen, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, endogene und exogene Einflüsse auf das System zur Notwendigkeit einer permanenten Anpassung.

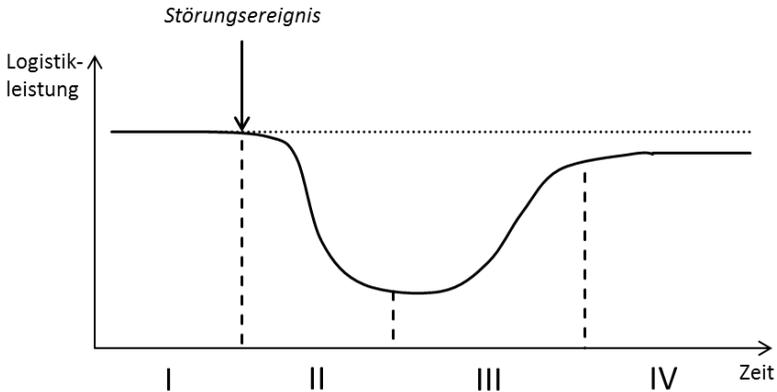


Abbildung 3.6: Die Phasen eines Risiko- und Störungsmanagements (in Anlehnung an Sheffi 2005)

Die Abbildung 3.6 zeigt exemplarisch die Auswirkungen eines Störungereignisses auf die Logistikleistung sowie die typischen Phasen eines Risiko- und Störungsmanagements. In der ersten Phase ist eine Supply Chain noch nicht von einem Störungereignis betroffen. Es besteht die Möglichkeit, die Risikoexposition zu analysieren und vorkehrende Maßnahmen zu treffen. Ab dem Auftreten eines Störungereignisses beginnt die zweite Phase. Dieses Ereignis muss detektiert und bewertet werden, damit Maßnahmen zur Schadensabwehr eingeleitet werden können. In dieser Phase entfaltet die Störung zunehmend ihre Wirkung und die Leistung des Systems fällt ab. Ab der dritten Phase beginnt die Einleitung von Maßnahmen zur Rückführung des Systems in den Zielzustand. Mit zeitlicher Verzögerung steigt die Logistikleistung wieder an und erreicht in der vierten Phase schließlich das maximal zu erreichende Niveau. Liegt dieses unter der Ausgangslage, lassen sich langfristige Folgen des Ereignisses ermitteln (vgl. Sheffi 2005, Götze und Mikus 2015).

Zur Bewältigung der in Abbildung 3.6 beschriebenen Phasen haben sich im Supply Chain Management Teildisziplinen mit jeweils spezifischen Strategien und Werkzeugen entwickelt. Das *Supply Chain Risikomanagement* vereint

Konzepte zur Risikoanalyse und Risikoversorge (Phase I) und adressiert dabei eine proaktive Vorgehensweise im strategischen und taktischen Planungshorizont (Götze und Mikus 2015). Einen Beitrag zur Erkennung und Bewertung von ungeplanten oder geplanten Ereignissen zur Laufzeit (Phasen II-IV) liefert das *Supply Chain Störungsmanagement*. Dabei steht der Einsatz statistischer Methoden in Kombination mit Ablaufregeln oder Algorithmen im operativen und taktischen Planungshorizont im Vordergrund (Reuter und Rohde 2015). Beide Ansätze werden in der Literatur häufig eigenständig betrachtet, es erfolgt aber zunehmend die konzeptionelle Verknüpfung über die verschiedenen Planungshorizonte hinweg sowie die Integration in übergeordnete Konzepte des Supply Chain Management (vgl. Berg et al. 2008, Pyke und Tang 2010).

#### **3.2.1 Proaktiver Ansatz – Supply Chain Risikomanagement**

Das Supply Chain Risikomanagement (SCRM) ist ein strukturierter Managementansatz zur Steuerung von Risiken, die sich bei gemeinsamen Aktivitäten von Partnern in einer Supply Chain ergeben und im Eintrittsfall durch eine Unterbrechung der logistischen Flüsse die Leistungskennzahlen des Systems negativ beeinflussen (Simchi-Levi et al. 2007). Die Literatur nimmt eine Unterteilung in die Teilaufgaben eines Risikomanagements vor (vgl. Abbildung 3.7).

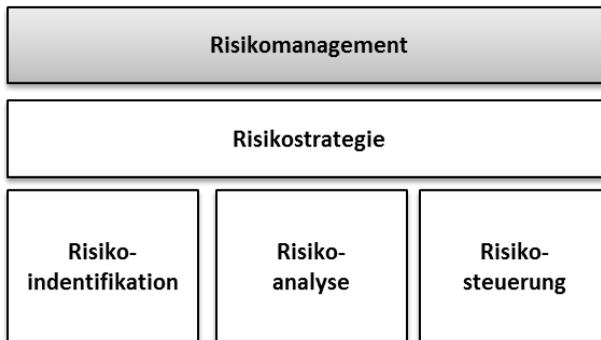


Abbildung 3.7: Bausteine eines Risikomanagements

Die *Risikostrategie* dient der Überführung der übergeordneten Unternehmensstrategie in eine abgeleitete Strategie für den Umgang mit Risiken in der Supply Chain. Dabei werden Zielvorgaben definiert und grundsätzliche Herangehensweisen festgelegt (Jüttner et al. 2003). Die *Risikoidentifikation* zielt auf das Erkennen und Kategorisieren der möglichen Risiken ab (vgl. Kapitel 2.2). Diese Inventur der Risiken zeigt die Abdeckung eines Risikomanagements auf und bildet die Grundlage für die nächsten Schritte. Die *Risikoanalyse* gewichtet die identifizierten Risiken, schließt unbedeutende aus der weiteren Betrachtung aus und hebt die mit besonders hoher Priorität hervor. Die Bewertung erfolgt auf Grundlage einer Risikoprioritätskennzahl (bestehend aus dem zu erwartenden Schadensausmaß und einer angenommenen Eintrittswahrscheinlichkeit). Im Zuge der *Risikosteuerung* wird schließlich festgelegt, wie in Vorbereitung sowie im Falle eines Eintrittsereignisses verfahren werden soll (Pfohl 2016). Grundsätzlich können Risiken ertragen, vermieden (etwa durch die Aufgabe von Produkten), vermindert (durch Vorsorge- und Gegenmaßnahmen) oder übertragen werden (etwa an andere Supply Chain Partner).

Die aktuelle praxisnahe Forschung befasst sich mit der quantitativen Untersuchung von Risiken in Supply Chains sowie der Weiterentwicklung von Werkzeugen zur Analyse und Steuerung:

- Am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML) in Dortmund erfolgte die Entwicklung einer Simulationsumgebung zur Abbildung von Planungs- und Materialflussprozessen. Das simulationsbasierte Tool *OTD-Net* wurde im Rahmen mehrerer Forschungsprojekte eingesetzt und weiterentwickelt (Liebler et al. 2013). Im BMWi-geförderten Projekt *InKoRISK* wurden auf dieser Grundlage Konzepte und Methoden eines unternehmensübergreifenden Risikomanagements entwickelt (Gelau et al. 2014). Der Schwerpunkt lag dabei auf der Risikoanalyse. Mit Blick auf eine Steigerung der Transparenz im Engpassmanagement wurden im Projekt *ViLoMa* Ansätze zur intuitiven Visualisierung von sich anbahnenden Störungen erarbeitet (Schröder et al. 2015).
- Der Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen Produktion, Logistik und Verkehr hat sich das Projekt *Dynamo PLV* gewidmet. Dabei wurden alle drei Teilsysteme in einer integrierten Simulationsumgebung abgebildet und die Auswirkungen unterschiedlicher Planungsszenarien aufgezeigt (Elbert et al. 2014). Dabei wurde auf die Robustheit der Lösungen eingegangen, so dass der Ansatz der Risikosteuerung zuzuordnen ist.
- Ein simulationsbasiertes Framework zur Analyse von Supply Chain Risiken bietet *SimSCRF*. Mit diesem Ansatz können komplexe Netzwerke mit komplexen Strukturen untersucht und verschiedene Optionen der Risikosteuerung bewertet werden. Der Anwender wird durch eine anschauliche Visualisierung der Ergebnisse bei seiner Entscheidung unterstützt (Heckmann und Nickel 2015).
- Einen Ansatz zur Gestaltung robuster und anpassungsfähiger Supply Chains liefert das EU-geförderte Projekt *RobustPlaNet*. Es wurden

Kennzahlen zur Bewertung der Robustheit entwickelt, verschiedene Störungs- und Lösungsszenarien in einer Simulationsumgebung untersucht und die konzeptionellen Ansätze in verschiedenen Use Cases praktisch evaluiert (Becker et al. 2016).

Das Risikomanagement gewinnt in Unternehmen nicht zuletzt durch das Auftreten prominenter Schadensereignisse an Bedeutung. So führten Naturkatastrophen, betriebliche Großschadensereignisse und ernsthafte Lieferantenausfälle in Kombination mit global immer weiter gespannten Supply Chains zu Beginn der 2000-er Jahre zu einer zunehmenden Diskussion in Wissenschaft und Praxis (Norrman und Jansson 2004). Rechtliche Anforderungen an das betriebliche Risikomanagement ergeben sich in Deutschland zudem aus dem im Jahr 1998 in Kraft getretenen Gesetz zur Kontrolle und Transparenz im Unternehmensbereich (KonTraG). Darin ist die Einrichtung eines Überwachungs- und Frühwarnsystems gefordert, das Risiken mit existenzgefährdender Tragweite betrachtet (KonTraG 1998). Für ein umfassenderes und vor allem netzwerkweites Risikomanagement fehlt es bislang allerdings an einem rechtlichen Rahmen. Eine Orientierung gibt die ISO 31000, in der zentrale Begriffe definiert werden und ein Grobprozess vorgegeben wird (ISO 31000:2018). Eine konkretere normative Ausgestaltung des Supply Chain Risikomanagements auf internationaler Ebene wäre jedoch dringend wünschenswert, um den global gespannten Netzwerken gerecht zu werden und die Einhaltung von Mindeststandards zu garantieren. Nach einer Studie der AEB und DHBW besteht bei vielen Unternehmen Nachholbedarf bei Bekanntheit und Umsetzung grundlegender Risikomanagement-Methoden, wie etwa Frühwarnsystemen, SWOT- und FMEA-Analysen oder Risiko-Maps (AEB und DHBW 2014). Zudem fehlt es nach wie vor an einheitlichen Kennzahlen zur Risikoquantifizierung (Heckmann et al. 2015).

### **3.2.2 Reaktiver Ansatz – Supply Chain Störungsmanagement**

Das Supply Chain Störungsmanagement dient der fortlaufenden Überwachung des Systems und der Einleitung einer angemessenen Reaktion auf

Abweichungen, die Störungspotential aufweisen. Dazu ist es erforderlich, Abweichungen erkennen und bewerten zu können sowie den Einsatz der zur Verfügung stehenden Maßnahmen zielgerichtet zu steuern. Zuletzt muss die Wirksamkeit überwacht werden, um bedarfsgerecht weitere Maßnahmen einleiten zu können und einen Erkenntnisgewinn für zukünftige Abweichungsereignisse zu generieren (Blackhurst et al. 2005). Die Abbildung 3.8 zeigt die typischen Bausteine eines Störungsmanagements für das Supply Chain Management.

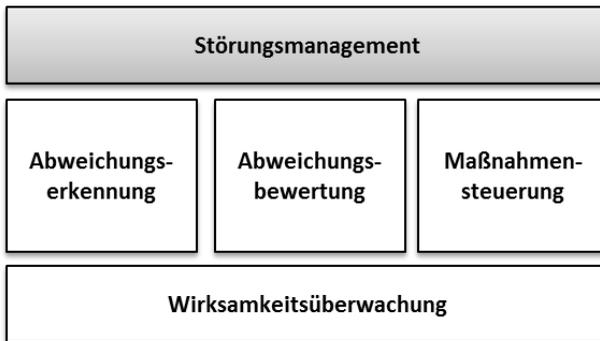


Abbildung 3.8: Bausteine eines Störungsmanagements

Für Konzepte zur ereignisbasierten Entscheidungsunterstützung in Logistiknetzwerken hat sich der Überbegriff des *Supply Chain Event Management* (SCEM) etabliert. Ziel ist es dabei, die geplanten Prozesse fortlaufend zu überwachen und kurzfristig situationsbedingte Anpassungen vorzunehmen zu können. Es werden Daten aus Planungssystemen und Statusinformationen aus Tracking-Systemen für einen Abgleich von Plan- und Ist-Größen herangezogen. Je nach Entwicklungsstufe des SCEM können die Bewertung und Maßnahmeneinleitung (teil-)automatisiert erfolgen oder es werden dem menschlichen Entscheider aufbereitete Informationen zur eigenen Beurteilung der Lage bereitgestellt (Toth 2009). Die Kosten können durch ein SCEM auf mehreren Wegen reduziert werden. Zum einen kann effizienter auf eine drohende

Störung reagiert werden, weil die erforderlichen Informationen zur Beurteilung und Entscheidung schneller und besser zur Verfügung stehen. Zum anderen werden durch das Störungsmanagement Schadensereignisse abgewendet oder zumindest gemildert. Durch einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess können die gewonnenen Erkenntnisse darüber hinaus zu einer Vermeidung zukünftiger Abweichungen führen (Reuter und Rohde 2015).

Folgende Autoren befassen sich mit einem reaktiven Störungsmanagement in logistischen Netzwerken, in einer übergeordneten Sicht oder zumindest mit Teilaspekten:

- Den Einfluss und die Möglichkeiten zur Abwendung von Störungen in einem Produktionssystem hat Fischäder in seiner Dissertation untersucht. Dabei hat er Ansätze zur Folgenabschätzung für die übrigen Prozesse eines Produktionsnetzwerks (bestehend aus mehreren Arbeitsstationen) sowie die Ermittlung der Maßnahmenwirksamkeit in einzelnen Teilprozessen entwickelt (Fischäder 2007).
- Einen Ansatz zur Erkennung und Bewertung von Störungen in Supply Chains sowie der Einleitung von Gegenmaßnahmen haben Cauvin et al. vorgestellt. Es wird ein Multiagentensystem vorgeschlagen, das die individuellen Ziele und Strategien der Akteure (Lieferanten, Logistikdienstleister und Empfänger) abbildet und durch einen strukturierten Interaktionsprozess eine unternehmensübergreifende Entscheidungsfindung ermöglicht (Cauvin et al. 2009).
- Dreßler und Beißert stellen einen Ansatz für ein Störungsmanagement in Transportnetzwerken mit dem Ziel einer Systemstabilisierung vor. Dabei werden Ereignisse mithilfe einer Datenbasis über historische Zeitverteilungen bewertet und Planänderungen vorgenommen. Zielkriterien sind die Ergebnisrobustheit (Termineinhaltung) sowie die Planrobust (Anzahl Umplanungen) (Dreßler und Beißert 2013).

- Ansätze zur Selbststeuerung in Logistiksystemen entwickelte und untersuchte Dentgen in seiner Dissertation am Beispiel der Luftfracht. Der Autor gibt Vorschläge für das Zusammenspiel von dezentralen und zentralen Steuerungselementen und die Ausgestaltung der selbststeuernden Objekte hinsichtlich des Grads der Autonomie und der Entscheidungsbefugnisse. Neben der Bewältigung von drohenden Störungen zielt der Ansatz auch auf die Erkennung von Potentialen der Effizienzsteigerung ab (Dentgen 2015).
- Jung hat in seiner Dissertation die Möglichkeiten einer agentenbasierten Transportsteuerung untersucht und ein Verfahren für die Koordination multimodaler Verkehre entwickelt. Dabei konnte auf Störeinflüsse auf der operativen Ebene bis zu einem gewissen Grad automatisiert reagiert werden und die Entscheidungsfindung der Disponenten unterstützt werden (Jung 2016).
- Ebenfalls mit Fokus auf die Transportlogistik entwickelte Gath in seiner Dissertation Ansätze einer agentenunterstützten Optimierung. Dazu wurden Optimierungsaufgaben des Transports mittels Koordinationsagenten zu einer günstigen Gesamtlösung zusammengeführt. Der Ansatz wurde in Fallstudien aus dem Speditions Umfeld auf Wirksamkeit untersucht und die Umsetzbarkeit einer Softwareagenten-basierten Planungsunterstützung für den Anwendungsfall als umsetzbar und nutzenstiftend bewertet (Gath 2016).

Im Vergleich zum Risikomanagement ist das Störungsmanagement in der Literatur weniger umfangreich beschrieben. Die Methoden werden dort zudem häufig mit der technologischen Perspektive, ohne konzeptionelle Verbindung zum Supply Chain Management, behandelt. Folgende Aspekte müssen bei der Konzeptionierung und Implementierung eines Störungsmanagements in dynamischen Logistiksystemen mit betrachtet werden:

- Systeme zur *Objektidentifikation* und *Datenverteilung* bilden die Grundlage für eine möglichst echtzeitnahe Erkennung und Bewertung

von Abweichungen in logistischen Prozessen. Dabei bilden Barcode- und RFID-Lösungen in Verbindung mit zentralhierarchischen Informationssystemen nach wie vor die Grundlage in der Logistik (Lepratti et al. 2014). Mobile Anwendungen (wie etwa Smartphone-Apps) oder intelligente und vernetzte Ladungsträger können die ortsungebundene Erfassung und Bereitstellung von Informationen zum Auftragsstatus sinnvoll ergänzen (Bauer et al. 2017).

- Auf dem Gebiet der *Datenhaltung* und *-analyse* etablieren sich zunehmend Technologien zur effizienten Massendatenverarbeitung. Erst dadurch können für komplexe Systeme aus einer Vielzahl verfügbarer Daten sinnvolle Informationen für die Entscheidung abgeleitet werden. Der Begriff *Big Data* bündelt Konzepte und Methoden zur Steigerung der nutzbaren Datenmenge, der Datenvielfalt, der Auswertegeschwindigkeit sowie der Entwicklung neuartiger Analysemöglichkeiten (Dorschel und Dorschel 2015).

### **3.2.3 Ansätze einer kooperativen Planung und Steuerung**

Das Konzept des Supply Chain Management ist geprägt von einer unternehmensübergreifenden Planung und Steuerung mit dem Ziel einer möglichst effizienten Leistungserbringung über die gesamte Wertschöpfungskette. Diesem Grundsatz unterliegen auch das Risiko- und Störungsmanagement. So sollen etwa bei einem mehrstufigen Bestandsmanagement in Supply Chains Kapazitäten und Puffer über mehrere Stufen hinweg ausgelegt und in Einklang gebracht werden (vgl. Tempelmeier 2015). Dazu kooperieren wirtschaftlich selbstständige Unternehmen oder Unternehmensteile in einer eher losen oder einer vertraglich verbindlicheren Form miteinander. Die Koordinationsformen bewegen sich auf einem Kontinuum, zwischen einer hierarchischen und einer marktähnlichen Ausprägung. Mischformen sind möglich, etwa wenn innerhalb eines vertraglich abgesteckten Handlungsrahmens eine Übereinkunft durch Markttransaktionen wie etwa Auktionen erfolgt (Morschett 2005). Für das Einsatzgebiet der Logistik eignen sich grundsätzlich

beide Ausprägungen (Hierarchie und Markt) zur Kooperation. Erstere wird in den gängigen ERP-Systemen abgebildet, letztere findet zunehmend Einzug in Teilaspekten des Supply Chain Managements. So konnte etwa Stickel experimentell zeigen, dass sich kombinatorische Auktionen gut zur operativen Steuerung von zeitfensterbasierten Zuordnungsproblemen eignen. Dazu verglich er die Ergebnisse eines dezentral-heterarchischen Auktionsverfahrens mit denen eines zentral-hierarchischen Optimierungsproblems (Stickel 2006).

Es ist allerdings zu beachten, dass bei allen Bestrebungen zu einer stärkeren Vernetzung, Abstimmung und gemeinsamen Lösungsfindung zwischen den unterschiedlichen Akteuren eines Logistiknetzwerks weiterhin von opportunistischem Verhalten jedes einzelnen Akteurs auszugehen ist. Dies ist darin begründet, dass jedes Unternehmen zur Erreichung der eigenen Ziele eine nutzenmaximierende Strategie verfolgt. Die eingesetzten Verfahren müssen daher zum einen Anreize zur Kooperation schaffen und zum anderen die missbräuchliche Ausnutzung von individuellen Vorteilen verhindern. Darüber hinaus muss die Entscheidungsfindung synchronisiert werden, um ohne größeren zeitlichen Verzug zu einer Gesamtlösung zu kommen. Dies kann in der Regel nur sichergestellt werden, wenn der Informationsaustausch maschinell und wohlstrukturiert sowie möglichst echtzeitnah erfolgt. Die Kooperation stellt insofern hohe Anforderungen an das Design einer Supply Chain und die Ausgestaltung und Umsetzung der Prozesse (Simatupang und Sridharan 2005).

Planungs- und Steuerungsverfahren für logistische Systeme lassen sich nach Scholz-Reiter et al. hinsichtlich des Planungshorizonts und des Dezentralisierungsgrads einordnen (vgl. Abb. 3.9). Bei einem hohen Dezentralisierungsgrad und sehr kurzen Planungshorizonten ist von einer *Selbststeuerung* des logistischen Objekts die Rede, bei Anwendung von zentral-hierarchischen Systemen spricht man von einer *dynamischen Steuerung*. Mit zunehmendem Planungshorizont verschiebt sich das zentrale Steuerungsverfahren hin zu einem *statischen Planungsverfahren*. Bei hoher Dezentralität steigen mit zunehmendem Planungshorizont die Restriktionen des Umfelds, so dass vom Einsatz

einer *agentenbasierten Planung* auszugehen ist. Mischformen sind selbstverständlich möglich (Scholz-Reiter et al. 2008).

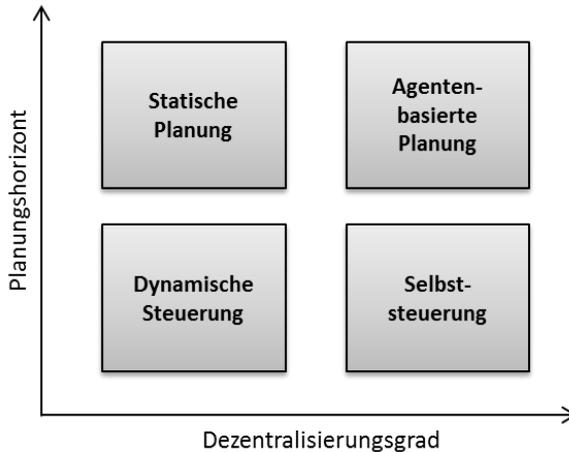


Abbildung 3.9: Einordnung von Verfahren zur Planung und Steuerung in logistischen Netzwerken (in Anlehnung an Scholz-Reiter et al. 2008)

Agentenbasierte Verfahren zur Planung und Steuerung haben in jüngster Zeit einen zunehmenden Aufstieg in der Logistik erfahren. Dies lässt sich dadurch begründen, dass dieser Ansatz sich gut für den Einsatz bei einem kurzen bis mittleren Planungshorizont in Kombination mit einem mittleren bis hohen Dezentralisierungsgrad eignet. Logistische Objekte, Entscheidungsträger und Teile der Umwelt werden dabei von digitalen Abbildern repräsentiert und treten in Interaktion. Ein verbreiteter Ansatz für die Modellierung solcher Systeme ist die BDI-Architektur. Es werden die Annahmen (*Beliefs*), die Wünsche (*Desires*) und die Absichten (*Intentions*) des zugrunde liegenden Realsystems bei der Modellierung in ein adäquates Verhalten der Softwareagenten überführt (vgl. Wooldridge 2009). Die Modellierung fokussiert dabei auf das jeweilige Teilproblem mit den spezifischen Anforderungen und Lösungsverfahren sowie die Integrationen benachbarter Entscheidungsprozesse. Im Gegensatz

dazu zielen zentral-hierarchische Systeme auf eine übergeordnete Sichtweise und Sicherstellung der Konsistenz ab. Unstrukturierte Probleme, seltene Ereignisse und nichtlineare Zusammenhänge werden dabei allerdings nur eingeschränkt abgebildet (Zsifkovits und Krenn 2008). Bei einem hohen Komplexitätsgrad des Systems spielen dezentrale Systemarchitekturen daher ihre Stärken aus.

Um die Zusammenarbeit der Akteure einer Supply Chain erfolgreich umzusetzen, müssen in der Praxis neben den Verfahren zur Planung und Steuerung auch geeignete Werkzeuge zur Kollaboration zur Verfügung stehen. Während in den Anfangszeiten vernetzter Supply Chains die Verknüpfung von bestehenden Unternehmensanwendungen über geeignete Datenschnittstellen im Vordergrund der Entwicklung stand (Baumgarten 2004), gewinnen aktuell Logistikplattformen zunehmend an Bedeutung. Im Zusammenhang mit Industrie 4.0 wird webbasierten Anwendungen für die Logistik die Rolle einer ganzheitlichen und prozessübergreifenden Vernetzung und Kommunikation zuteil. So sehen Verl und Lechler durch Cloud-basierte und Service-orientierte Softwarearchitekturen ein Überwinden der hierarchischen und abgeschlossenen Struktur monolithischer Systeme, eine bessere Rekonfigurationsfähigkeit und nicht zuletzt auch weitere Möglichkeiten der Systemoptimierung durch verteilte Problemlösung und das Aushandeln globaler Optima (Verl und Lechler 2014). Die Mechanismen der Preisbildung sollten dabei allerdings weiterhin den Grundsätzen fairer Preise entsprechen. So sollten die resultierenden Preisangaben, trotz dynamischer Ermittlung durch ein System, nachvollziehbar und nicht an unklare Abhängigkeiten oder Nebenkosten gebunden sein (Gudehus 2012a).

Wesentliche Aufgaben von Kooperationsplattformen für die Logistik sind die Schaffung von Transparenz zur Entscheidungsunterstützung, eine teilautomatisierte Entscheidung auf der Grundlage von Regeln oder Algorithmen sowie die Hebung von Potentialen der Effizienzsteigerung durch die mengenmäßige und zeitliche Bündelung von Aufträgen. Diese Plattformen arbeiten idealerweise im Einklang mit den klassischen ERP-Anwendungen sowie dezentral

agierenden Softwareagenten. Eine branchenübergreifende Standardisierung steht bislang aus, wäre jedoch zur Vermeidung von Schnittstellenproblemen zwischen den einzelnen Anwendungen wünschenswert. Dabei sollten insbesondere auch Aspekte des Besitzes, der Verwendung und der Sicherheit von Daten in einem unternehmensübergreifenden Konglomerat geregelt sein.

### **3.3 Zusammenfassung und resultierender Forschungsbedarf**

Die Untersuchung zum Stand von Forschung und Praxis hat gezeigt, dass aktuell einzelne Ansätze zur kooperativen Planung und Steuerung sowie zur unternehmensübergreifenden Zustandsbewertung von logistischen Netzwerken zur Verfügung stehen. Konzepte des Supply Chain Management bilden durch die Abbildung in gängigen IT-Systemen der Logistik die Grundlage für Neu- und Weiterentwicklungen. Vertiefende Spezifikationen geben das Supply Chain Risikomanagement (SCRM) sowie das Supply Chain Eventmanagement (SCEM), sowohl in konzeptioneller als auch in methodischer Hinsicht. Im Zuge von Industrie 4.0 werden dezentrale Planungs- und Steuerungsdienste, echtzeitnahe Trackinglösungen und cloudbasierte Dienste entwickelt. Folgende Einschränkungen der diskutierten Lösungsansätze begründen die weitere Forschung am Themenkomplex:

- Bei der unternehmensübergreifenden Planung im strategischem und taktischem Zeithorizont wird bei den diskutierten Konzepten weiterhin die zentralhierarchische Perspektive, bezogen auf das fokale Unternehmen eines logistischen Netzwerks eingenommen. Realisierbare Kostenvorteile werden direkt bei diesem Akteur adressiert und ein Ausgleich zwischen allen beteiligten Akteuren zur Umsetzung kostenminimaler Ablaufvarianten aus Gesamtprozesssicht findet nicht oder nur in Teilaspekten statt (etwa bei einer integrierten Betrachtung von Bestands- und Transportkosten). Es fehlen geeignete Modelle zur

Gesamtkostenbetrachtung von logistischen Netzwerken über mehrere Akteure und logistische Teildisziplinen hinweg.

- Webbasierte Logistikplattformen ermöglichen die Vernetzung mehrerer Akteure und unterstützen die gemeinsame Entscheidungsfindung. Doch auch bei diesen Konzepten stellt sich die Frage nach dem Betreiber, beziehungsweise dem Auftraggeber solcher Dienste. In der Regel liegt der Fokus auch dort auf einem fokalen Unternehmen, das die eigenen Kostenvorteile heben möchte, ohne primär den Ausgleich über alle Akteure zu suchen.
- Durch die hohe Komplexität der Entscheidungsprobleme mehrstufiger Systeme erfolgt die Lösung in der Regel dekomponiert in der jeweiligen Anwendungsdomäne mit spezialisierten Verfahren und eingeschränkter Berücksichtigung der angrenzenden Teilprozesse. Eine Betrachtung über diese Teilprozesse hinaus findet dann in der Regel nicht mehr statt. Es fehlen Ansätze zur vereinfachten, aber dennoch zuverlässigen Problemlösung der komplexen Entscheidungsprobleme logistischer Netzwerke.

In Hinblick auf die Volatilität der Ablaufprozesse eines logistischen Netzwerks weisen die diskutierten Konzepte zum Risiko- und Störungsmanagement in Supply Chains folgende Einschränkungen auf:

- Es zeigt sich eine starke Fokussierung auf jeweils nur einen zeitlichen Planungshorizont. So zielt das Supply Chain Risikomanagement auf die langfristige Absicherung einer Supply Chain gegenüber weitreichenden Schadensereignissen (wie etwa Naturkatastrophen) ab. Das Supply Chain Störungsmanagement sucht auf der Grundlage eingetretener Einzelereignisse nach Lösungen für deren Bewältigung. Es fehlt allerdings eine sinnvolle Verknüpfung der initialen Planung mit der fortlaufenden Steuerung zur Gewinnung von Rückschlüssen für zukünftige Planungsperioden aus der Ausführungsphase. Hier wäre etwa eine stärkere Berücksichtigung von Lean-Prinzipien wünschenswert,

um nachhaltig an kosteneffizienten Prozessabläufen zu arbeiten. Leider haben sich entsprechende Anwendungen in der Logistik nur im Produktions- und Lagerumfeld etabliert. Für die Transportlogistik fehlen geeignete Ansätze derzeit noch. Der Einsatz erscheint allerdings umsetzbar und vielversprechend, unterstützende IT-Infrastruktur vorausgesetzt.

- Neue Technologien zur echtzeitnahen Identifikation und Statusüberwachung sowie zur dezentralen Steuerung von logistischen Objekten werden in Einzelanwendungen erfolgreich genutzt. Die konsequente Einbindung in die bestehenden Prozesslandschaften der Logistik stehen in weiten Teilen noch aus.

In Hinblick auf die Diskrepanz zwischen den Anforderungen der Praxis und dem Stand der Forschung stehen folgende Aspekte bei der vorliegenden Arbeit im Vordergrund:

- Es wird ein Konzept zur kooperativen Planung und Steuerung vorgeschlagen, das die Suche nach kostenminimalen Ablaufvarianten aus Gesamtprozesssicht betrachtet und den Ausgleich zwischen den beteiligten Akteuren auf der Grundlage gemeinsamer Zeit- und Kostenmodelle sucht. Die Folgen von Einzelentscheidungen und Wechselwirkungen zwischen Teilsystemen werden untersucht und bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt.
- Der taktische und der operative Zeithorizont werden miteinander verknüpft, um die Erkenntnisse der Ausführungsphase in zukünftigen Planungsperioden zur kontinuierlichen Systemverbesserung zu nutzen. Es werden dazu Kennzahlen und Vorgehensweisen vorgeschlagen, die die Grundsätze des Lean Managements auf die Transportlogistik übertragen.



## **4 Das Konzept einer kooperativen Planung und Steuerung**

Es hat sich gezeigt, dass die Prozesse in logistischen Netzwerken in der Praxis einer gewissen Volatilität unterliegen. Die physischen Prozesse weichen in der Ausführungsphase von den ursprünglich geplanten Auflaufplänen ab und ziehen in der Folge Plananpassungen sowohl auf der operativen als auch auf der taktischen Ebene nach sich. Gegenstand dieses Kapitels ist die Entwicklung eines Konzepts zur kooperativen Planung und Steuerung, das im Zusammenspiel aller beteiligten Akteure zu günstigen Ablaufvarianten aus Gesamtprozesssicht führt und unterstützt, das System kontinuierlich zu verbessern. Im ersten Teil des Kapitels erfolgt die Abgrenzung und Skizzierung des Anwendungsfalls. Anschließend werden die entwickelten Verfahren und Modelle der operativen und taktischen Ebene erörtert. Den Abschluss bilden die Einführung der Gesamtarchitektur sowie die Orchestrierung der Dienste.

### **4.1 Abgrenzung des Anwendungsfalls**

Im Folgenden wird der Anwendungsfall skizziert, der für die Konzeptentwicklung grundlegend ist. Dabei wird zunächst auf die prozessseitigen Aspekte eingegangen, um das Einsatzgebiet der Dienste abzustecken und zentrale Begriffe und Vorgehensweisen einzuführen. Im Anschluss wird der Handlungsrahmen abgesteckt, der die Grundlage zur Untersuchung der Maßnahmenwirksamkeit liefert.

#### **4.1.1 Beschreibung der Prozesse aus logistischer Sicht**

Dem entwickelten Konzept liegt ein Szenario aus der Beschaffungslogistik eines produzierenden Unternehmens zugrunde (vgl. Abb. 4.1). Dieses Unter-

nehmen, hier *Hersteller* genannt, fertigt an einem Standort Produkte und bestellt das dazu benötigte, aber nicht selbst hergestellte Material bei seinen *Lieferanten*. Die Lieferanten führen das an einem Standort bestellte Material zu Sendungen zusammen und stellen diese zur Transportabwicklung durch einen *Logistikdienstleister* (LDL) bereit. Die Abwicklung des Transports erfolgt im betrachteten Fall gebrochen. Es werden zunächst mehrere Vorholturen in einem räumlich begrenzten Gebiet durchgeführt und anschließend in einem Hub umgeschlagen. Dort erfolgt die Sortierung der Ladungen nach Empfängern und erneute Bereitstellung für den folgenden Transportprozess. Der mit dem Nachlauf betraute Logistikdienstleister transportiert schließlich die Sendungen zum Hersteller. Dieser empfängt die Sendung im Wareneingang und führt das bestellte Material dem internen Bestimmungsziel zu.

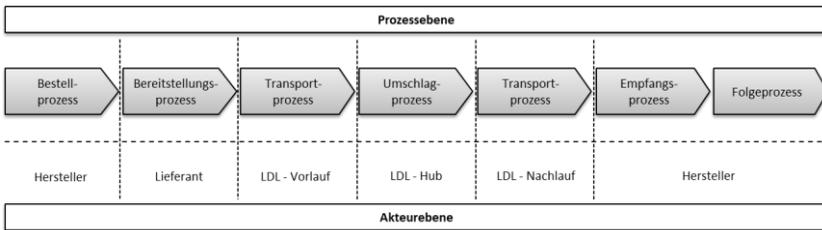


Abbildung 4.1: Akteure und Prozesse des Anwendungsfalls aus Auftragsicht

Bei den Akteuren handelt es sich um unabhängig voneinander agierende Wirtschaftssubjekte, die ihre individuellen Ziele der Kostenminimierung unter Einhaltung vertragsrechtlicher Rahmenbedingungen durch eigenverantwortliche Planung und Steuerung verfolgen. Bei der Betrachtung des eingangs beschriebenen Gesamtprozesses bestehen immanente Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Teilprozessen, die bei der Suche nach einer theoretisch Gesamtkosten-minimalen Ablaufvariante berücksichtigt werden müssen. Im voran genannten Beispiel führt etwa die frühere oder spätere Bereitstellung von Waren bei den Lieferanten zu einem größeren oder kleineren Spielraum in der Tourenplanung. Die dort getroffenen Entscheidungen wiederum

führen zu Planungsspielräumen in den Folgeprozessen, bis hin zum letzten Glied der Prozesskette (in unserem Beispiel der Hersteller als Empfänger des bestellten Materials).

Der Ablauf der Planung und Steuerung erfolgt im zeitlichen Verlauf durch die Interaktion der beteiligten Akteure. Es werden Informationen (etwa in Form von Planungsergebnissen) verteilt und Teilprozesse durch Auslöseereignisse angestoßen. Es stellt sich im Rahmen der Arbeit die Frage, in welcher Reihenfolge die beteiligten Akteure die individuellen Planungs- und Steuerungsaufgaben ausführen sollten und wann und in welcher Form der Informationsfluss umgesetzt werden sollte. Es erfolgt nun zunächst die Betrachtung eines sequentiellen Ablaufs, der als Ausgangslage für die weitere Entwicklung dient und in ähnlicher Form häufig in der Praxis vorzufinden ist. Im Anschluss wird auf eine Planung und Steuerung eingegangen, die in Teilen simultan verläuft und eine Interaktion der einzelnen Akteure vor der Ausführung der physischen logistischen Prozesse vorsieht. Aufbauend auf diesen Überlegungen erfolgt die Gestaltung der Architektur und der Dienste.

#### **4.1.2 Ablauf der Planung und Steuerung**

Bei der *sequentiellen* Planung und Steuerung folgt die Abfolge der Teilprozesse streng der vorgegebenen Reihenfolgevorgabe des Prozessmodells (vgl. Abb. 4.2). Es werden bei den einzelnen Akteuren zunächst die planerischen und die physischen Prozesse durchlaufen. Der erfolgreiche Abschluss wird durch Weitergabe einer Nachricht an den nachfolgenden Akteur propagiert und somit der nächste Teilprozess in der Prozesskette angestoßen. Das Planungs- und Ausführungsergebnis eines vorhergehenden Teilprozesses gibt den Handlungsspielraum des nachfolgenden Teilprozesses vor. In unserem Anwendungsbeispiel geben etwa Bereitstellungsmeldungen im Warenausgang des Lieferanten vor, wann diese frühestens in die Vorhol Touren der Vorlauf-Logistikdienstleister eingeplant werden können. Die erfolgreich ausgeführten Touren bilden die Grundlage für die Reihenfolgeplanung im Hub und die dort bereitgestellten Sendungen werden bei der Tourenplanung für den

Nachlauf berücksichtigt. Es zeigt sich, dass in jedem Teilprozess weitgehend unabhängig von den nachfolgenden Teilprozessen geplant und ausgeführt wird. Starke Abhängigkeiten bestehen hingegen zu den jeweils vorgelagerten Teilprozessen. Auf deren Informationsweitergabe muss für die Durchführung der eigenen Planung zunächst gewartet werden.

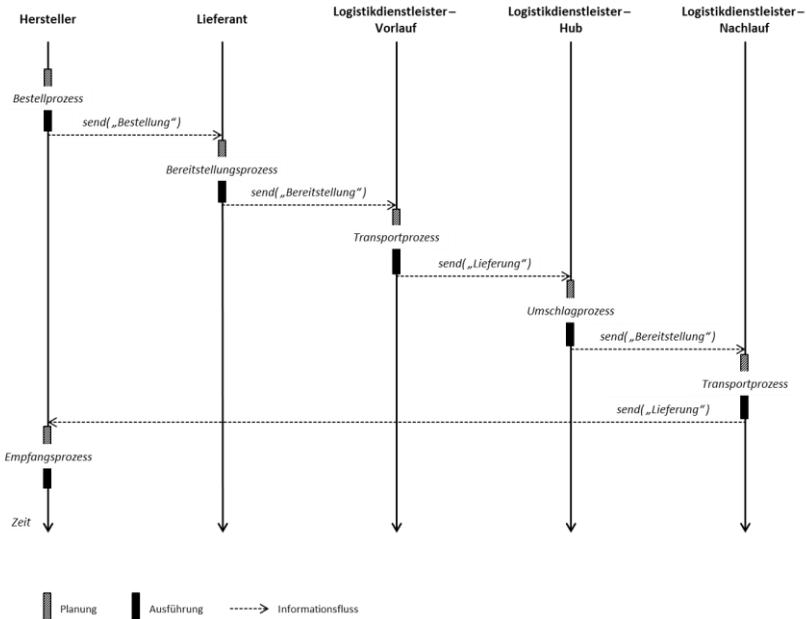


Abbildung 4.2: Interaktionsmodell für einen idealtypisch sequentiellen Planungsfall auf der höchsten Hierarchieebene im zeitlichen Verlauf

In der Praxis ist die sequentielle Form der Planung, Steuerung und Ausführung in logistischen Netzwerken weit verbreitet (Braun 2012). Den Ausgangspunkt bilden Bestellungen, die fixe Liefertermine enthalten und dadurch die gewünschte Ankunftszeit einer Sendung im Wareneingang des Herstellers für alle Akteure sichtbar zum Ausdruck bringen. Die einzelnen Akteure handeln mit dem Handlungsspielraum, den der vorangegangene Teilprozess vorgibt

und dem Ziel eines möglichst guten eigenen Prozessablaufs möglichst unter Einhaltung des Liefertermins, die sich aus der Bestellung des Herstellers ergibt. Ein vorgezogener Austausch von Informationen sowie eine in Teilen abgestimmte Planung zwischen einzelnen Akteuren sind zwar möglich, der Grundcharakter eines sequentiellen Verfahrensablaufs bleibt dabei jedoch meist erhalten.

Der Vorteil einer sequentiellen Planung und Steuerung gegenüber einem simultanen Vorgehen liegt in der einfachen Umsetzbarkeit. Es können auch geographisch weit gespannte Supply Chains über viele Unternehmensgrenzen hinweg mit vergleichsweise geringem Aufwand betrieben werden. Sofern die Abfolge des Gesamtprozess definiert ist, laufen die Teilprozesse nahtlos ineinander über und ermöglichen die lückenlose Überwachung von Auftragsstatus sowie Zeit- und Kosten-bezogener Kennzahlen. Der Kommunikationsaufwand ist dabei gering, da jeder Teilprozess den Auslöser für den Folgeprozess bildet und in der Regel jeweils nur zwei Akteure am Austausch von Informationen beteiligt sind. Die Umsetzung eines simplen Störungsmanagement ist ebenfalls möglich. So kann etwa bei der Abweichung von definierten Sollwerten beim Übergang von einem Teilprozess zu einem anderen der Ablauf unterbrochen werden und zur Eskalation führen. Im Lean-Umfeld verfolgen die Vorgehensweisen *Stop-Call-Wait* und *Andon* diesen Ansatz (Brenner 2015). Die Umsetzung setzt jedoch hohe Anforderungen an die Stabilität der Prozesse, die Plausibilität der geplanten Soll-Werte, die Organisation der Supply Chain sowie die Qualifikation und den Umsetzungswillen der beteiligten Mitarbeiter.

Nachteilig ist das sequentielle Vorgehen dahingehend, dass sich der Handlungsspielraum für jeden Akteur stets aus den abgeschlossenen vorgelagerten Teilprozessen ergibt. Ein Ausgleich zwischen den individuellen Vor- und Nachteilen für alternative Ablaufvarianten erfolgt nicht. Das gemeinsame Ziel (der Wunschliefertermin des Herstellers) ist simpel und starr formuliert und lässt wenig Spielraum für Optimierungsmaßnahmen in der Planung der Teilprozesse. Es ist schwer vorstellbar, dass im Ergebnis aus Gesamtsystemsicht

dem Effizienzoptimum nahekommende Lösungen erzielt werden. Vielmehr kommen großzügig dimensionierte Puffer (Zeit, Bestand oder Kapazität) zum Einsatz, um für die Einhaltung der Zielvorgaben des Herstellers zu sorgen. Wird dieser Spielraum ausgeschöpft, führt dies meist zu unstrukturierter Abstimmung auf der Ebene der Disponenten („Firefighting“).

Im Gegensatz zur sequentiellen Planung und Steuerung, wird bei einer der Ausführungsphase vorausgehenden *simultanen* Planung ab Bestellaufgabe durch den Hersteller ein kontinuierlicher Austausch von Informationen in Form von Anfragen sowie Planungszwischen- und -ergebnissen unter allen beteiligten Akteuren realisiert. Es laufen die planerischen Teilprozesse der Akteure parallel ab und werden im Anschluss koordiniert und zu einer gültigen Ablaufvariante integriert. Der Fokus liegt auf einer Abfolge der physischen Prozesse, die aus Sicht des Gesamtprozesses möglichst günstig ist. Die Vor- und Nachteile, die einzelne Akteure dabei in Kauf nehmen müssen, bedürfen eines Ausgleichs. Die physischen Prozesse laufen logischerweise wieder sequentiell ab, mit erneuter Planung bei festgestellten Abweichungen. Die Abbildung 4.3 gibt einen Überblick über einen idealtypisch simultan verlaufenden Planungsfall, der Übersichtlichkeit halber ohne weitere Plananpassungen während der Ausführungsphase.

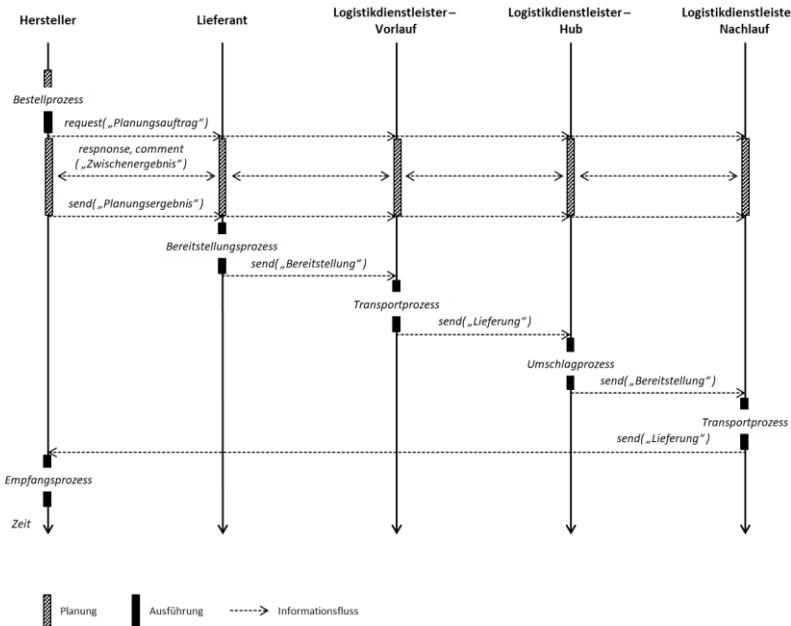


Abbildung 4.3: Interaktionsmodell für einen idealtypisch simultanen Planungsfall auf der höchsten Hierarchieebene im zeitlichen Verlauf

Die Vorteile einer integrierten Planung und Steuerung liegen in der Möglichkeit zur Akteur-übergreifenden Suche nach Ablaufvarianten, die einem Gesamtoptimum aus Gesamtprozesssicht möglichst nahekommen. Es können zeitliche Handlungsspielräume bereits zu Beginn der Planungsphase so unter den Teilprozessen aufgeteilt werden, dass lokale Verfahren zur Kostenminimierung bei der Lösungssuche die größtmögliche Gestaltungsmöglichkeit besitzen. Im Anschluss daran werden die lokalen Lösungen, zusammengeführt und etwaige lokale Kostenvorteile beziehungsweise -nachteile abgewogen und ausgeglichen. Es ist zu erwarten, dass bei Änderungen zur Laufzeit flexibler reagiert werden kann und dadurch auch die Ergebnisse der Steuerung im Vergleich zu einem streng sequentiellen Vorgehen zu besseren Ergebnissen aus Gesamtsystemsicht führen.

Die Nachteile der simultanen Vorgehensweise liegen in einem größeren Kommunikationsaufwand. Es ist ersichtlich, dass lokale Lösungen aus unterschiedlichen logistischen Teildisziplinen koordiniert werden müssen. Dazu ist, neben Vertrauen unter den beteiligten Akteuren, vor allem eine entsprechende IT-Infrastruktur erforderlich. Ebenso bedarf es einer regelmäßigen Abstimmung bezüglich eines Ausgleichs für lokale Vor- und Nachteile der gewählten Ablaufvarianten. Es muss vor der Implementierung zunächst folgenden Fragestellungen nachgegangen werden:

- In welchem Umfang bietet die simultane Planung und Steuerung für den Anwendungsfall Vorteile gegenüber einem sequentiellen Vorgehen mit trivialen Entscheidungsregeln oder Ablaufstrategien?
- Es ist zu erwarten, dass eine hohe Volatilität der Prozesse zu einem erhöhten Planungs- und Steuerungsbedarf führt. Bis zu welchem Grad können die simultanen Planungs- und Steuerungsverfahren (abhängig vom Automatisierungsgrad) noch sinnvoll betrieben werden?

### **4.1.3 Handlungsrahmen und Maßnahmenkatalog**

Im zweiten Kapitel dieser Arbeit wurden die Ursachen und Folgen von Volatilität in den Ablaufprozessen eines logistischen Netzwerks diskutiert. Im darauffolgenden dritten Kapitel wurden Möglichkeiten der Planung und Steuerung vorgestellt. Aufbauend auf diesen Überlegungen wird nun ein Maßnahmenkatalog abgeleitet, der die Grundlage für die weiteren Untersuchungen liefert. Der Entscheidungsraum des Anwendungsfalls wird dadurch handhabbar eingegrenzt und in einen nachvollziehbaren Experimentaufbau überführt. Auf Basis der definierten Maßnahmen auf der taktischen und operativen Ebene werden die entwickelten Konzepte implementiert und schließlich im Rahmen der Simulationsstudie evaluiert.

Der Maßnahmenkatalog unterteilt sich zum einen hinsichtlich des Planungshorizonts – taktisch und operativ – und zum anderen hinsichtlich der am

Gesamtprozess beteiligten Akteure. Dabei werden die verschiedenen Aufgaben der Logistikdienstleister der Einfachheit halber zusammengefasst, da diese dieselbe logistische Teildisziplin (Transportlogistik) adressieren. Es erfolgt eine Unterteilung des Maßnahmenkatalogs in die Teilprozesse des Gesamtprozess (vgl. Gliederung des Prozessablaufs in Abb. 4.1). Die einzelnen Maßnahmen werden im Zuge der Entscheidungsfindung hinsichtlich Kosten und Nutzen beurteilt, gegeneinander abgewogen und im letzten Schritt eingeleitet. Dazu müssen die zu treffenden Entscheidungen in den entsprechenden Modellen parametrisiert werden.

Betrachten wir zunächst die Maßnahmen auf der taktischen Ebene. Das Ziel in diesem zeitlichen Planungshorizont ist es, einen kostengünstigen und dennoch ablaufsicheren Systemzustand zu erzeugen. Dazu können Puffer, in Form von Bestand, Kapazität oder zeitlichen Reserven bei der Auftrags Erfüllung vorgesehen werden oder Aufträge nach bestimmten Kriterien schneller durch den Prozess geführt werden. Im Rahmen eines *Bestandsmanagements* haben die Hersteller die Möglichkeit, die Bestellparameter einer Bestellpolitik zu ändern und somit Einfluss auf die Bestellmenge sowie die Bestellfrequenz zu nehmen. Beim *Bestellmanagement* erfolgt die Priorisierung von Auftragsklassen. Dieses Merkmal wird im Modell je Materialnummer fix vergeben und führt dazu, dass eine bevorzugte Berücksichtigung in allen zu durchlaufenden Teilprozessen erfolgt. Die Logistikdienstleister können im Zuge des *Transportmanagement* über die zur Verfügung stehende Kapazität an Transportmitteln entscheiden, die dann bei der operativen Planung von Touren berücksichtigt werden können.

Auf der operativen Ebene haben die Hersteller im Zuge des *Bestellprozesses* die Möglichkeit, einzelne Aufträge mit einem Priorisierungsmerkmal zu versehen und bevorzugt durch den Gesamtprozess zu führen. Die Lieferanten können beim *Bereitstellungsprozess* durch die Entscheidung über die Bearbeitungsreihenfolge der eingehenden Bestellungen Einfluss nehmen. Im Zuge der *Transportprozesse* des Vorlaufs und des Nachlaufs können die Logistikdienstleister im Rahmen der Tourenplanung über die Zuordnung der Aufträge

zu Touren sowie die Reihenfolge der Be- und Entladevorgänge entscheiden. Die Logistkdienstleister in der Funktion der Hubbetreiber entscheiden beim *Umschlagprozess* über die Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge. Zu guter Letzt können die Hersteller beim *Empfangsprozess* Einfluss über Änderung der Bearbeitungsreihenfolge von Aufträgen nehmen oder im *Zielprozess* durch die Verwendung von alternativem Material die Dringlichkeit der offenen Bestellungen reduzieren.

Die Tabelle 4.1 liefert einen Gesamtüberblick über die betrachteten Maßnahmen auf der taktischen und operativen Ebene. Die Entscheidungsfindung kann in einer sequentiellen oder teilweise simultanen Abfolge erfolgen. Es können einfache regelbasierte Verfahren oder Methoden der mathematischen Optimierung zur Lösung der Entscheidungsprobleme genutzt werden. Auf die Gesamtarchitektur des Konzepts sowie die verwendeten und entwickelten Verfahren zur Planung und Steuerung wird im weiteren Verlauf des vierten Kapitels eingegangen.

Prozesse		Akteure		
Ebene	Teilprozess	Lieferant	Logistikdienstleister	Hersteller
Taktisch	Bestandsmanagement			Bestellparameter ändern
	Bestellmanagement			Aufträge statisch priorisieren
	Transportmanagement		Transportkapazität ändern	
Operativ	Bestellprozess			Aufträge dynamisch priorisieren
	Bereitstellungsprozess	Bearbeitungsreihenfolge ändern		
	Transportprozess Vorlauf		Tourzuordnung und -reihenfolge ändern	
	Umschlagprozess Hub		Bearbeitungsreihenfolge ändern	
	Transportprozess Nachlauf		Tourzuordnung und -reihenfolge ändern	
	Empfangsprozess			Bearbeitungsreihenfolge ändern
	Folgeprozess			Alternatives Material verwenden

Tabelle 4.1: Übersicht der betrachteten Maßnahmen

## **4.2 Modelle und Verfahren zur Planung und Steuerung**

Das folgende Unterkapitel enthält die Beschreibung der Modelle und Verfahren, die zur Umsetzung einer kooperativen Planung und Steuerung in logistischen Netzwerken im Konzept erforderlich sind. Es wird dabei zunächst auf die Entwicklung eines Modells zum Umgang mit Zeitpunkten und -räumen entlang des Gesamtprozesses sowie der Berechnung von zeitbezogenen Größen eingegangen. Im Anschluss werden die Kostenaspekte in einem Prozesskostenmodell abgebildet. Dies dient als Grundlage für die Entwicklung von Kostenzielen, die im Rahmen der Planung und Steuerung bestmöglich erfüllt werden sollen. Auf die Gewichtung und Hierarchie von Teilzielen und die Überführung in ein Gesamtziel wird anschließend eingegangen. Dies zusammen bildet schließlich die Basis für eine modellbasierte Entscheidungsfindung.

### **4.2.1 Prozesszeitbewertung**

Um eine konsistente Ablauffolge des Gesamtprozess über alle Akteure sicherzustellen, muss ein geeigneter Umgang mit den Zeitpunkten und Zeiträumen für sämtliche Teilprozesse erfolgen. Abbildung 4.4 zeigt das abgeleitete Prozesszeitmodell aus Auftragsicht. Darin ist definiert und bezeichnet, wann ein Prozessabschnitt beginnt und endet und welche Zeitabschnitte sich dazwischen befinden.

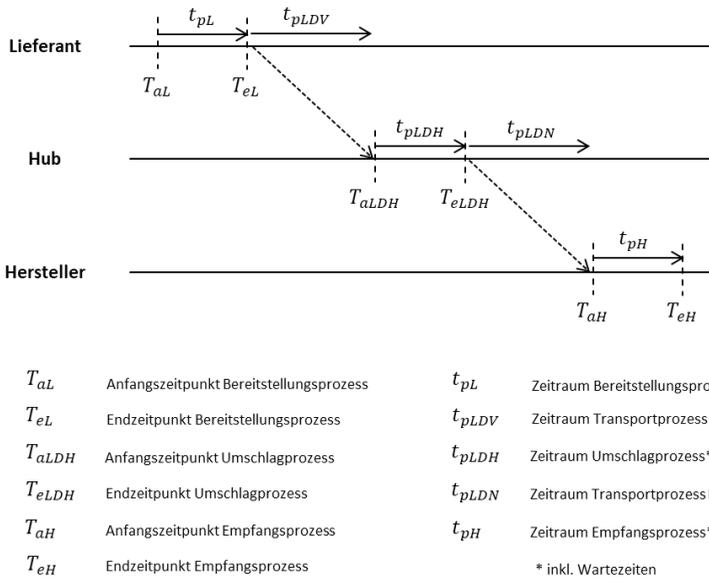


Abbildung 4.4: Prozesszeitmodell aus Auftragsicht über die Zeit

Im Prozesszeitmodell werden die ortsgebundenen Teilprozesse (also bei den Lieferanten, Hub-Logistikdienstleistern und Herstellern) mit Start- und Endzeitpunkten versehen. Die Transportvorgänge werden als Übergangsprozesse interpretiert, die den Auftrag zur nächsten Örtlichkeit überführen und dort den folgenden Teilprozess beginnen lassen. undefinierte Zeitlücken gibt es im Modell nicht, da mögliche Wartezeiten in den Zeiträumen enthalten sind. Es gelten die in Tabelle 4.2 beschriebenen einheitlichen Bedeutungen der Zeichen, gefolgt von oder vorangestellt mit einer eindeutigen Kurzbezeichnung des jeweiligen Teilprozesses.

<b>Zeichen</b>	<b>Bedeutung</b>
T	Zeitpunkt
t	Zeitraum
a	Beginn eines Teilprozess
e	Ende eines Teilprozess
p	Zeitraum eines Teilprozess
Akt	Aktueller Zeitpunkt oder Zeitraum im Modell
Prog	Prognostizierte Zeitgröße
Plan	Geplante Zeitgröße
Ist	Tatsächlich realisierte Zeitgröße
PAbw	Terminabweichung zwischen Plan- und Prognose-Größe
IAbw	Terminabweichung zwischen Plan- und Ist-Größe
Tol	Tolerierte Abweichung
Tol,O	Oberes Toleranzmaß
Tol,U	Unteres Toleranzmaß

Tabelle 4.2: Bedeutung der Zeichen im Prozesszeitmodell

Auf dieser Grundlage können zeitliche Berechnungen vorgenommen werden und zeitbezogene Größen durch die Kombination mehrerer Einzelgrößen abgeleitet und für die Abschätzung und Bewertung von Dringlichkeit oder Nutzen einzelner Ablaufvarianten herangezogen werden. Es sind im Konzept für den *operativen Zeithorizont* die nachfolgend beschriebenen Zeitgrößen relevant:

- Prognostizierte Zeitpunkte können mit den ursprünglichen Planungsergebnissen abgeglichen werden, um daraus eine Ermittlung der *Terminabweichung* zwischen Prognose- und Plan-Werten zu ermöglichen. Es gilt also folglich am Beispiel des letzten Anfangszeitpunkts des Empfangsprozesses (das entspricht dem Wareneingang beim Hersteller):

$$PAbw, T_{aH} = Prog, T_{aH} - Plan, T_{aH} \quad (4.1)$$

- Die *tolerierte Terminabweichung*, auf der Grundlage von Prognosedaten, setzt sich zusammen aus der Planzeitgröße als Nennwert sowie einem oberen und unteren Toleranzmaß:

$$Tol, PAbw, T_{aH} = Plan, T_{aH} + \frac{Tol, O, T_{aH}}{Tol, U, T_{aH}} \quad (4.2)$$

- Die *Estimated Time Enroute* (ETE) gibt den zeitlichen Spielraum an, der aktuell bis zum Erreichen eines prognostizierten Zeitpunkts im Prozesszeitmodell noch zur Verfügung steht. In unserem Beispiel ist die relative Zeitangabe ETE also folglich:

$$ETE, T_{aH} = Prog, T_{aH} - Akt, T \quad (4.3)$$

- Die *Slack Time* (ST), aus dem Produktionsumfeld auch als Schlupf bekannt (Lödding 2016), gibt den Zeitraum an, der zwischen dem geplanten und dem prognostizierten Zeitpunkt im Prozesszeitmodell liegt und nicht für die Auftragsbearbeitung berücksichtigt werden muss. Negative Werte entsprechen einer Terminabweichung zwischen Plan- und Prognosewert. Es gilt folglich in unserem Beispiel:

$$ST, T_{aH} = Plan, T_{aH} - Prog, T_{aH} \quad (4.4)$$

Die Ermittlung eines prognostizierten Zeitpunkts kann durch die Summation der Einzelwerte für die noch zu durchlaufenden Zeiträume des Gesamtprozess zum aktuellen Zeitpunkt erfolgen. Dabei wird unterstellt, dass die kleinteilige Betrachtung der Teilprozesse zu ausreichend genauen Vorhersagen führt und diese in geeigneter Weise verteilt und zusammengeführt werden können. Vorausschauende Planungssysteme können auf der Grundlage von Sendungsverfolgungsdaten, Verkehrsinformationen oder weiteren Daten aus der Ausführungsphase in Kombination mit Stammdaten aus der jeweiligen Anwendungsdomäne eine kontinuierliche Berechnung der prognostizierten Zeitpunkte des Prozesszeitmodells vornehmen. In unserem Beispiel errechnet sich der Prognosewert wie folgt:

$$Prog, T_{aH} = Akt, T + \sum_{Akt, t_p}^{t_{pLDN}} Prog, t_p \quad (4.5)$$

Für den *taktischen Zeithorizont* werden im Konzept zeitliche Kenngrößen benötigt, die eine Zusammenführung und Bewertung der tatsächlich realisierten Zeiten der Aufträge über einen längeren ermöglichen. Dazu müssen die Daten der Ausführungsphase dokumentiert und für weitere Analysen in Datenbanken bereitgestellt werden. Eine erste Einschätzung geben dabei grundlegende statistische Auswertungen, wie etwa eine Analyse von Mittelwert und Varianz oder der Test auf statische Verteilungen (vgl. Fahrmeir et al. 2016 oder Law 2015).

### 4.2.2 Prozesskostenbewertung

Bei der Suche nach einer Ablaufvariante mit möglichst geringen Gesamtkosten muss der voran beschriebene Gesamtprozess des skizzierten Anwendungsfalls zunächst in die einzelnen Kostenbestandteile zerlegt werden. Dadurch wird ersichtlich, welche Kostenziele die Akteure in den einzelnen Teilprozessen verfolgen. Es ergeben sich dabei zum Teil divergierende Ziele der Akteure, die bei der Lösungssuche berücksichtigt werden müssen. Um diese Abhängigkeiten greifbar zu machen und eine übergeordnete Planung und Steuerung zu ermöglichen, werden im Folgenden die kostenrelevanten Zusammenhänge des vorgestellten Maßnahmenkatalogs abgebildet. Dabei wird zunächst die Gesamtkostenfunktion aufgestellt, um die Perspektive des theoretischen Gesamtoptimums abzubilden. Im Anschluss erfolgen die Aufstellungen der Kostenfunktionen der einzelnen Teilprozesse und die Beschreibung der Wirkzusammenhänge. Die Betrachtung erfolgt jeweils aus Sicht eines einzelnen Auftrags für eine Planungsperiode.

Über den *Gesamtprozess* ergibt sich für die Maßnahmen des operativen Zeithorizonts folgende Gesamtkostenfunktion als Summation der Kosten der einzelnen Teilprozesse:

$$K_{Ges} = K_{H,Best} + K_L + K_{LDV} + K_{LDH} + K_{LDN} + K_{H,WE} + K_{H,Ziel} \quad (4.6)$$

mit:

$K_{Ges}$	Kosten über den Gesamtprozess
$K_{H,Best}$	Kosten für den Bestellprozess beim Hersteller
$K_L$	Kosten für den Bereitstellungsprozess beim Lieferanten
$K_{LDV}$	Kosten für den Transportprozess des Vorlaufs beim LDL
$K_{LDH}$	Kosten für den Umschlagprozess im Hub beim LDL
$K_{LDN}$	Kosten für den Transportprozess des Nachlaufs beim LDL
$K_{H,WE}$	Kosten für den Empfangsprozess beim Hersteller
$K_{H,Ziel}$	Kosten für den Prozessabschluss beim Hersteller

Der Hersteller hat die Möglichkeit, Bestellungen so zu priorisieren, dass eine bevorzugte Behandlung über den gesamten Prozess erfolgt. Die Maßnahmenkosten für den *Bestellprozess* lassen sich wie folgt auflösen:

$$K_{H,Best} = ((c_{Best,Prio,int} + c_{Best,Prio,ext}) * y_{H,Best,Prio}) \quad (4.7)$$

mit:

$c_{H,Best,Prio,int}$	Kostensatz für die Priorisierung einer Bestellung (intern)
$c_{H,Best,Prio,ext}$	Kostensatz für die Priorisierung einer Bestellung (extern)
$y_{H,Best,Prio}$	Entscheidung über die Priorisierung einer Bestellung

Die Priorisierungskosten entstehen, weil interne und externe Planungsaufwände für die Abweichung von der Standardbestellung auf den einzelnen Auftrag umgelegt werden müssen. Diese zusätzlichen Mehraufwände werden als zuvor definierter Mehrkostensatz abgebildet. Es ist lokal kostengünstiger, wenn Aufträge nicht priorisiert werden. Die Anzahl der priorisierten Bestellungen im System ist nicht kontingentiert. Einschränkungen ergeben sich erst bei der physischen Ausführung unter Kapazitätsrestriktionen der folgenden Teilprozesse, da ab einem bestimmten Anteil weitere Priorisierungen verständlicherweise nicht mehr zur gewünschten Durchlaufzeitverkürzung führen können.

Die Bewertung von Ablaufvarianten für den *Bereitstellungsprozess* erfolgt für unterschiedliche Reihenfolgen der Auftragsbearbeitung über alle Arbeitsstationen des Teilprozesses. Es erfolgt eine Abwägung von fixen und variablen Priorisierungskosten, Strafkosten für Planverfehlung und Kosten für Brachzeiten der Ressourcen. Die Maßnahmenkosten aus Sicht eines einzelnen Auftrags ergeben allgemein formuliert folgende Kostenfunktion:

$$\begin{aligned}
 K_L = & (c_{L,Plan} * n_{L,Plan}) + (c_{L,Vorz} * t_{L,Vorz}) \\
 & + (c_{L,PAbw,TeL} * PAbw, TeL) \\
 & + (c_{L,Brach} * t_{L,Brach})
 \end{aligned}
 \tag{4.8}$$

mit:

$c_{L,Plan}$  Kostensatz für die (Neu-)Planung der Bereitstellungsreihenfolge

$c_{L,Vorz}$  Kostensatz für das Vorziehen eines Auftrags um eine Zeiteinheit

$\begin{cases} c_{L,PAbw,TeL} < 0 \\ c_{L,PAbw,TeL} > 0 \end{cases}$  Sprungfixer Kostensatz für das Verfehlen des Plan-Endtermins

$c_{L,Brach}$	Kostensatz für die Nichtnutzung einer Ressource je Zeiteinheit
$n_{L,Plan}$	Anzahl der Planungsvorgänge zwischen Auftragseingang und Ausführung
$t_{L,Vorz}$	Anzahl der durch Neuplanung vorgezogenen Zeiteinheiten des Auftrags
$PAbw, T_{eL}$	Abweichung zwischen Plan-Endtermin und prognostiziertem Endtermin
$t_{L,Brach}$	Anzahl der durch Neuplanung nichtgenutzten Zeiteinheiten einer Ressource

Der Lieferant ist bestrebt, Brachzeiten so weit wie möglich zu vermeiden und vereinbarte Plan-Endtermine einzuhalten, sofern eine Verfehlung mit Pönalen belegt ist. Falls für die Neuplanung und die Verschiebung von Aufträgen in der Reihenfolge Kosten entstehen, wird der Lieferant diese nach Möglichkeit zu vermeiden versuchen. Die Abläufe des *Umschlagsprozesses* beim Hub-Logistikdienstleister sowie des *Empfangsprozesses* beim Hersteller lassen sich nach identischem Schema bewerten und werden nicht gesondert aufgeführt. Alle drei Teilprozesse verfügen über Abhängigkeiten zu den Transportprozessen und müssen zur Koordination Abhol- bzw. Anlieferzeitfenster als Planungsergebnis liefern.

Die Kosten für die *Transportprozesse* des Vorlaufs und des Nachlaufs werden nach identischem Schema bewertet und lassen sich über die folgende Kostenfunktion abbilden (Nomenklatur am Beispiel des Vorlaufs):

$$\begin{aligned}
 K_{LDV} = & (c_{LDV,Plan} * n_{LDV,Plan}) \\
 & + (c_{LDV,PAbw,TeLDV} * PAbw,TeLDV) \\
 & + (c_{LDV,Fix} * p_{LDV,Fix}) \\
 & + (c_{LDV,Weg} * p_{LDV,Weg}) + (c_{LDV,Zeit} \\
 & * p_{LDV,Zeit})
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

mit:

$c_{LDV,Plan}$	Kostensatz für die (Neu-)Planung der Tourreihenfolge
$\begin{cases} c_{L,PAbw,TeLDV < 0} \\ c_{L,PAbw,TeLDV > 0} \end{cases}$	Sprungfixer Kostensatz für das Verfehlen des Plan-Endtermins
$c_{LDV,Fix}$	Kostensatz für die anteilige Nutzung eines Transportmittels
$c_{LDV,Weg}$	Kostensatz für die anteilig zurückgelegte Wegstreckeneinheit eines Transportmittels
$c_{LDV,Zeit}$	Kostensatz für die anteilig genutzte Zeiteinheit eines Transportmittels
$n_{LDV,Plan}$	Anzahl der Planungsvorgänge zwischen Auftragseingang und Ausführung
$PAbw,TeLDV$	Abweichung zwischen Plan-Endtermin und prognostiziertem Endtermin
$p_{LDV,Fix}$	Anteil an der Nutzung eines Transportmittels

$p_{LDV,Weg}$  Anteil an der zurückgelegten Wegstrecke eines Transportmittels

$p_{LDV,zeit}$  Anteil an der Nutzungszeit eines Transportmittels

Das Ziel der Transportplanung ist es, mit einem möglichst geringen Einsatz von Transportmitteln und möglichst kurzen Wegstrecken und Einsatzzeiten die Sendungen fristgerecht den Bestimmungszielen zuzuführen. Durch die gewählte Tourzuordnung der Aufträge und Reihenfolge der Fahrten ergeben sich fixe und variable Kosten für den Einsatz der Transportmittel. Auch bei diesem Teilprozess haben Umplanungen, bei entsprechender Berücksichtigung in den Kostensätzen, einen negativen Einfluss auf die Gesamtkosten und werden nach Möglichkeit vermieden. Flexibilität hat demnach ihren Preis. Die Transportprozesse haben Abhängigkeiten zu den übrigen Prozessen, die durch Abhol- und Ablieferzeitfenster in der Planung und Steuerung formuliert und berücksichtigt werden müssen. Durch den Zeitpunkt der geplanten Ablieferung einer Sendung ergibt sich für diesen Auftrag der Handlungsspielraum für die nachfolgenden Prozesse.

Im *Zielprozess* erfolgt schließlich auf der Seite des Herstellers die abschließende Bewertung von Leistung und Kosten des Gesamtprozesses, nachdem ein Auftrag diesen planungsseitig vollständig durchlaufen hat. Die Kostenfunktion des Herstellers ergibt sich wie folgt:

$$K_{H,Ziel} = (c_{H,Altmat} * y_{H,Altmat}) + |(c_{LDV,PAbw,TeH} * PAbw,TeH)| \quad (4.10)$$

mit:

$c_{H,Altmat}$  Kostensatz für die Verwendung von Alternativmaterial

$\begin{cases} C_{H,PAbw,TeH} < Tol \\ C_{H,PAbw,TeH} > Tol \end{cases}$  Sprungfixer Kostensatz für das Verfehlen des Plan-Endtermins

$y_{H,Altmat}$  Entscheidung über die Verwendung von Alternativmaterial

$PAbw, TeH$  Abweichung zwischen Plan-Endtermin und prognostiziertem Endtermin

Die Entscheidung zur Verwendung von alternativem Material findet an dieser Stelle Berücksichtigung. Sofern in den übrigen Teilprozessen trotzdem Kosten entstanden sind, gehen diese in die Gesamtkostenbetrachtung mit ein. Die Bewertung von Kosten und Nutzen aller ergriffenen Maßnahmen über den Gesamtprozess zur Beschleunigung oder zur Zurückstellung einzelner Aufträge basiert auf einem Kostenmodell zum Prozessabschlusszeitpunkt (vgl. Abb. 4.5). Es werden dazu obere und untere Toleranzschwellen sowie Kostenverläufe für verfrühte und verspätete Lieferungen (außerhalb der Toleranzgrenzen) definiert. Dieses Modell ist nicht starr, sondern wird vielmehr dynamisch auf der Grundlage des aktuellen Systemzustands ermittelt. Es ist die Herausforderung, die aktuellen Bedarfe, den Lagerbestand sowie weitere operative Kennzahlen zur Bestimmung der Toleranzgrenzen im Kurzfristhorizont zu ermitteln und heranzuziehen. Das abgebildete Beispiel zeigt durch die flachere Steigung der Kostenfunktion unterhalb des unteren Toleranzbereichs eine höhere Akzeptanz von verfrühten Anlieferungen im Vergleich zu Anlieferungen oberhalb der oberen Toleranzschwelle.

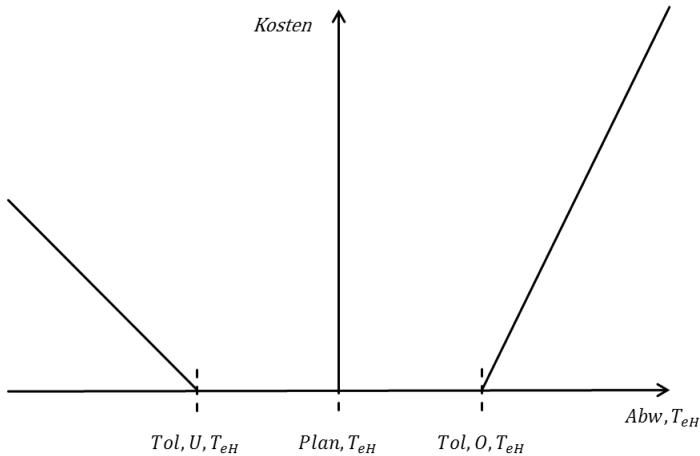


Abbildung 4.5: Modell zur monetären Bewertung der Ankunftszeit eines Auftrags im Ziel

Wie im zweiten Kapitel erläutert, hängt die Bewertung des Systemzustands maßgeblich von der zu Grunde liegenden strategischen Zielvorstellung ab. Während Supply Chains von funktionalen Produkten einer Strategie der maximalen Kosteneffizienz folgen werden, können für innovative Produkte vielmehr Aspekte der maximalen Versorgungssicherheit der Kunden eine Rolle spielen. Unterschiedliche resultierende Anforderungen (etwa an die Durchlaufzeit von Aufträgen) haben auch eine Auswirkung auf die Wahl von Maßnahmen zur Planung und Steuerung der Prozesse. Es ist daher erforderlich, die Zielvorgaben eines logistikverantwortlichen Anwenders so zu übersetzen, dass diese von den eingesetzten Modellen bei der Bewertung und Entscheidung berücksichtigt werden können. Dabei müssen bereits in der frühen Phase der Systemkonfiguration die kooperativen Aspekte des Verfahrens berücksichtigt werden und auf der taktischen Ebene die Ablaufregeln und Berechnungsvorschriften für die Umsetzung auf der operativen Ebene vorgegeben werden. Über die Kostensätze sollte partnerübergreifend Konsens bestehen, entweder durch direkte Abstimmung oder die Akzeptanz gegenüber eines Preisbildungsverfahrens.

### 4.2.3 Einleitung von Maßnahmen

Das Auslöseereignis für die Durchführung einer initialen Planung ist die Materialbestellung des Herstellers beim Lieferanten. Mit der Übergabe des Auftrags in das System ergibt sich die Notwendigkeit zur Bestimmung einer gültigen und möglichst kostenoptimalen Ablaufvariante für die Ausführung der physischen Logistikprozesse. Die weiteren Planungs- und Steuerungseingriffe bedürfen weiterer Auslöseereignisse oder -regeln. Es gibt zwei Möglichkeiten, eine Neuplanung anzustoßen. Bei der *periodendynamischen Disposition* (vgl. Gudehus 2012a) wird in zuvor definierten Intervallen eine Neuplanung, unter Berücksichtigung erfolgter Änderungen im Vergleich zur Ausgangslage, durchgeführt. Diese Regelplanungen können beispielsweise täglich, stündlich oder in noch kürzeren Zeitabständen unabhängig vom Eintritt bestimmter Ereignisse durchgeführt werden. Dies macht vor allem dann Sinn, wenn Änderungen mit hoher Wahrscheinlichkeit sowieso zu erwarten sind oder sich eine ereignisbasierte Neuplanung aufgrund einer geringen Entdeckungswahrscheinlichkeit nicht anbietet.

Zur *ereignisdynamischen Disposition* müssen definierte Auslöseereignisse eintreten und detektiert werden. Es kommen verschiedene Möglichkeiten in Betracht, um die Bewertung und Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Maßnahmen einzuleiten:

- Bei der *manuellen Auslösung* sorgt der Anwender für den Anstoß von Planungs- und Steuerungsvorgängen. Dies ist sinnvoll, wenn unstrukturierte oder nicht automatisiert erfassbare Informationen vorliegen und durch eine entsprechende Eingabe berücksichtigt werden sollen (etwa, wenn bei Ausführung der physischen Logistikprozesse Verzögerungen eintreten oder Disponenten über kurzfristige Abstimmungsergebnisse verfügen).
- Bei der *automatisierten Auslösung* führen systemseitig abbildbare Ereignisse zur Planung und Steuerung. Es kann sich um simple Einzelergebnisse wie das Hinzufügen weiterer Aufträge oder das Überschreiten

eines zeitlichen Schwellenwerts handeln. Es können allerdings auch die Überwachung von Massendaten und komplexe Regeln zu Auslöseereignissen führen. Die informationswissenschaftliche Disziplin des *Complex Event Processing* liefert dazu Lösungsansätze (Bruns und Dunkel 2015).

Es wird im Rahmen des Konzepts keine der vorgestellten Varianten exklusiv präferiert. Vielmehr muss für den konkreten Anwendungsfall eine sinnvolle Kombination aus automatisierten Analyse- und Bewertungsmethoden und manuellen Interaktionsfunktionen geschaffen werden. Kriterien für die Auswahl sind die Zuverlässigkeit, Nachvollziehbarkeit und Flexibilität der Verfahren sowie der Aufwand für Einrichtung und Betrieb im Verhältnis zum Nutzen. In den Simulationsstudien basiert die Bewertung der Dringlichkeit auf einem Vergleich zwischen der erwarteten Ankunftszeit am letzten Zeitpunkt des Prozesszeitmodells sowie Toleranzgrenzen, die dynamisch zur Laufzeit auf Grundlage der aktuellen Lagerbestandsreichweite ermittelt werden. Die Überwachung erfolgt kontinuierlich und die Auslösung der Planung und Steuerung ist ereignisdynamisch.

Die Abbildung 4.6 zeigt die Bausteine der einzelnen Verfahrensebenen des Konzepts. Auf der lokalen Planungsebene werden die für die Teilprozesse präferierten Lösungen sowie Alternativlösungen ermittelt. Dabei kommen auf den jeweiligen Anwendungsfall spezialisierte Verfahren zum Einsatz. Die erzeugten Ergebnisse der unterschiedlichen Anwendungsdomänen werden auf der Aggregationsebene in vergleichbare Zeit- und Kostengrößen überführt und einer übergeordneten Koordinationsebene zur Verfügung gestellt. Dort werden die Bewertungen der machbaren Ablaufvarianten vorgenommen und das Entscheidungsproblem übergeordnet und abschließend gelöst. Wie viele Prozessbausteine jeweils an der Lösungsfindung beteiligt sind, hängt letztlich vom Fortschritt der einzelnen Aufträge ab.

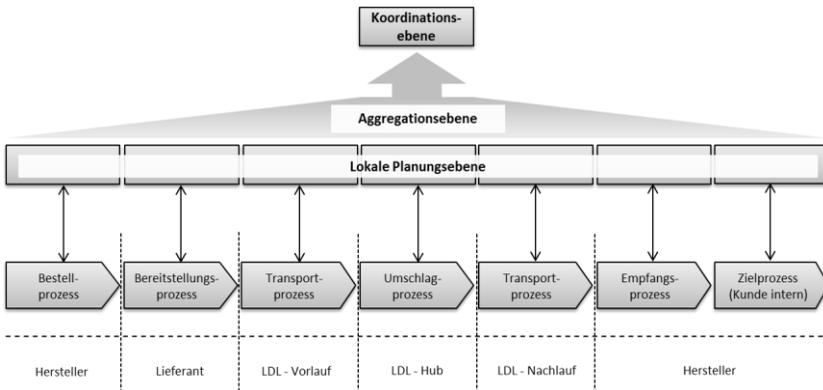


Abbildung 4.6: Verfahrensebenen für den operativen Zeithorizont bis zur Entscheidungsfindung

Auf der *lokalen Planungsebene* erfolgt für jeden Teilprozess separat und unabhängig von den übrigen Akteuren die Generierung und Bewertung von Ablaufvarianten. Die für das weitere Verfahren zur Disposition stehenden Aufträge werden ausgewählt. Es werden dabei zunächst alle Aufträge ausgewählt, die in der vorausgegangenen Ablaufplanung berücksichtigt wurden. Sofern sich in der Zwischenzeit weitere Aufträge in das System gelangt sind, können diese ebenfalls hinzugefügt werden. Die lokal kostenminimale Ablaufvariante (im Sinne einer mit den zur Verfügung stehenden Verfahren erzeugbaren Lösung) wird ermittelt. Es können sowohl Optimierungsverfahren als auch heuristische Ablaufregeln zum Einsatz kommen. Die Auswahl der Verfahren obliegt den Entscheidern der jeweiligen Anwendungsdomäne. Für Aufträge mit erkannter Dringlichkeit werden alternative Ablaufvarianten ermittelt und kostenmäßig bewertet. Dazu werden die betroffenen Aufträge mit einem Priorisierungsmerkmal versehen, das bei der erneuten Ausführung der Lösungsverfahren berücksichtigt wird. Bei mehreren Aufträgen erfolgt die Bildung einer Rangfolge über das Dringlichkeitsmaß.

Auf der *Aggregationsebene* erfolgen das Zusammenführen der lokalen Planungsergebnisse sowie die Ermittlung gültiger Ablaufvarianten als Ausgangslage für die spätere Bewertung und Entscheidung. Die Ergebnisse der lokalen Planungsebene werden übernommen. Dazu werden die Start- und Endzeitpunkte je Teilprozess über alle Ablaufvarianten und alle Einzelaufträge zusammengestellt. Die möglichen Ablaufvarianten werden auf die zeitliche Ablauffähigkeit hin geprüft. Es werden für jeden Auftrag die Anfangs- und Endzeitpunkte der benachbarten Teilprozesse verglichen und ungültige Lösungen aus dem weiteren Verfahren ausgeschlossen. Sofern keine gültige Ablaufvariante ermittelt werden kann, bricht das Verfahren ab. Auf die erkannten und als kritisch eingeschätzten Abweichungen kann in diesem Fall nicht mit den zur Verfügung stehenden Mitteln automatisiert reagiert werden und es ist ein menschlicher Experte zur weiteren Lösungssuche nötig.

Die *Koordinationsebene* übernimmt die Bewertung der noch zur Verfügung stehenden Ablaufvarianten und trifft eine Entscheidung über alle Teilprozesse. Die Festlegung der Kostenziele muss Gegenstand einer übergeordneten Abstimmung sein und mündet in der Festlegung eines gemeinsamen Modells zur Prozesskostenbewertung. Für die verbliebenen Ablaufvarianten werden die prognostizierten Endtermine der Aufträge ( $T_{eH}$ ) ermittelt und die verfrühte oder verspätete Ankunft im Vergleich zur initialen Lösung wird auf der Grundlage dieses Kostenmodells mit Toleranzgrenzen aus Sicht des Empfängers monetär bewertet (vgl. Abb. 4.5). Die Kostenbausteine der einzelnen Teilprozesse werden für jede Ablaufvariante zu den Gesamtkosten  $K_{Ges}$  zusammengeführt. Anschließend werden die Lösungen in eine Rangfolge gebracht und die Ablaufvariante mit den niedrigsten Kosten wird ausgewählt und an die Akteure propagiert. Um einen Ausgleich zwischen den Akteuren herzustellen, können die Mehrkosten und Einsparungen im Vergleich zu einer Initiallösung nach einem zuvor abgestimmten Vorgehen durch Ausgleichszahlungen zwischen den Partnern aufgeteilt werden.

Die lokalen Planungen erfolgen weitgehend autark unter Berücksichtigung der limitierenden Faktoren des einzelnen Akteurs und unter Anwendung der

zur Verfügung stehenden und auf den Anwendungsfall spezialisierten Lösungsverfahren. Die Suche nach einer zulässigen Ablaufvariante über den Gesamtprozess erfolgt im zweiten Schritt durch die Koordination der gefundenen Lösungen, indem die in Frage kommenden Alternativen auf globaler Ebene bewertet werden. Das Verfahren entspricht einer *kooperativen Planung und Steuerung*, da die Lösungsermittlung auf der Grundlage zuvor abgestimmter Bewertungsverfahren, Handlungsspielräume und Systemgrenzen erfolgt. Es wird über die verwendeten Prozesskosten- und Prozesszeitmodelle ein gemeinsames Verständnis über die Kosten und den Nutzen einer zeitlichen Verschiebung einzelner Aufträge entwickelt. Die ausgewählten Ablaufvarianten sind für alle Beteiligten nachvollziehbar und etwaige Vor- und Nachteile einzelner Partner können untereinander ausgeglichen werden.

Während die Maßnahmen auf der operativen Ebene auf eine Lösung von Entscheidungsproblemen für die tatsächlich im System befindlichen Aufträge abzielen, wird im taktischen Planungshorizont die Einstellung der Systemparameter für eine prognostizierte Auftragslast vorgenommen. Diese Planung beruht auf einer Kombination von bekannten und abgeschätzten Werten über Mengen, Kosten und Zeiten. Je besser die zukünftige Entwicklung der Ereignisse im System vorhergesagt werden kann, desto besser können die Parameter der taktischen Entscheidungsprobleme daran angepasst werden. Es ist daher sinnvoll, die Daten der Ausführungsphase konsequent für die Gewinnung von Informationen für zukünftige Planungsphasen zu nutzen. Über einen Abgleich von Soll- und Istwerten wird die Ursachenforschung von Abweichungen und Definition angepasster Ziele ermöglicht. Dies entspricht dem Grundgedanken von Lean.

In der eingangs dargestellten Prozesskette eines Beschaffungsprozesses ist die Durchlaufzeit der Teilabschnitte das zentrale Kriterium zu Einleitung einer kontinuierlichen Systemverbesserung. Unterstellen wir bei einer Abfolge von fünf Prozessschritten eine augenscheinlich hohe Termintreue von jeweils 95%, so beträgt die Termintreue über den Gesamtprozess nur noch  $0,95^5 = 0,77$ , also 77%. Bei hohen Termintreuewerten ist hingegen die Effizienz der

Prozesse zu hinterfragen. Es wird daher die Durchlaufzeit je Teilprozess und Auftrag erhoben und zur weiteren Analyse bereitgestellt. Es erfolgt dabei eine Unterteilung in eine Ausführungs- und eine Wartephase, um störungsverursachende oder ineffiziente Teilprozesse zu identifizieren.

#### **4.2.4 Komposition der Dienste**

Im Rahmen der Architekturgestaltung des entwickelten Ansatzes wird der Frage nachgegangen, wie die entwickelten Dienste orchestriert und choreographiert werden. Dies bildet die Grundlage für die spätere Implementierung in der Simulationsumgebung, kann aber auch als Grundlage bei einer möglichen Umsetzung in einem Realsystem dienen. Die Abbildung 4.7 zeigt die Hierarchie der Agenten sowie die Systematik zur Zuordnung von Diensten. Unter einem Dienst wird eine thematische Bündelung von Funktionen verstanden, die autark zusammenwirken und über Schnittstellen zu den übrigen Systemkomponenten die Ein- und Ausgabe von Daten ermöglichen. Die Nomenklatur orientiert sich an der Kurzbezeichnung der Akteure im Prozesszeitmodell.

Als prozessführende Instanz geben die ERP-Systeme der beteiligten Unternehmen den Rahmen für die Anwendung der Dienste vor, um inkonsistente Zustände zu vermeiden. Dezentrale Komponenten zur Planung und Steuerung sollen nicht als Ersatz für bestehende ERP-Funktionen dienen, sondern vielmehr die derzeit unzureichend abgebildeten Abschnitte des Beschaffungsprozesses durch maßgeschneiderte Funktionsbausteine ergänzen. Unterhalb der ERP-Ebene übernehmen Softwareagenten Aufgaben der Überwachung, Planung und Steuerung. Es werden alle beteiligten Akteure (Lieferanten, Logistikdienstleister und Hersteller) des Gesamtprozess durch eigene Agenten repräsentiert, so dass die individuellen Ziele und Verfahren zur Lösung der Entscheidungsprobleme adäquat abgebildet werden. Unterhalb der Akteurs-ebene übernehmen weitere Agenten Aufgaben. Hierarchisch unterhalb der Logistikdienstleister werden etwa die Transportmittel mit eigenen Diensten versehen. Die Aufträge werden bei der Bestellauslösung erzeugt und übernehmen Überwachungsfunktionen, in der hierarchischen Ordnung unterhalb

der Hersteller. Auf der höchsten hierarchischen Gliederungsebene übernimmt ein Broker die Kommunikation mit den übergeordneten Systemen. Aggregations- und Koordinationsaufgaben zwischen den einzelnen Akteuren können ebenfalls von diesem übernommen oder einem der anderen Agenten zugeordnet werden.

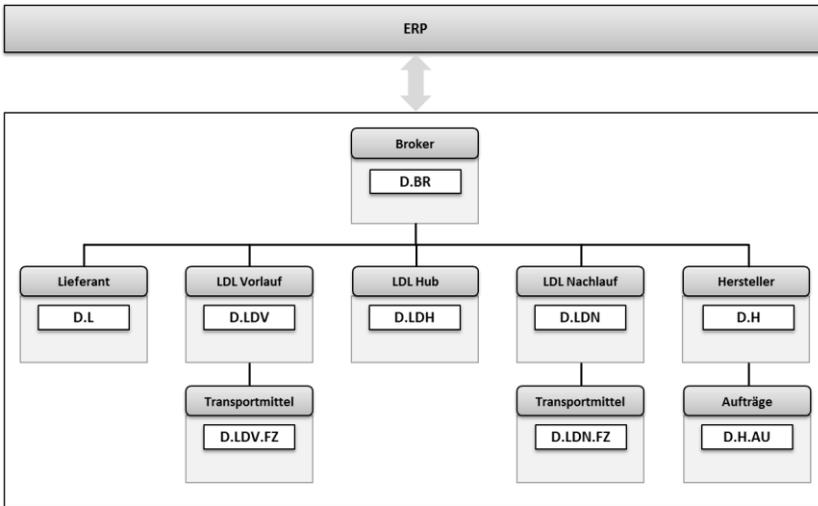


Abbildung 4.7: Hierarchie der Agenten und Zuordnung von Diensten

Dem Konzept liegen im Wesentlichen drei grundsätzliche theoretische Ansätze zugrunde, die in geeigneter Weise miteinander kombiniert werden. So handelt es sich bei der Suche nach angemessenen Maßnahmen innerhalb eines vorgegebenen Handlungsrahmens um ein *Entscheidungsproblem*, das durch die Vielzahl der beteiligten Akteure mit den jeweiligen Akteur-individuellen Prozessen aus mehreren Teilproblemen besteht und in der Gesamtbeurteilung eine *mehrstufige Struktur* aufweist. Die Umsetzung des verteilten Lösungsfindungsprozesses sowie die Interaktion der Akteure untereinander erfolgen durch den Ansatz einer *Multiagentensteuerung*. Diese wird schließlich in einer agentenbasierten Simulationsumgebung implementiert und

Experimenten unterzogen. Auf die Ausgestaltung der informationstechnischen Flüsse zwischen den Agenten wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen, da die Arbeit nicht darauf fokussiert. Es ist an dieser Stelle auf Möglichkeiten zur Nutzung standardisierter Kommunikationsprotokolle in Multiagentensystemen verwiesen (vgl. Wooldridge 2009). Das Konzept der kontinuierlichen Systemverbesserung folgt der Identifikation und nachhaltigen Beseitigung von Verschwendung gemäß eines *Lean-Ansatzes*.



## 5 Modellierung einer agentenbasierten Simulationsumgebung

In diesem Kapitel wird das Simulationsmodell beschrieben, das zur Untersuchung des Systemverhaltens eines logistischen Netzwerks unter stochastischen Einflüssen sowie der Evaluierung der entwickelten Modelle zur Planung und Steuerung dient. Es wird zunächst auf die Wahl eines geeigneten methodischen Ansatzes eingegangen. Anschließend wird die Simulationswürdigkeit der Aufgabenstellung aufgezeigt und die Wahl des agentenbasierten Ansatzes begründet. Im Anschluss werden der Modellaufbau, die wesentlichen Prozessabläufe sowie die Modellgrößen beschrieben.

### 5.1 Modellierungsansatz und Implementierung

Ein *System* ist nach Feess und Gillenkirch eine Ansammlung von Objekten und deren Eigenschaften, die durch Wechselbeziehungen miteinander in Verbindung stehen (Feess und Gillenkirch 2018). Der Nachbau eines solchen Systems wird als *Modell* bezeichnet. In seiner allgemeinen Modelltheorie nennt Stachowiak wesentliche Merkmale. So bilden Modelle ein Originalsystem ab und stellen eine Relation zu diesem her (Abbildungsmerkmal), abstrahieren ein Originalsystem als vereinfachtes Abbild der Realität (Verkürzungsmerkmal) und erfüllen eine Ersetzungsfunktion durch pragmatische Eigenschaften hinsichtlich Zeitlichkeit, Intentionalität und Subjektivität (Pragmatismusmerkmal) (Stachowiak 1973).

Modelle lassen sich nach vielfältigen Kriterien charakterisieren. Klein und Scholl unterscheiden danach, welchen Einsatzzweck diese erfüllen, welche Arten der Informationen berücksichtigt werden und welcher Abstraktionsgrad erreicht wird (Klein und Scholl 2012). Domschke et al. klassifizieren

ebenfalls nach dem Modellzweck in *Beschreibungsmodelle*, *Erklärungsmodelle*, *Prognosemodelle*, *Simulationsmodelle* sowie *Optimierungsmodelle* (Domschke et al. 2015). Eine Kombination unterschiedlicher Modelltypen ist möglich. So werden etwa Simulations- und Optimierungsmodelle in der Praxis häufig miteinander kombiniert (März und Weigert 2011). Eine Unterteilung von Simulationsmodellen nehmen Rose und März vor. So unterscheiden sie, ob Modelle oder Teile davon *statisch* oder *dynamisch*, *deterministisch* oder *stochastisch* beziehungsweise *kontinuierlich* oder *diskret* sind (Rose und März 2011). Nyhuis nimmt eine Einteilung in *deduktive* und *experimentelle* Modelle vor. Dabei fokussieren deduktive Ansätze auf wesentliche Abbildungsmerkmale und Wirkzusammenhänge, um daraus allgemeingültige Gesetzmäßigkeiten abzuleiten. Experimentelle Ansätze entsprechen einer simulationsgestützten Herangehensweise mit dem Anspruch einer realitätsnahen Abbildung des Originalsystems. Mischformen sind möglich, etwa wenn Ergebnisse aus Simulationsexperimenten zu übergeordneten Erkenntnissen führen, die in Theoriegebäude oder mathematische Modelle überführt werden können (Nyhuis 2008).

Die Wahl eines geeigneten Modells sowie der Werkzeuge und Lösungsverfahren orientiert sich an der Zweckmäßigkeit und unterliegt allgemeinen wissenschaftlichen Qualitätskriterien (Heesen 2014). Das Ziel ist die Schaffung einer experimentierbaren Forschungsumgebung, in der relevante Ergebnisse reproduzierbar und nachvollziehbar bei einem günstigen Verhältnis von Aufwand und Nutzen ermittelt werden können. Es sollen für ein Abbild eines logistischen Systems und dessen dynamischen Verhaltens über die Zeit bei gegebenen und hypothetischen Eingangsparametern sowie unterschiedlichen Ablaufstrategien Wirkzusammenhänge aufgezeigt und logistische Kenngrößen ermittelt werden (vgl. Abbildung 5.1).

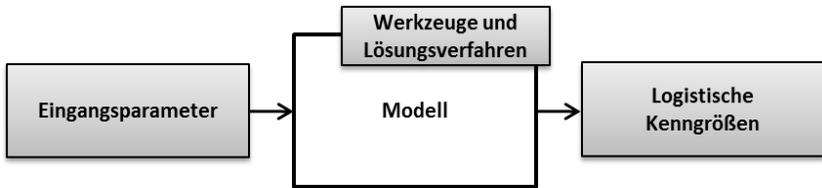


Abbildung 5.1: Grundsätzlicher Aufbau der Modellumgebung

### 5.1.1 Simulationswürdigkeit der Aufgabenstellung

Da die Durchführung einer Simulationsstudie mit einem erheblichen Aufwand verbunden ist, stellt sich die Frage der Angemessenheit. Wenzel et al. geben Hinweise zur Ermittlung der Simulationswürdigkeit bei der Lösung einer Aufgabenstellung im logistischen Umfeld. Die Simulation ist demnach die Methode der Wahl, wenn dynamische Prozesse oder stochastische Einflüsse eine wesentliche Rolle spielen, die Lösung mit anderen mathematischen Verfahren dabei nicht oder nur erschwert möglich wäre oder besondere Anforderungen hinsichtlich der Kommunikation und Visualisierung der Ergebnisse bestehen (Wenzel et al. 2008). Als Nachschlagewerke für die Praxis geben die VDI-Richtlinien der Reihe 3633 Orientierung für die Realisierung von Simulationsprojekten im Logistikumfeld. Signifikante Vorteile der Simulation liegen demnach in der Möglichkeit zur Untersuchung stark vernetzter Wirkzusammenhänge in komplexen technischen Systemen mit einer Vielzahl zeit- und zufallsabhängiger Systemgrößen. Mathematisch-analytische Methoden sind zunächst auszuschöpfen, stoßen jedoch bei simulationswürdigen Aufgabenstellungen schnell an Grenzen. Die Vorteile der analytischen Methoden ergeben sich nach Arnold und Furmans vor allem dadurch, dass sich der Einfluss der Parameter auf das Ergebnis der Berechnung deutlich zeigt (etwa durch eine Gleichung) und sichere Ergebnisse bei geeigneten (also meist kleineren) Problemen mit wesentlich geringerem Aufwand im Vergleich zur Simulation erzeugt werden können. Die Simulation bietet sich als Verfahren an, wenn die analytischen Verfahren an Grenzen stoßen und ein Experiment am Original-

system unwirtschaftlich oder unzulässig wäre (Arnold und Furmans 2009). Als Leitsatz wird „Simulation stets vor Investition“ ausgerufen, was die Bedeutung der Simulation als Hilfsmittel zur Funktionserprobung und Funktionsabsicherung deutlich macht (VDI 3633 Blatt 1: 2014).

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein simulationsbasierter Ansatz als adäquate Modellierungsmethode angesehen, um das Verhalten eines definierten logistischen Netzwerks unter stochastischen Einflüssen sowie die Wirkungsweise der entwickelten Modelle empirisch zu untersuchen. Ausschlaggebend für die Wahl sind dabei die folgenden Aspekte:

- Bei dem untersuchten logistischen Netzwerk handelt es sich durch die Vielzahl der beteiligten Akteure, die verzweigte Netzwerkstruktur sowie das Zusammenspiel der einzelnen Prozesse um ein komplexes System.
- Es bestehen durch die Berücksichtigung von Abweichungen im Beschaffungsprozess sowie zufällige Transportbedarfe und gemeinsam genutzte Ressourcen mehrerer Akteure starke stochastische Einflüsse auf das Modell.
- Es werden im Modell mehrere Eingangsparameter und logistische Kenngrößen berücksichtigt, die in einem vernetzten Wirkzusammenhang stehen und zur simultanen Betrachtung von mehrfachen Zielen führen.
- Geeignete mathematisch-analytische Verfahren zur Lösungsfindung stehen für den konkreten Anwendungsfall nicht zur Verfügung und die Entwicklung wird in absehbarer Zeit auch nicht als realistisch angesehen.
- Durch die Betrachtung von Entscheidungsproblemen unterschiedlicher logistischer Teildisziplinen in einer gemeinsamen Simulations-

umgebung wird die Evaluation der Modelle im gemeinsamen Zusammenspiel unter realitätsnahen Anwendungsbedingungen ermöglicht.

- Die entwickelten Konzepte sind bislang nicht in der Praxis umgesetzt, so dass eine Studie an Originalsystemen (also echten Beschaffungsnetzwerken unterschiedlicher Konfiguration) ausscheidet. Die Simulation dient also in diesem Zusammenhang der Funktionserprobung und -absicherung sowie der Nutzenabschätzung vor der Tätigung einer Investition in ein Realsystem.

### **5.1.2 Implementierung in der Simulationsumgebung**

Die Entwicklung und Implementierung eines Simulationsmodells als experimentierbare Untersuchungsumgebung unterliegt einem Modellbildungsprozess. Dabei werden in verschiedenen Phasen Anforderungen, Ziele und Aufgaben formuliert, Daten erhoben und analysiert, Modelle formal beschrieben und schließlich in einer Simulationsumgebung implementiert sowie das Modellverhalten getestet und beurteilt. Die VDI Richtlinie 4465 Blatt 1 (2016b, Gründruck) gibt einen Überblick Über eine systematische Vorgehensweise bei der Entwicklung von Modellen im logistischen Kontext. Die Abbildung 5.2 zeigt den vorgeschlagenen Modellbildungszyklus der Richtlinie. Die Entwicklung der Simulationsumgebung im Rahmen dieser Arbeit folgte einem solchen Modellbildungsprozess und umfasste dabei mehrere Iterationszyklen.



- Es wird eine ereignisdiskrete und agentenbasierte Modellierung unterstützt. Die Strukturen einer Supply Chain, das Verhalten der beteiligten Akteure sowie die Steuerungs- und Planungsdienste lassen sich mit Softwareagenten grundsätzlich in geeigneter Weise abbilden.
- Die gebotene Simulationsumgebung stellt einen umfangreichen Modellierungsbaukasten bereit, so dass sich auch komplexe Modelle mit vertretbarem Aufwand in ihrer Grundstruktur modellieren lassen.
- Die mit der Anwendung erstellten Modelle beruhen auf einer Java-basierten Programmierung. Diese lassen sich durch eigenen Code erweitern und an die individuellen Bedürfnisse anpassen.
- Ebenso bietet die AnyLogic-Software umfangreiche Möglichkeiten zur Visualisierung der Simulationsergebnisse. Gerade in der Test- und Justierungsphase des Modells lässt sich so das Systemverhalten rasch ableiten und beurteilen.
- Die AnyLogic-Umgebung bietet Möglichkeiten zur Einbindung geographischer Informationssysteme (GIS). Es lassen sich dadurch Transportprozesse in einem realitätsnahen Abbild des echten Verkehrsnetzes simulieren.
- Der Datenaustausch des Modells mit der Umwelt, sowohl auf der Input- als auch auf der Outputseite, ist mit AnyLogic einfach zu realisieren. Datenbank-basierte Werkzeuge erlauben den effizienten Umgang mit großen Datenmengen.
- AnyLogic bietet Möglichkeiten zur Durchführung von Experimenttypen zu verschiedenen statistischen Fragestellungen. Es sind Parametervariationen, Sensitivitätsanalysen und Kalibrierungsstudien möglich. Ebenso werden Experimente unterstützt, in denen Simulation und Optimierung miteinander verknüpft werden. Es können dazu Op-

timierungsexperimente erstellt werden oder externe Optimierungskomponenten in die Prozessabläufe der Agenten eingebunden werden.

Um die Rechenzeit eines einzelnen Simulationslaufs in einem vertretbaren Rahmen zu halten, wurde bei der Entwicklung des Modells eine Höchstdauer von 2.000 Sekunden für einen Simulationslauf angestrebt. Die Durchführung der Experimente erfolgte auf einem Rechner mit Intel Core i7 Prozessor, 8 Kernen, 3,07 GHz Taktfrequenz, 12 GB Arbeitsspeicher und unter dem Betriebssystem Windows Server 2008. Es kam AnyLogic in der Version 7.1.2 zum Einsatz.

### **5.1.3 Zusammenspiel der Komponenten und Informationsfluss**

Um eine effiziente Durchführung und Auswertung der Experimente zu gewährleisten erfolgt der Aufbau einer Infrastruktur zur Datenverarbeitung. Dabei entsteht ein Informationsfluss, der mit der Aufbereitung und Analyse der Datengrundlage beginnt, Eingangsgrößen für die Simulationsumgebung bereitstellt, zur Laufzeit der Simulation mit Datenbank und Solver interagiert und die ermittelten Zielgrößen zur Analyse bereitstellt. Die Abbildung 5.3 zeigt schematisch das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten in der Modellumgebung.

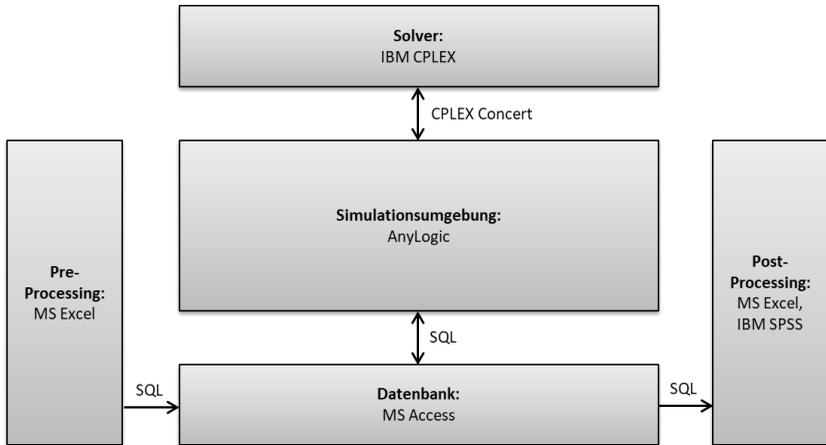


Abbildung 5.3: Zusammenspiel der Komponenten und Informationsfluss in der Modellumgebung

Das *Pre-Processing*, also das Durchführen vorbereitender Analysen und Datenaufbereitungen, erfolgt vornehmlich mittels MS Excel. Dabei werden die Eingangsdaten für die Simulation vorbereitet und in die Struktur der entwickelten Datenbank überführt. Ebenso werden Planungsaufgaben der taktischen Ebene durchgeführt, um einen initialen operablen Zustand zu erzeugen. Es werden etwa die Zuordnungen der Gebietsspediteurgebiete vorgenommen, die Kapazitäten des Transportsystems geplant und die Parameter der Lagerhaltungspolitiken ausgelegt. Die Datenhaltung erfolgt in der Modellumgebung in einer *relationalen Datenbank*. Darin werden die Eingangsdaten für die Simulationsumgebung bereitgestellt und die Ausgangsdaten der Simulationsläufe abgelegt und für die weitere Analyse bereitgehalten. Die *Simulationsumgebung* wird mittels AnyLogic-Modell abgebildet und ist über SQL-Statements an die Datenbank angebunden. Die Ausführung von Optimierungsaufgaben kann in der Modellumgebung über die Anbindung eines IBM CPLEX Solvers über die Concert-Schnittstelle erfolgen. Die Formulierung der Entscheidungsprobleme befindet sich im Java-Code des Simulationsmodells. Zuletzt erfolgt der Schritt des *Post-Processing*. Dabei werden die

gewonnenen Daten mittels IBM SPSS und MS Excel ausgewertet und grafisch aufbereitet.

Die Kopplung von Werkzeugen der Simulation und der Optimierung kann in unterschiedlichen Kombinationsmöglichkeiten erfolgen. Dabei ist sowohl eine sequentielle als auch eine hierarchische Anordnung möglich. Bei der sequentiellen Anbindung folgt entweder die Optimierung der Simulation und wird von dieser mit Eingangsdaten bestückt oder die Simulation erfolgt auf der Grundlage von Optimierungsergebnissen. Bei der hierarchischen Anordnung ist entweder die Simulation integraler Bestandteil einer Optimierung oder es ist im umgekehrten Fall eine Optimierung in die Abläufe einer Simulation integriert (März und Weigert 2011). Im Rahmen der Arbeit erfolgt die hierarchische Integration von Entscheidungswerkzeugen in die Simulation (als führendes System). Dies ist der Tatsache geschuldet, dass Verfahren zur Planung und Steuerung so evaluiert werden sollen, wie sie auch in einem Realsystem zum Einsatz kommen würden. Die Werkzeuge müssen einerseits in der Lage sein, den kontinuierlichen Zustrom von Daten zur Laufzeit des Simulationsmodell zu verarbeiten und andererseits so hinreichend schnell Ergebnisse liefern, dass ein Fortschreiten der Simulation (bzw. eines Realsystems) nicht nennenswert beeinträchtigt wird (VDI 3633 Blatt 12: 2016).

#### **5.1.4 Umsetzung eines User Interface**

Um die Simulation für den Anwender anschaulich und nachvollziehbar zu machen, erfolgt die Entwicklung eines User Interfaces. Dabei erfüllt die Arbeitsoberfläche eines Simulationsmodells verschiedene Aufgaben entlang des Modellbildungs- und Modellnutzungsprozesses. Bereits in der frühen Phase der Entwicklung erhält der Anwender eine direkte Rückmeldung über die Wirkzusammenhänge der modellierten Funktionen und kann diese überprüfen und iterativ anpassen. Im Zuge der Validierung ist der Abgleich mit dem Originalsystem sowie Vergleichsmodellen möglich, indem die komplexen Sachverhalte der Simulation anschaulich dargestellt werden. Zuletzt dient das User Interface im Rahmen der Experimentdurchführung und Ergebnisinter-

pretation der verdichteten Darstellung der Simulationsergebnisse (VDI 3633 Blatt 11: 2009). Es kommen im Modell folgende Darstellungstechniken zum Einsatz:

- Die räumlichen Strukturen und Prozesse des Modells werden in einer GIS-Karte visualisiert. Auf diese Weise können die geographischen Koordinaten der ortsfesten Objekte (Hersteller, Lieferanten und Hub-Logistikdienstleister) und die korrekte Wegführung der Transporte überprüft werden.
- Mithilfe von Histogrammen werden im User Interface sowohl mengen- als auch zeitbezogene Größen dargestellt. Auf diese Weise können statistische Verteilungen der stochastischen Effekte im Modell abgeschätzt und die Plausibilität geprüft werden. Die Darstellung erfolgt für die periodischen Nachfragemengen der Hersteller sowie ausgewählte Bestandsarten, Tourkennzahlen und Zeiträume des Prozesszeitmodells. Der disponible Bestand, der physische Bestand und der Bestellbestand werden im Modell zusätzlich mithilfe von Verlaufsdiagrammen über die Zeit dargestellt. So lässt sich der typische Sägezahnverlauf einer Bestellpunkt politik nachvollziehen und es kann die korrekte Funktionsweise von Bestellauslösung und Anlieferung der Sendungen kontrolliert werden.

Hinweise zur Verifikation und Validierung von Simulationsmodellen im Produktions- und Logistikumfeld geben Rabe et al. (2008). Dort wird ebenfalls auf die Bedeutung der Visualisierung bei der Plausibilisierung eines Simulationsmodells hingewiesen. Folgende Fragestellungen stehen bei der kritischen Begutachtung des Modells mithilfe des User Interface und ersten ad-hoc-Analysen der Outputdaten im Vordergrund:

- Eignen sich die festgelegten Zielgrößen zur Beantwortung der Fragestellung?

- Sind die getroffenen Annahmen angemessen und ist der Grad der Übereinstimmung des Systemverhaltens mit der Realität ausreichend?
- Lässt die Struktur des Modells eine zuverlässige und effiziente Auswertung der Ergebnisse zu?
- Sind die Ursache-Wirkungs-Beziehungen nachvollziehbar und plausibel?
- Lässt sich auf das Einschwingverhalten und die Schwankungsbreite des Modells schließen?

Es ist sinnvoll, auch bei einer Umsetzung in einem Realsystem der Visualisierung einen hohen Stellenwert beizumessen. So wird es dem Logistikentscheider ermöglicht, jederzeit den Status der Prozesse einzusehen und reaktiv auf Vorkommnisse zu reagieren oder proaktiv weitere Maßnahmen für zukünftige Planungsperioden zu ergreifen. Darüber hinaus steigert eine nachvollziehbare Visualisierung von Planungsergebnissen und Abweichungen das Vertrauen in die modellbasierten Dienste, da diese nicht ähnlich einer Black-Box mit geringer Kontrollmöglichkeit arbeiten. Es wird vielmehr die Ausgangslage und Vorgehensweise von automatisiert getroffenen Entscheidungen nachvollziehbar gemacht und das Vertrauen in die digitalen Helfer gefördert.

## 5.2 Prozessabläufe der Modellagenten

Im betrachteten Anwendungsfall eines Logistiknetzwerks ist der Zustand des Systems durch das Handeln einer Vielzahl von Akteuren geprägt, die wirtschaftlich eigenständig agieren und untereinander in Kontakt stehen. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird bei der Implementierung ein agentenbasierter Simulationsansatz gewählt (Borshchev 2013). Das entwickelte Modell verfügt über Akteur-individuelle Verhaltensmuster, die auf der Ebene der Agententypen implementiert werden. Es werden die Agenten an dieser Stelle aus ablauftechnischer Sicht beschrieben. Eine Detaillierung der

Eingangsdaten sowie der Planungs- und Steuerungsaspekte erfolgt im sechsten Kapitel mit Bezug zu den jeweiligen Experimenten.

Die Prozesse der Agenten lassen sich in der Art der Modellierung in *Geschäftsprozesse* und *Materialflussprozesse* unterscheiden. Die Abbildung der Geschäftsvorfälle erfolgt in AnyLogic mit der Zustandsdiagrammbibliothek, die physischen Materialflussprozesse werden mit der ereignisdiskreten Prozessbibliothek abgebildet. Ausgenommen aus der Betrachtung im Modell sind Nebenprozesse, die zwar in der Realität zwangsläufig stattfinden, jedoch nicht originärer Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit sind. Dazu zählen etwa der Fluss von Leergut, Rücklieferungen und weitere ergänzende Geschäftsvorfälle.

Das Modell unterstellt, dass bei den Herstellern durch Produktionsprozesse Güter erzeugt werden und die dafür benötigten, aber nicht selbst gefertigten, Sekundärprodukte dabei verbraucht werden. Um dies abzubilden, wird periodisch für jede Materialnummer ein Bedarf auf Grundlage einer Nachfrageverteilung erzeugt und die erforderliche Menge, falls möglich, aus dem Lager entnommen. Das Lager wird kontinuierlich bestandstechnisch überwacht, so dass eine direkte verbrauchsgesteuerte Bestellung bei den Lieferanten erfolgen kann. Die Bestellungen werden gemäß den Regeln einer definierten Lagerhaltungspolitik ausgelöst. Dazu wird im Falle einer Bestellung ein Auftragsagent mit den relevanten Auftragsinformationen erzeugt und an den Lieferanten übermittelt. Die Zuordnung der Lieferanten erfolgt nach dem Konzept der Einzelquellenbeschaffung (*single sourcing*).

Die Lieferanten nehmen die Bestellungen des Herstellers entgegen und sorgen im Anschluss für die Bereitstellung des Materials im eigenen Warenausgang. Die eingehenden Aufträge werden periodisch eingeplant und für die physischen Logistikprozesse freigegeben. Bei der Durchführung dieser Prozesse geben Zeitverteilungen die Dauer der Prozessschritte vor, so dass stochastische Einflüsse abgebildet werden können. Nach erfolgter Bereitstellung einer Sendung im Warenausgang erfolgt die Freigabe zur Abholung durch den Logistikdienstleister.

Die Logistikdienstleister sind im Modell mit der Planung und Abwicklung der Transport- und Umschlagprozesse der bereitgestellten Sendungen betraut. Die Anbindung der Lieferanten erfolgt im Sammelgutverkehr mit einem Umschlagpunkt je Vorholgebiet. In der Simulation werden auf Grundlage der Transportbedarfe periodisch die Vorlauftouren unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden LKW-Kapazitäten geplant. Neben den Lieferanten des betrachteten Empfangswerks erzeugen weitere Drittlieferanten Sendungen, die bei der Tourenplanung berücksichtigt werden müssen. So wird dem Umstand Rechnung getragen, dass sich Supply Chains mehrerer Unternehmen in der Realität nicht scharf abgrenzen lassen und gemeinsame Ressourcen teilen. Die Lösung des Zuordnungs- und Reihenfolgeproblems erfolgt unter Berücksichtigung von Annahmen über die Prozesszeiten. Die tatsächlichen Fahrt-, Warte- und Bearbeitungszeiten folgen Zeitverteilungen und werden zur Laufzeit ermittelt.

Der zugeordnete Hubstandort bildet das Ziel der Vorlauftour und die Sendungen werden dort umgeschlagen. Im Hub durchlaufen die Sendungen anschließend einen Wareneingangs-, einen Umschlags- und einen Warenausgangsprozess. Die Planung der Reihenfolge erfolgt periodisch. Im Warenausgang stehen die Sendungen schließlich für die Abholung durch Nachlaufverkehre zwischen Hub und Empfangswerk bereit. Die Prozesszeiten für die einzelnen Prozessschritte folgen ebenfalls Zeitverteilungen, um auch an dieser Stelle des Modells die stochastischen Einflüsse auf die operativen logistischen Abläufe abzubilden. Die Nachlauftouren fahren als Regelverkehr gemäß einer der Simulation voraus gegangenen Kapazitäts- und Fahrplanauslegung. Die Zuordnung der Sendungen zu den Touren ist Planungsaufgabe und wird zur Laufzeit gelöst.

Im Wareneingang des Herstellers werden die Sendungen entgegengenommen, entladen und anschließend zu den produktionsnahen Lagerorten verbracht. Der bei der Bestellung erzeugte Auftragsagent folgt stets dem physischen Materialfluss und sammelt fortlaufend Daten über den Status von Messpunkten des Prozesszeitmodells sowie sonstige eingetretene Ereignisse

während der Auftragsbearbeitung. Nachdem der Gesamtprozess erfolgreich durchlaufen wurde, werden die gesammelten Daten für die spätere Analyse archiviert.

## **5.3 Modellgrößen**

Wie bereits erläutert, dient das Simulationsmodell der Überführung von Eingangsparametern in logistische Kenngrößen unter der Berücksichtigung komplexer Wirkzusammenhänge und für unterschiedliche Ablaufszenarien. In Anlehnung an März und Weigert erfolgt die Unterteilung der berücksichtigten Modellgrößen in Eingangs-, Stell- und Zielgrößen (März und Weigert 2011). Die Eingangsgrößen bilden die Ausgangslage des untersuchten Planungsfalls durch die Vorgabe von Auftrags-, Stamm- oder Bewegungsdaten. Die Stellgrößen sind die variablen Größen im Modell, die im Zuge der Untersuchungen mit der Suche nach einem Optimum zur Laufzeit der Simulation eingestellt werden. Dabei kann es sich um Parametervariationen, Zuordnungen oder Permutationen handeln (Weigert und Rose 2011). Die Zielgrößen lassen die Bewertung der verschiedenen Experimente zu. Dabei wird das globale Ziel, die Minimierung von Kosten als betriebswirtschaftliche Kenngröße, in abgeleitete Kennzahlen unterschiedlicher Kategorien aufgelöst. Durch die Betrachtung von Mehrfachzielen ergeben sich im Ergebnis Kompromisslösungen, die einer Gewichtung der Einzelziele folgen.

### **5.3.1 Eingangs- und Stellgrößen**

Es folgt die Beschreibung der Eingangs- und Stellgrößen des Modells. Stochastische Störeinflüsse auf das logistische Netzwerk werden ebenfalls über die Eingangsgrößen abgebildet. Über die Variation der Eingangs- und Stellgrößen wird die Untersuchung unterschiedlicher Szenarien für einzelne Ablaufstrategien ermöglicht.

Für das Modell werden zunächst die Größen festgelegt, die sich aus der statistischen Betrachtung des Einschwingverhaltens ergeben (vgl. Kapitel 6.2 zur Experimentplanung):

- Anzahl Betrachtungsperioden (eine Periode entspricht im Modell einem Tag)
- Erste Betrachtungsperiode

Über die folgenden Eingangsgrößen werden die Hersteller im Modell abgebildet:

- Standorte (geographische Koordinaten)
- Parameter einer Gammaverteilung der täglichen Nachfrage (je Sekundärprodukt)
- Zuordnung eines Lieferanten (je Sekundärprodukt)
- Zuordnung einer Nachlaufftour

Es wird im Modell eine periodische (tägliche) Bestandsüberwachung und Bestellung unterstellt. Auf Grundlage der Nachfrageverteilung erfolgt im Pre-Processing die Auslegung der Bestellparameter. Es gehen folgende Eingangsgrößen in das Modell ein, die eine Anwendung einer  $(s,q)$ -Bestellpolitik und eine Bewertung zur Laufzeit ermöglichen:

- Bestellpunkt  $s$  (je Sekundärprodukt)
- Bestellmenge  $q$  (je Sekundärprodukt)
- Geforderte  $\beta$ -Servicegrad-Restriktion (je Sekundärprodukt)
- Geforderte Wiederbeschaffungszeit (je Sekundärprodukt)

Die folgenden Eingangsgrößen bilden die Lieferanten im Modell ab:

- Standorte (geographische Koordinaten)
- Zuordnung zu einem Vorholgebiet
- Durchschnittliche Prozesszeiten für die Bereitstellung einer Sendung im Warenausgang
- Planungsintervall der Reihenfolgeplanung für die Bereitstellung

Die Auslegung des Transportnetzwerks ist das Ergebnis einer Planungsphase, die der eigentlichen Simulation voraus geht. Der Aufbau des Transportnetzwerks im Modell folgt auf Grundlage der folgenden Eingangsgrößen, mit der sich die Hubs sowie die Vorhol- und Nachlaufverkehre beschreiben lassen:

- Standorte der Hubs (geographische Koordinaten)
- Gegenseitige Zuordnung von Vorholgebieten, Hubs und Nachlauftouren
- Anzahl verfügbarer Fahrzeuge (je Fahrzeugtyp und Planungsperiode)
- Maximale Beladungskapazität (je Fahrzeugtyp)
- Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit (je Fahrzeugtyp)
- Durchschnittliche Grundzeit bei Be- und Entladevorgängen (je Tourstopp)
- Durchschnittliche Bearbeitungszeit für die Be- und Entladung (je Mengeneinheit)
- Entfernungen zwischen den Standorten im Modell (Distanzmatrix), auf Grundlage eines Straßennetzes, abgebildet mit Kartenmaterial von OpenStreetMap (OSM)

- Planungsintervall der Tourenplanung für die Vorhol- und Nachlauf-touren
- Planungsintervall der Reihenfolgeplanung für den Umschlag in den Hubs

Mit den voran genannten Eingangsparametern lässt sich ein idealtypischer Prozessablauf darstellen. Die folgenden Eingangsgrößen bilden stochastische zeitliche Einflüsse auf das logistische System ab und wirken somit als experimentierbare Störgrößen:

- Die Prozesszeit der Bereitstellung einer Sendung im Warenausgang bei den Lieferanten erfolgt in zwei Teilprozessen und ist jeweils über die Parameter einer Dreiecksverteilung abgebildet. Lieferprobleme, die zu Mengenabweichungen in einer Betrachtungsperiode führen würden, werden in diesem Zusammenhang als Zeitabweichung aufgefasst und modelliert.
- Die ungeplante Wartezeit der Fahrzeuge bei den Tourstopps wird ebenfalls über die Parameter einer Dreiecksverteilung abgebildet.
- Stauereignisse (etwa Überlastung der Straßen im Berufsverkehr) werden über die Parameter einer Dreiecksverteilung für die Fahrgeschwindigkeit des betroffenen Fahrzeugs abgebildet.

Die Dreiecksverteilung wird typischerweise zur Modellierung von Zufälligkeiten genutzt, wenn keine oder nur wenig Informationen über das Prozessverhalten zur Verfügung stehen (Law 2015).

### 5.3.2 Zielgrößen

Die grundlegende Fragestellung einer jeden Optimierungsaufgabe, ist die nach der Zielgröße. Dabei kann dieses Ziel nicht nur aus einer zu maximierenden oder zu minimierenden Größe bestehen, sondern sich vielmehr aus einer

Kombination mehrerer (teilweise auch konträrer) Teilziele zusammensetzen. Im Ergebnis kann es zu mehreren gleich- oder ähnlich guten Kompromisslösungen kommen, die die Teilziele unterschiedlich gut erfüllen. Im Folgenden werden die wesentlichen Zielgrößen des Simulationsmodells dargestellt, die der Bewertung der Simulationsergebnisse aus logistischer Sicht dienen.

Aus Sicht des Herstellers ist von zentraler Bedeutung, ob die aufgegebenen Bestellungen wunschgemäß erfüllt wurden. Im Modell bilden die folgenden Messgrößen diesen Umstand ab:

- Die *Wiederbeschaffungszeit* misst den Zeitraum zwischen der Aufgabe einer Bestellung und dem Eingang der Sendung im Wareneingang des Herstellers. Um diesen Zeitraum bewerten zu können, werden *Wartezeiten* (etwa durch geplante Puffer) identifiziert und abgebildet, da diese auf ineffiziente Abläufe hindeuten.
- Die *Liefertermintreue* gibt für definierte Planlieferzeiten den Anteil der pünktlichen Lieferungen am Gesamtlieferaufkommen an.

Die Bewertung der lagerseitigen Aspekte erfolgt durch die Betrachtung folgender Größen:

- Der *durchschnittliche physische Bestand* gibt an, welches Bestandsniveau sich über die Zeit im Lager des Herstellers befindet.
- Über den  $\alpha$ -*Servicegrad* wird die ereignisbasierte und den  $\beta$ -*Servicegrad* die mengenbasierte Lieferfähigkeit des Lagers bei einer Nachfrage der Produktion dargestellt. Dazu werden die *Fehlmengenergebnisse* und *Fehlmengen* erfasst.

Das Transportsystem geht über die folgenden Größen in die Bewertung der Simulationsergebnisse ein:

- Die durchgeführten Touren werden über die *zurückgelegte Strecke* sowie die *zeitliche Dauer* bewertet. Daraus lassen sich Kosten für die Ausführung der Touren ableiten.
- Der Bezug zu den zur Verfügung stehenden Ressourcen stellt die *Auslastung* her. Dabei wird für realisierte Transporte die maximale Auslastung einer Tour über die Zeit betrachtet. Es wird ebenso der *Anteil ungenutzter Fahrzeugkapazität* erfasst.

Darüber hinaus werden die Bezugsgrößen des im vierten Kapitel vorgestellten Prozesskostenmodells zur Laufzeit erhoben und für eine spätere Kostenrechnung bereitgestellt. Weitere Kennzahlen (etwa Durchlaufzeitverteilungen für Teilprozesse oder Prozessbestände) werden darüber hinaus im User Interface abgebildet oder in die Datenbank übertragen und dienen der vertieften Analyse einzelner Simulationsläufe und der Plausibilisierung des Systemverhaltens im Modellbildungsprozess.

## **6 Planung und Bewertung der Experimente**

Gegenstand dieses Kapitels ist die Planung, Durchführung und Auswertung der Simulationsexperimente. Es kommen dazu die in den vorherigen Kapiteln vorgestellten Modelle zum Einsatz. Zunächst wird auf die Generierung geeigneter Testdatensätze eingegangen, welche eine möglichst realitätsnahe Untersuchungsumgebung für das Konzept einer kooperativen Planung und Steuerung bilden. Durch die Variation der Eingangs- und Stellgrößen werden Wirkzusammenhänge unter veränderten Rahmenbedingungen und Ablaufvarianten untersucht. Da die Kombination des vollständigen Parameterraums zu einer nicht mehr vertretbaren Anzahl an Einzelexperimenten führen würde, wird die Untersuchung durch eine Experimentplanung systematisch auf ein sinnvolles Maß beschränkt und statistisch abgesichert. Schließlich werden in diesem Kapitel der Arbeit die Untersuchungsergebnisse der Simulationsstudie dargestellt und interpretiert.

### **6.1 Generierung von Testdatensätzen**

Die Untersuchung von logistischen Fragestellungen mit analytischen oder simulativen Methoden ist eng verbunden mit der Generierung geeigneter Testdaten. Diese bilden die Grundlage für die modellierten Rechenoperationen und machen die entwickelten und implementierten Verfahren erst ausführbar. Dabei ergibt sich jedoch ein Spannungsfeld aus gegenläufigen Zielen, die bei der Erstellung geeigneter Daten erfüllt werden müssen. Zum einen besteht der Anspruch, ein möglichst realitätsnahes Abbild der untersuchten Originalsysteme zu schaffen. Auf der anderen Seite bilden gerade bei unvollständigen oder unstrukturierten realen Problemdaten vereinfachende Annahmen, etwa durch die Zugrundelegung bestimmter Verteilungsfunktionen,

erst die Möglichkeit zu einer systematischen Untersuchung und der Ableitung von Aussagen über Sensitivitäten und Wirkzusammenhänge. Analog zum Modellbildungsprozess wurde auch bei der Testdatengenerierung das Verhältnis zwischen einer weiteren Detailierung und dem resultierenden zusätzlichen Erkenntnisgewinn als Entscheidungskriterium zu Grunde gelegt (VDI 4465 Blatt 1:2016, Gründruck). Die für die Untersuchung erforderlichen Daten werden zur besseren Übersichtlichkeit in *Strukturdaten*, *Kapazitätsdaten*, *Mengendaten*, *Prozesszeitdaten* und *Kostendaten* eingeteilt.

Die Strukturdaten beschreiben den physischen Aufbau der betrachteten Modellinstanzen. Dazu gehören die Standortkoordinaten der ortsfesten Objekte (Hersteller, Lieferanten und Hub-Logistikdienstleister), die Zuordnung von Lieferanten zu Vorholgebieten und Nachlauf Touren sowie das öffentliche Verkehrsnetz zur Erbringung von Transportdienstleistungen. Im Rahmen der Untersuchungen wird ein Anwendungsfall modelliert, der einen zusammenhängenden Ausschnitt aus dem Beschaffungsnetzwerk eines produzierenden Unternehmens widerspiegelt (vgl. Abb. 6.1). Dabei werden folgende Vorgehensweisen gewählt und Annahmen getroffen:

- Das öffentliche Verkehrsnetz wird mit Hilfe der GIS-Funktionalität von AnyLogic abgebildet. Dabei kommen Daten des Anbieters OpenStreetMap (OSM) zum Einsatz, die über einen Serverzugriff in die Simulationsumgebung eingebunden werden. Bei OSM handelt es sich um ein internationales Projekt, das Geoinformationen in einer Gemeinschaft aus mehreren Unternehmen, Hochschulen und Vereinen sowie etwa 2,3 Millionen privaten Akteuren selbst erhebt und der Allgemeinheit zur kostenfreien und beliebigen Nutzung zur Verfügung stellt (OpenStreetMap 2018). Mit Hilfe dieser Daten lassen sich die Transportprozesse durch die Einbindung des realen Verkehrsnetzes sehr realitätsnah abbilden. Entfernungsmatrizen, die zur Durchführung von Tourenplanungen im Modell erforderlich sind, werden ebenfalls auf Grundlage der OSM-Daten im Pre-Processing erstellt.

- Als Lieferantenstandorte werden in zwei Vorholgebieten jeweils 25 Punkte in Anlehnung an die Solomon-Instanzen ermittelt (Solomon 1987). Dabei werden ausgewählte Koordinaten einer zufälligen (Random R) und einer zufällig-geclusterten (Random Clustered RC) Instanz ausgewählt und auf quadratische 10.000 km<sup>2</sup>-Ausschnitte eines geographischen WGS84-Koordinatensystems übertragen. Das R-Gebiet entspricht dabei der Region Rhein-Ruhr mit ihrer verteilten Struktur der Wirtschaftsräume. Das RC-Gebiet repräsentiert die Region Rhein-Main, mit einer stärkeren Konzentration der Wirtschaftsräume entlang der Oberzentren (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2011). Die mittlere Entfernung der Lieferanten zum Hub beträgt im Gebiet R 25 km. Das Gebiet RC weist eine mittlere Entfernung der Lieferanten zum Hub von 34 km auf. Die Bestimmung der Geokoordinaten erfolgt der Einfachheit halber mit einer konstanten mittleren Längengradentfernung von 71,4 km. Zur Vertiefung des Umgangs mit räumlichen Bezugssystemen ist an dieser Stelle auf Hake et al. (2002) verwiesen.
- Als Umlade- und Konsolidierungsstelle (Hub) der Logistikdienstleister wird jeweils ein weiterer Punkt der vorgestellten Instanzen (R und RC) ausgewählt und nach dem gleichen Vorgehen wie bei den Lieferanten auf das geographische Koordinatensystem übertragen.
- Als Standort des Herstellers wird im betrachteten Szenario in der OSM-Karte ein Ort mit einer annähernd gleichen Entfernung zu beiden Hubs der Vorholgebiete und einer günstigen Verkehrsanbindung gewählt.

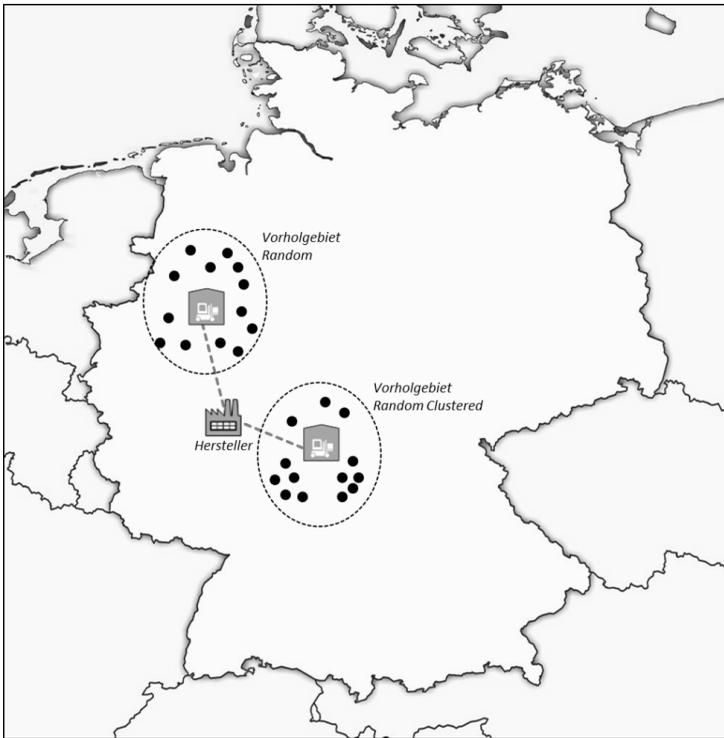


Abbildung 6.1: Räumliche Struktur des untersuchten logistischen Netzwerks

Mithilfe der Kapazitätsdaten werden die Ressourcen beschrieben, die im Modell zur Ausführung der operativen logistischen Prozesse vorgehalten werden und somit für die Leistungsfähigkeit des Systems entscheidend sind. Zu den modellierten Kapazitäten gehören die verfügbaren Transportmittel der Logistikdienstleister. Diese werden, ausgehend vom Mengengerüst, zunächst unter der Berücksichtigung der Operabilität im Pre-Processing initial bestimmt. Anschließend wird die Sensitivität der Zielgrößen auf die Veränderung der voran genannten Parameter simulativ untersucht.

Die Mengendaten liefern die Grundlage für die auszuführenden Aufträge im Modell. Dazu wird die Nachfragemenge des Herstellers je Sekundärprodukt durch Nachfrageverteilungen abgebildet. Die Nachfrage wird periodisch ermittelt und folgt einer Gammaverteilung mit dem Skalenparameter  $\alpha_{Y^*}$  und dem Formparameter  $k_{Y^*}$ . Diese Verteilungsform verhindert zum einen negative Nachfragen und ermöglicht zum anderen eine flexible Abbildung der stochastischen Nachfragemenge. Die mittlere Nachfrage pro Periode ist den Solomon-Instanzen entnommen, die Variabilität ist Gegenstand der Untersuchung und wird variiert. Auf Grundlage der vorgegebenen Verteilungsparameter erfolgt im Pre-Processing die Auslegung der (s,q)-Bestellpolitik unter Berücksichtigung einer Schätzung für die Wiederbeschaffungszeit  $l$  aus den vorbereitenden Simulationsläufen. Korrelationen zwischen den einzelnen Sekundärprodukten und Autokorrelationen über die Zeit sind nicht Gegenstand der Untersuchung und werden daher nicht gesondert modelliert. Eine Mengeneinheit der Nachfrage entspricht dem Äquivalent einer Sendungseinheit. So kann, über die Definition der Transportkapazität je Transportmittel, im Modell eine direkte Verknüpfung zwischen dem Transportsystem und allen weiteren logistischen Systemen erfolgen.

Prozesszeitdaten sind im Modell für alle Prozesse relevant, die über die Prozessbausteine der Materialflussbibliothek abgebildet werden (vgl. Kapitel 5.2). Die Bearbeitungszeiten für die Kommissionier- und Konsolidierungsvorgänge bei den Lieferanten und für die Empfangs- und Konsolidierungsvorgänge bei den Hub-Logistikdienstleistern werden über Dreiecksverteilungen für jede Arbeitsstation parametrisiert. Da diese Prozesse in der Praxis in der Regel nicht detailliert zeitlich dokumentiert werden, kann eine Verteilung meist nur annäherungsweise über Mittel- sowie Mindest- und Maximalwerte abgeschätzt werden. Die Mindest- und Maximalwerte sind im Modell für alle Versuche fest gewählt und der Mittelwert wird im Zuge der Untersuchung variiert. Der Wertebereich der Dreiecksverteilungen liegt zwischen 0,5 und 4 Std, so dass im Modell der Durchlauf des gesamten Teilprozesses (Bereitstellung beim Lieferanten oder Umschlag im Hub) bis zum Ende einer Schicht gewährleistet ist. Dies entspricht dem Fokus der Arbeit, nämlich der

Untersuchung von Abweichungen in den täglichen logistischen Abläufen im kurzfristigen Zeithorizont. Die durchschnittliche Geschwindigkeit der LKW wird für jede Tour ermittelt und folgt ebenfalls einer Dreiecksverteilung im festen Wertebereich von 13,9 bis 20,8 m/s. Der Mittelwert ist Gegenstand der Untersuchung und wird variiert.

Zur kostenbasierten Bewertung sind im Modell Kostendaten von Relevanz. Die Kostensätze für die Transporte basieren auf der Annahme über den Einsatz eines LKW mit Sattelaufleger aus dem schweren Verteilerverkehr mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 40 Tonnen sowie einer Laderaumnutzbarkeit von 13,6 Lademetern bzw. 34 Standard-Palettenstellplätzen. Dabei werden die Kosten typischerweise unterteilt in fixe Kostenbestandteile (etwa für Abschreibung sowie Steuern und Versicherung), wegstreckenabhängige Kosten (für Kraftstoff und Verschleiß) und zeitabhängige Kosten (für Personalkosten und Spesen) (Wittenbrink 2014). Gabler et al. geben Hinweise zur überschlägigen Kostenberechnung, basierend auf Erhebungen des Branchenfachmagazins VerkehrsRundschau (Gabler et al. 2013). Wilken veröffentlicht darüber hinaus in regelmäßigen Abständen unverbindliche Kostensätze als Orientierungshilfe für die Preisbildung (Wilken 2017). Auf dieser Grundlage werden die Transportkosten wie folgt angenommen und über ein lineares Kostenmodell abgebildet:

- Die Fixkosten werden mit 200 EUR/Fahrzeug und Tour abgeschätzt. Bei einer ungenutzten Tour wird ein reduzierter Fixkostensatz von 15% angesetzt.
- Die wegstreckenabhängigen Kosten werden mit 1,10 EUR/km abgeschätzt.
- Die zeitabhängigen Kosten werden mit 30 EUR/Std abgeschätzt.

Für innerbetriebliche Logistikleistungen und Prozesse im Zusammenhang mit Nachschub und Lagern gibt Gudehus eine Orientierung für die kostenmäßige Bewertung (Gudehus 2012a). Es werden in Anlehnung an die dort

beschriebenen Kostensätze und Leistungspreise für die Modellierung des Entscheidungsmodells des Weiteren folgende Annahmen getroffen:

- Die Bestandskosten im Lager des Herstellers werden mit jährlichen Kapitalbindungskosten von 5% bei einem mittleren Wert einer Mengeneinheit von 500 EUR angenommen. Zusätzlich werden 1,25 EUR/100ME und Tag für die Lagerhaltung veranschlagt (etwa für Abschreibungen der Lagereinrichtung).
- Die Zwischenlagerung von Sendungen bei den Lieferanten sowie beim Hub-Logistikdienstleister wird ebenfalls mit 1,25 EUR/100ME und Tag veranschlagt. Die Kosten für die Ein- und Auslagerung bleiben unberücksichtigt, da keine Prozessschritte ausgelassen werden können.
- Eine entstandene Fehlmenge wird mit 50% des Materialwerts einer Mengeneinheit bewertet und ist Gegenstand der weiteren Untersuchung.
- Die Dispositionskosten werden mit 15 EUR/Auftrag angenommen. Eine priorisierte Bestellung verursacht Zusatzkosten von 10% der Dispositionskosten je Prozessabschnitt. Durch das Herunterstufen der Dringlichkeit senken sich die Dispositionskosten in gleichem Maße. Diese Kostensätze sind ebenfalls Gegenstand der Untersuchung.

Es ist zu beachten, dass die hier formulierten Kostensätze vor der Übertragung auf konkrete Anwendungsfälle aus der Praxis zunächst exakt zu ermitteln sind. Ebenso sind alle weiteren modellfremden Kostenbestandteile der Logistikabwicklung zu ergänzen. Die getroffenen Annahmen zeigen jedoch das Verhältnis der berücksichtigten Kostensätze zueinander und geben Aufschluss über den Einfluss der betrachteten Kostenbestandteile in einer realitätsnahen Testumgebung.

## 6.2 Statistische Experimentplanung

Mithilfe des Werkzeugs der Simulation können für Systeme mit stochastischen Eigenschaften für eine Vielzahl unterschiedlicher Eingangsgrößen und Ablaufstrategien Aussagen über das Verhalten getroffen werden. Dabei können aber sowohl die Durchführung als auch die Auswertung der Experimente immense Zeitressourcen in Anspruch nehmen, da bei einer Ausweitung von Versuchsplänen die möglichen Kombinationsmöglichkeiten rasch zunehmen. Es ist daher wichtig, sich bei den Versuchen auf die Beantwortung der wesentlichen Fragestellungen zu konzentrieren und die erforderliche statistische Sicherheit herzustellen. Es gilt, ähnlich wie bereits bei der Entwicklung und Implementierung des eigentlichen Simulationsmodells, der Grundsatz der Abwägung zwischen Aufwand und Erkenntnisgewinn. Die VDI-Richtlinie 3633 Blatt 3 (1997) zeigt eine empfohlene Vorgehensweise zur Planung und Auswertung von Simulationsexperimenten im Umfeld von Produktion und Logistik auf (vgl. Abb. 6.2).

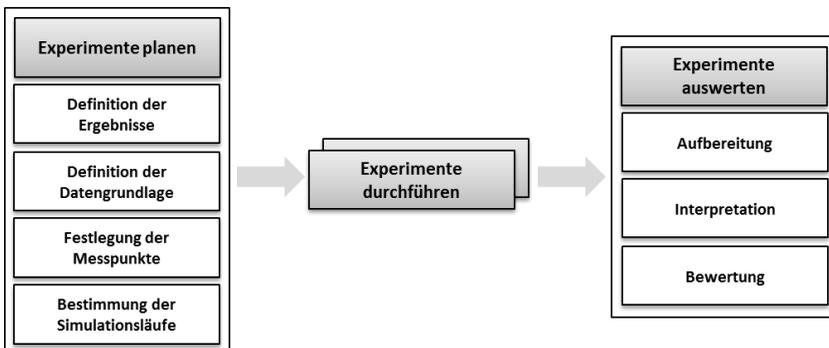


Abbildung 6.2: Teilaspekte und Ablauf der statistischen Experimentplanung

In dieser Arbeit wird unter einem *Simulationsexperiment* eine Sammlung von *Simulationsläufen* verstanden, die zum einen unter Variation der Parameter durchgeführt und zum anderen bei gleicher Parametereinstellung unter

Verwendung geänderter Startwerte für den Zufallszahlengenerator (Seed-Werte) repliziert werden. Die Simulationsläufe weisen ein festes Ende auf und liefern nach Ablauf Ausgabewerte für die untersuchten Größen, die durch Mittelwertbildung über mehrere Läufe analysiert werden können. Bei dieser Art der Simulation gilt es folgendes zu untersuchen und festzulegen:

- Welche Zeitspanne zu Beginn des Simulationslaufs sollte nicht in die Betrachtung mit eingehen, um Einschwingeffekte auszublenden und somit einen nahezu stationären Zustand abzubilden?
- Wie lang sollte ein Simulationslauf mindestens sein und welche Anzahl an Wiederholungen mit unterschiedlichen Seed-Werten sollte durchgeführt werden, um zuverlässige Aussagen aus den Ergebnissen zu erhalten?

Die erste Fragestellung ist in der Literatur als *simulation startup problem* bekannt. Eine eindeutige Bestimmung des Einschwingpunkts ist in der Regel nicht möglich, so dass in der Praxis heuristische Verfahren zur Abschätzung zum Einsatz kommen. Law schlägt das graphische Verfahren nach Welch vor, um das Einschwingverhalten für mehrer unabhängige Replikationen eines Simulationslaufes zu untersuchen (Law 2015, nach Welch (1981 und 1983)). Dabei geht das Verfahren wie folgt vor:

- Es werden Beobachtungswerte einer Zielgröße  $Y_{ji}$  über  $j$  Replikationen und  $i$  Zeitpunkte je Replikation erzeugt. Die Anzahl der Replikationen sollte dabei größer-gleich fünf sein und die Länge der Simulationsläufe sollte möglichst groß gewählt werden.
- Durch Mittelwertbildung über alle Replikationen ergeben sich die Zeitreihenwerte  $\bar{Y}_i$ .
- Um die höheren Frequenzteile der Schwankungen zu entfernen, erfolgt mit der Methode des gleitenden Mittelwerts eine Glättung der Zeitreihe zu  $\bar{Y}_i(w)$ . Dabei sollte das Fenster möglichst klein sein und

mit Augenmaß so gewählt werden, dass sich durch angemessene Glättung der Einschwingpunkt abzeichnen kann.

- Im letzten Schritt werden die Werte der geglätteten Zeitreihe in einem Diagramm über die Zeit aufgetragen. Der Einschwingpunkt lässt sich näherungsweise dort ablesen, wo die Werte der Zeitreihe zu konvergieren beginnen. Auf dieser Grundlage sollte die Aufwärmphase der Simulation konservativ geschätzt werden.

Die zweite Fragestellung, nämlich die nach der Länge der Simulation und der Anzahl der Replikationen, lässt sich über die Betrachtung der Konfidenzintervalle für die Zielgrößen des Modells beantworten. Dabei gilt, dass eine stärkere Streuung der Ergebnisse der einzelnen Replikationen zu breiteren Konfidenzintervallen führt. Durch die Verlängerung der Simulationsdauer und die Erhöhung der Replikationsanzahl nähert sich das geschätzte mittlere Ergebnis dem wahren Mittelwert zunehmend an. Durch die Unabhängigkeit der einzelnen Stichproben wird sich wegen des zentralen Grenzwertsatz der Wahrscheinlichkeitsrechnung approximativ eine Normalverteilung der Mittelwerte einstellen. Es gilt, dass eine Vervierfachung der Stichproben in etwa zu einer Halbierung der Konfidenzintervallbreite führt (Law 2015). Über das  $t$ -Quantil mit  $(n - 1)$  Freiheitsgraden errechnet sich das Konfidenzintervall zum Mittelwert für die Vertrauenswahrscheinlichkeit  $(1 - \alpha)$  und  $n$  Replikationen wie folgt:

$$\bar{x} \pm t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{\text{Var}(x)}{n}} \quad (6.1)$$

Auch an dieser Stelle ist eine eindeutige Bestimmung von Simulationseende und Replikationsanzahl im Voraus nicht möglich und es muss eine Abschätzung mithilfe von statistischen Methoden erfolgen. Sofern die Breite der Konfidenzintervalle nicht im gewünschten Rahmen liegt, kann durch die iterative Erhöhung der Replikationsanzahl die statistische Sicherheit der Experimente hergestellt werden. In der Phase der Experimentauswertung können bei einem ausreichend großen Stichprobenumfang auch vertiefende Verteilungs-

und Hypothesentests Aufschluss über die Aussagekraft der Simulationsergebnisse liefern (Hartung 2009).

Um die Anzahl der durchzuführenden Simulationen unter Einhaltung der geforderten Datenqualität gering zu halten, dienen *Versuchspläne* der systematischen Festlegung der Einstellungen der Einflussgrößen (*Faktoren*). Weit verbreitet sind in diesem Zusammenhang Screening-Versuchspläne, da mit diesen eine Untersuchung von Haupt- und Wechselwirkungseffekten durchgeführt werden kann (vgl. VDI-Richtlinie 3633 Blatt 3 (1997)). Es werden dabei die oberen und unteren Grenzen der Einstellmöglichkeiten (+)/(-) der Faktoren betrachtet und der Einfluss auf die Zielgrößen ermittelt. Die *Haupteffekte* geben die Veränderung der Zielgrößenwerte zwischen der (+)- und der (-)-Einstellung der einzelnen Faktoren wieder. Durch Einstellungskombinationen über mehrere Faktoren werden *Wechselwirkungseffekte* ermittelt. Werden alle zweistufigen Einstellungen der Faktoren berücksichtigt, liegt ein *vollfaktorierter* Versuchsplan vor. Die Anzahl der Versuche ergibt sich kombinatorisch aus  $2^k$  für  $k$  Faktoren. Es zeigt sich das exponentielle Wachstum der Versuchsanzahl bei einer steigenden Anzahl der zu berücksichtigen Faktoren. Zur weiteren Reduzierung der durchzuführenden Versuche können *teilkfaktorielles* Versuchspläne dienen. Dabei werden bei  $2^{k-1}$ -Plänen nur noch die Hälfte der Einstellungen und bei  $2^{k-2}$ -Plänen sogar nur ein Viertel der möglichen Faktoreinstellungen vorgenommen. Dabei sollte das Wissen über das untersuchte System genutzt werden, um vernachlässigbare Faktoreinstellungen und Faktorkombinationen aus der Untersuchung auszuschließen und den Fokus auf die maßgeblichen Einflussfaktoren zu legen (Law 2015).

## 6.3 Untersuchung des Systemverhaltens

Im Folgenden wird untersucht, wie sich das modellierte System unter dem Einfluss stochastischer Effekte verhält und welchen Einfluss einzelne Maßnahmen des in Kapitel 4.1.3 vorgestellten Handlungsrahmens auf die Zielgrößen haben. Dies dient zum einen dem grundsätzlichen Verständnis der Wirk-

zusammenhänge, zum anderen wird dadurch deutlich, in welchem Kontext die vorgeschlagenen Modelle zur Planung und Steuerung simulativ evaluiert wurden. Die Experimente erfolgen zunächst für Einstellungen einzelner Faktoren unter der Annahme *ceteris paribus*, um die Sensitivität zu ermitteln. Im Anschluss daran werden besonders einflussreiche Faktoren in Wirkkombination gesetzt. Die operative Auftragssteuerung bleibt zunächst noch unberücksichtigt. Es gilt das FIFO-Prinzip bei der Reihenfolgebildung in den jeweiligen Teilprozessen des Modells. Die Untersuchung des Systemverhaltens erfolgt unter Berücksichtigung einer Grundkonfiguration, die sich wie folgt beschreiben lässt:

- Die mittlere tägliche Nachfrage der Sekundärprodukte aus dem Lager entspricht dem *Demand* der Solomon-Testinstanzen (vgl. Anlage A). Die Variabilität der Nachfrage wird einheitlich mit  $SCV_D = 0,15$  angenommen, so dass sich die Parameter der Gammafunktion der Nachfrage bestimmen lassen.
- Die Bestellmenge  $q_{opt}$  wird unter Berücksichtigung eines Verhältnisses von bestellfixen Kosten und Lagerhaltungskosten von 2:1 bestimmt und auf volle 100 Mengeneinheiten aufgerundet. Der Bestellpunkt  $s_{opt}$  wird unter Berücksichtigung eines angepeilten  $\beta$ -Servicegrads von 0,95 und einer Wiederbeschaffungszeit von  $l = 5$  Perioden ermittelt.
- Die Ladekapazität eines LKW beträgt 3.400 Mengeneinheiten (100 ME entsprechen einer Standard-Palette). Täglich wird je Vorholgebiet und je Nachlaufrelation eine Tour geplant. Die mittlere Geschwindigkeit der Transportmittel beträgt 19,44 m/s (rund 70 km/h).
- Die mittlere Bearbeitungszeit für die physischen Logistikprozesse bei den Lieferanten und den Hub-Logistikdienstleistern liegt bei 2 Stunden je Arbeitsstation.

### 6.3.1 Untersuchungen zur Experimentplanung

Die initialen Untersuchungen dienen der Konfiguration der Experimentierumgebung, so dass die statistisch abgesicherte Durchführung der weiteren Versuche gewährleistet werden kann. Dazu wird das entwickelte Modell zunächst hinsichtlich des Einschwingverhaltens und des Einflusses des Stichprobenumfangs auf die Breite der Konfidenzintervalle untersucht. Ausgangslage ist die eingangs vorgestellte Grundkonfiguration des Modells. Als relevante Beobachtungszielgrößen werden Kennzahlen gewählt, die zunächst aufgrund der Starteinstellung des Modells definierte Werte annehmen und erwartungsgemäß in einem stabilen System zur Laufzeit mit dem wahren Mittelwert konvergieren. Es werden folgende Größen auf das Einschwingverhalten hin untersucht:

- Der *physische Bestand* nimmt zunächst die Werte aus der vorgegebenen Einstellung der Simulation an. Über die Zeit stellt sich durch das Nachfrageverhalten und die eintreffenden Lieferungen in einem eingeschwungenen Zustand ein stabiles Bestandsniveau ein.
- Der Anteil ungenutzter Fahrzeuge im Vorlauf und im Nachlauf wird zunächst hoch sein, da noch nicht genügend Transportaufträge zur Auslastung der Transportkapazitäten bereitstehen. Über die Zeit wird sich allerdings durch die ausgelösten Bestellungen und bereitgestellten Sendungen ein eingeschwungener Zustand des Transportsystems einstellen. Dieser Umstand spiegelt sich in der *Lieferzeit* der Aufträge von der Bestellung bis zum Wareneingang des Herstellers wider.

Die Untersuchung der Einschwingphase erfolgt über einen simulierten Zeitraum von 330 Tagen und 20 Replikationen mit dem eingangs beschriebenen graphischen Verfahren nach Welch (Law 2015, nach Welch (1981 und 1983)). Die Abbildung 6.3 zeigt das Einschwingverhalten des mittleren physischen Bestands über alle Sekundärprodukte und für einen gleitenden Mittelwert über zehn Perioden ( $w=10$ ). Es ist zu sehen, dass etwa ab der 60. Periode von einem

eingeschwungenen Zustand des Lagersystems auszugehen ist und der mittlere physische Bestand sich dem wahren Mittelwert annähert.

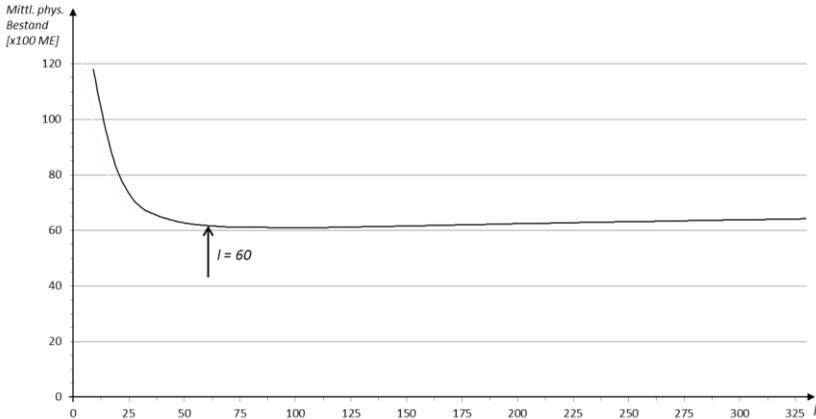
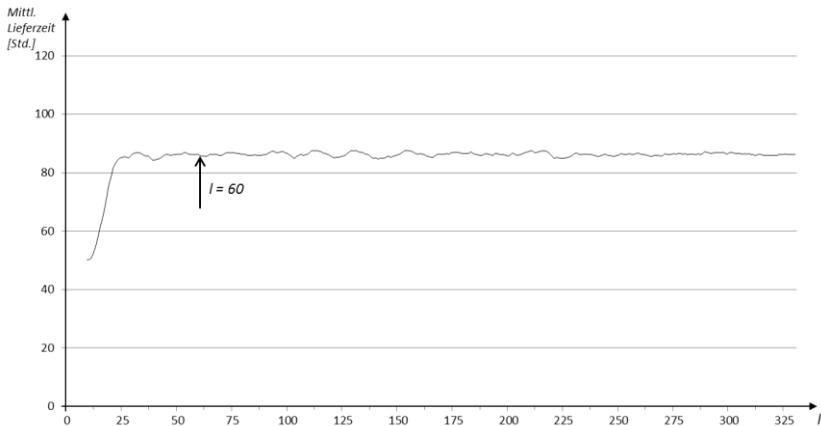


Abbildung 6.3: Einschwingverhalten des mittleren physischen Bestands ( $w=10$ )

Die Betrachtung des Transportsystems zeigt, dass bereits früher ein eingeschwungener Zustand eintritt (vgl. Abb. 6.4). Die mittlere Lieferzeit der Aufträge im System ist zunächst noch verhältnismäßig kurz und nimmt mit zunehmender Auslastung der Ressourcen zu.

Abbildung 6.4: Einschwingverhalten der mittleren Lieferzeit ( $w=10$ )

Der Einschwingpunkt wird aufgrund der Einschwingeffekte des Lagersystems so gewählt, dass die ersten 60 Tage nicht in die Betrachtung eingehen. Dieser Zeitraum deckt auch bei den übrigen Teilsystemen die Einschwingphase ab. Die Länge der Simulationen sollte nach Law ein Vielfaches der Einschwingphase betragen und ebenfalls mit Augenmaß unter Kenntnis des zyklischen Verhaltens gewählt werden (Law 2015). Im Rahmen der Experimente werden je Lauf 300 Tage simuliert, so dass 240 Tage in die Betrachtung eingehen. Die statistische Sicherheit wird schließlich auf Grundlage der festgelegten Simulationsdauer über die Anzahl der Replikationen erzielt. Die Tabelle 6.1 zeigt den Zusammenhang zwischen der Anzahl an Replikationen und den resultierenden Konfidenzintervallen für die Kennzahl des mittleren physischen Bestands mit gegebener Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$ . Die Untersuchungen basieren auf dem Simulationsmodell in der Grundkonfiguration im eingeschwungenen Zustand.

Replikationen	$n=2$	$n=5$	$n=10$	$n=15$	$n=20$
$\bar{x}$	6.368	6.442	6.449	6.442	6.447
$Var(x)$	12.974	4.744	5.678	6.685	6.901
$\pm$	1.023	86	54	45	39
Anteil von $\bar{x}$	16,1 %	1,3 %	0,8 %	0,7 %	0,6 %

Tabelle 6.1: Konfidenzintervalle für mittleren physischen Bestand ( $\alpha=0,05$ )

Es zeigt sich, dass eine höhere Replikationsanzahl zu einer schmaleren Konfidenzintervallbreite führt (viermal mehr Stichproben führen in etwa zur Halbierung). Bei zehn Replikationen liegt der Anteil dieser Breite vom Mittelwert bei unter einem Prozent, so dass  $n=10$  für die weiteren Versuche gewählt wird.

### 6.3.2 Untersuchungen zu den Störeinflüssen

Das *erste Experiment* umfasst die Untersuchung der *Störgrößen der physischen Logistikprozesse* auf das System. Dabei wird ausgehend von der eingangs beschriebenen Grundkonfiguration des Modells eine Variation der Faktoren vorgenommen. Die Tabelle 6.2 zeigt die für das Experiment relevanten Einstellungen jeweils in der niedrigsten und höchsten Stufe. Die mittlere Fahrgeschwindigkeit der Transportmittel der Vor- und Nachlauftouren verändert sich, bei gleichbleibenden Ober- und Untergrenzen der Dreiecksverteilung, in einem Bereich von 13,9 bis 20,8 m/s. Dies entspricht besonders langsam bzw. besonders schnell verlaufenden Touren bei sonst gleichbleibenden technischen und organisatorischen Randbedingungen. Die Bearbeitungszeit der physischen Logistikprozesse bei den Lieferanten in den Hub-Logistikdienstleistern wird ebenfalls bei gleichbleibenden Verteilungsgrenzen im Mittelwert variiert. Die Bandbreite der Einstellungen liegt hier bei 0,5 bis 4 Std. je Arbeitsstation. Die Untersuchung erfolgt im Screening-Verfahren, um das Systemverhalten abzubilden und interessante Fälle für die weiteren Unter-

suchungen zu identifizieren. Bei der vollfaktoriellen Abbildung des Versuchsplans ergeben sich bei den möglichen Einstellmöglichkeiten mit jeweils zehn Replikationen  $2^6 * 10 = 640$  Simulationsläufe.

Faktor	Einstellungen	
	(-)	(+)
Mittl. Fahrgeschwindigkeit Vorlauf [m/s]	13,9	20,8
Mittl. Fahrgeschwindigkeit Nachlauf [m/s]	13,9	20,8
Mittl. Bearbeitungszeit Bereitstellungsprozess 1/2 [Std.]	0,5	4
Mittl. Bearbeitungszeit Bereitstellungsprozess 2/2 [Std.]	0,5	4
Mittl. Bearbeitungszeit Umschlagprozess 1/2 [Std.]	0,5	4
Mittl. Bearbeitungszeit Umschlagprozess 2/2 [Std.]	0,5	4

Tabelle 6.2: Faktoreinstellungen zur Untersuchung der Störgrößen der physischen Logistikprozesse

Zur Auswertung der Haupteffekte wird das Experiment daher zunächst auf einen  $2^3$ -Plan reduziert. Dabei werden die mittleren Fahrgeschwindigkeiten im Vor- und Nachlauf (Faktor A) sowie jeweils die Bearbeitungszeiten bei den Lieferanten (Faktor B) und Hub-Logistikdienstleistern (Faktor C) zu Gruppen zusammengefasst und gemeinsam in der niedrigsten und höchsten Einstellung betrachtet. Die Zahl der auszuwertenden Einzelversuche kann somit von 64 auf acht reduziert werden. Je Gruppe werden schließlich die Haupteffekte (HE) auf die Zielgrößen ermittelt. Dazu werden die mittleren Ergebniswerte über alle Versuche mit der jeweiligen Faktoreinstellung berechnet und im Anschluss daran die absolute Veränderung ermittelt. Die Tabelle 6.3 zeigt die Haupteffekte für die Zielgrößen in einer Mittelwertbetrachtung.

Kennzahl	A(-)	A(+)	HE <sub>A</sub>	B(-)	B(+)	HE <sub>B</sub>	C(-)	C(+)	HE <sub>C</sub>
Wiederbeschaffungszeit (WBZ) [Std.]	86,39	86,21	-0,18	86,28	86,31	0,03	86,29	86,31	0,02
davon Wartezeit [Std.]	61,33	61,56	0,23	62,61	60,28	-2,32	62,59	60,30	-2,30
Bereitstellungsprozess ( $t_{pL}$ ) [Std.]	16,50	16,50	0,00	15,33	17,68	2,35	16,50	16,51	0,01
Transportprozess Vorlauf ( $t_{pLDV}$ ) [Std.]	29,03	28,78	-0,25	30,11	27,71	-2,40	28,94	28,87	-0,07
Umschlagprozess ( $t_{pLDH}$ ) [Std.]	12,71	13,04	0,33	12,88	12,87	0,00	11,71	14,04	2,33
Transportprozess Nachlauf ( $t_{pLDN}$ ) [Std.]	28,14	27,88	-0,26	27,96	28,05	0,09	29,14	26,88	-2,26
Mittlerer phys. Bestand [x100 ME]	64,49	64,58	0,10	64,56	64,51	-0,05	64,59	64,48	-0,10
$\beta$ -Servicegrad	0,99	0,99	0,00	0,99	0,99	0,00	0,99	0,99	0,00

Tabelle 6.3: Haupteffekte der Faktorgruppen auf die Zielgrößen

Es zeigt sich, dass der Einfluss für die modellierte Konfiguration über alle Faktoreinstellungen aus Empfängersicht gering ist. Auch bei ungünstiger Einstellung ergibt sich über alle Sekundärprodukte hinweg keine Verschlechterung des  $\beta$ -Servicegrads. Ebenso bleibt das Bestandsniveau (über alle Sekundärprodukte) nahezu unverändert. Dies liegt vor allem an den zeitlichen Puffern, die sich entlang des Gesamtprozess befinden. Rund 70% der Zeit wartet eine Sendung auf die Durchführung der physischen Prozesse, was einem durchaus realistischen Wert in der Logistik entspricht. Durch die Verzögerung oder Beschleunigung in der Ausführungsphase im untersuchten Rahmen finden im modellierten logistischen Netzwerk lediglich zeitliche Verschiebungen zwi-

schen den einzelnen Teilprozessen sowie eine Veränderung des Wartezeitanteils statt. Bei einem solchen robust geplanten logistischen Netzwerk sind die Störeinflüsse der physischen Logistikprozesse auf die aggregierten Kennzahlen also vergleichsweise gering. Es sollte in so einem Fall der Fokus auf die Identifikation und Beseitigung von Ineffizienz gelegt werden und bekannte kritische Aufträge sollten in einer Einzelbetrachtung priorisiert durch das System geführt werden.

Die *zweite Experimentreihe* untersucht die möglichen *Störeinflüsse*, die von der *Herstellerseite* ausgehen können. Dabei wird ebenfalls die Planungsentscheidung über die Bestellmenge  $q$  miteinbezogen. Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, können zu große Lose in der Logistik einen negativen Einfluss auf die Prozesse haben. Es wird daher untersucht, wie sich unterschiedliche Bestelllosgrößen auswirken. Der untere Wert für  $q$  liegt bei 50 ME, was in den Größenverhältnissen des Modells dem Äquivalent einer halben Palette entspricht. Der obere Wert der Bestelllosgröße nimmt mit 850 ME ein Viertel der Ladekapazität der eingesetzten Transportmittel an. Zum Vergleich: Die Bestellmengen in der Grundkonfiguration werden mithilfe der EOQ-Formel bestimmt (auf volle Palettenäquivalente gerundet) und liegen zwischen 100 und 300 ME. Des Weiteren wird in der Experimentreihe der Einfluss einer hohen bzw. einer niedrigen Nachfragevariabilität untersucht. Die Werte variieren dabei zwischen 0,01 in der niedrigen und 0,75 in der hohen Einstellung. Für jede Konfiguration wird der Bestellpunkt  $s$  individuell ermittelt (vgl. Anhang A).

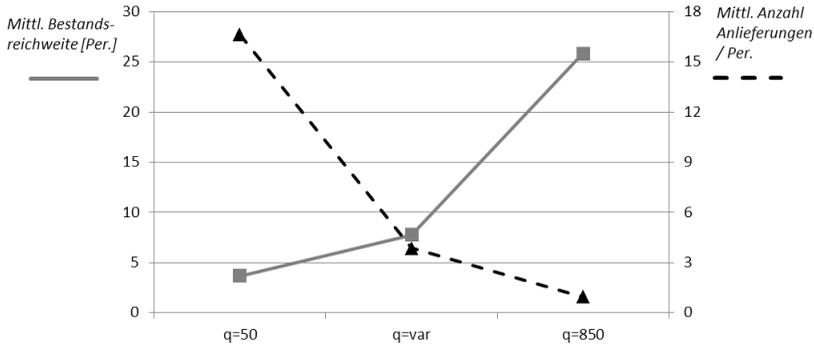


Abbildung 6.5: Einfluss der Bestellmenge  $q$  auf die Bestandsreichweite und die Anzahl der täglichen Anlieferungen

Die Abbildung 6.5 zeigt den Einfluss der Bestellmenge  $q$  auf den physischen Bestand und die Anlieferfrequenz über alle Sekundärprodukte. In der Darstellung ist erkennbar, dass ausgehend von der Grundkonfiguration größere Bestelllosgrößen zu einem höheren Bestandsniveau führen. Größere Lose reduzieren zwar augenscheinlich durch Bündelung den logistischen Aufwand, sollten jedoch unter kritischer Berücksichtigung der Bestandskosten ausgelegt werden. Kleinere Bestelllosgrößen führen im Modell zu einer deutlichen Reduzierung des Bestandsniveaus, was mit Blick auf den typischen Sägezahnverlauf des physischen Bestand einer  $(s,q)$ -Lagerhaltungspolitik leicht nachvollziehbar ist. Das Fehlmengenniveau ist in allen drei Fällen vergleichbar ausgeprägt. Die Ergebnisse decken sich mit der Annahme über die Wirkung der EOQ-Formel und validieren dahingehend das Modell.

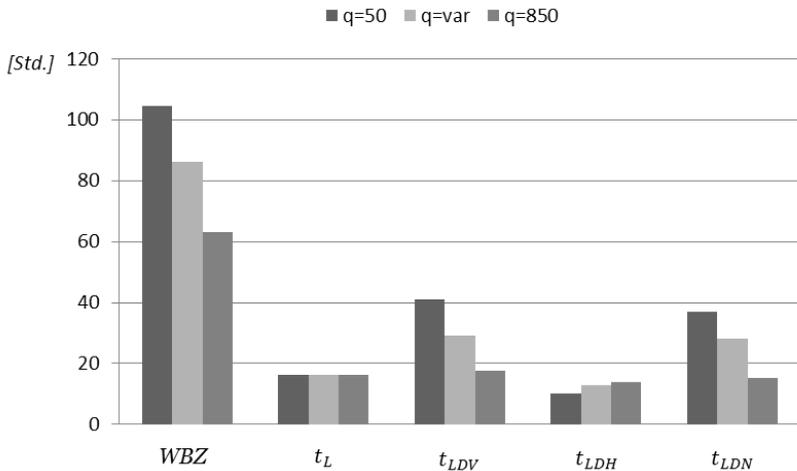


Abbildung 6.6: Einfluss der Bestellmenge  $q$  auf die mittleren Prozesszeiten

Die Abbildung 6.6 zeigt die Ausprägung der mittleren Wiederbeschaffungszeit (WBZ) und der einzelnen Zeitabschnitte des Prozesszeitmodells für die drei simulierten Einstellungen der Bestellmenge  $q$ . Es ist zu sehen, dass mit kleiner werdenden Bestelllosgrößen eine erhöhte mittlere Durchlaufzeit der Aufträge einhergeht. Ein weiterer Blick auf die Simulationsdaten ergibt zudem, dass bei  $q=50$  nur noch 66% der Sendungen in der bei der Bestellpunktbestimmung angenommenen WBZ von 120 Stunden liegen (Zum Vergleich:  $q=var$  mit 96% Liefertermintreue und  $q=850$  mit 99% Liefertermintreue). Die Verzögerungen stellen sich während der Teilprozesse des Transports (im Vorlauf und im Nachlauf) ein. In Tabelle 6.4 ist daher der Vergleich der Tourkennzahlen für alle drei Einstellungen der Bestelllosgröße zu sehen.

Prozess	Kennzahl	q=50	q=var	q=850
Vorlauf	Grad ungenutzter Touren	0,00	0,01	0,55
	Mittl. Strecke [km]	305	91	64
	Mittl. Dauer [Std.]	10,1	3,2	2,2
	Mittl. Anzahl Aufträge	8,3	2,0	1,1
	Mittl. Anzahl ME	417	422	937
Nachlauf	Grad ungenutzter Touren	0,00	0,00	0,54
	Mittl. Strecke [km]	191	191	191
	Mittl. Dauer [Std.]	4,5	4,3	4,2
	Mittl. Anzahl Aufträge	8,3	1,9	1,1
	Mittl. Anzahl ME	417	418	900
Gesamt	Gesamtstrecke [km]/ Gesamtanzahl ME	1,2	0,7	0,3

Tabelle 6.4: Einfluss der Bestellmenge  $q$  auf die Tourkennzahlen

Es ist deutlich zu sehen, dass durch die kleinen Sendungen in enger zeitlicher Folge der Nutzungsgrad der Transportmittel steigt. Während bei der Einstellung  $q=850$  durch die Bündelung im Schnitt nicht einmal jede zweite Tour erforderlich wäre, wird bei der Einstellung  $q=50$  jede verfügbare Tour gefahren. Die Auslastung der genutzten Fahrzeuge sinkt dabei jedoch im Vergleich ab. Die mittlere Dauer einer Tour sowie die mittlere zurückgelegte Strecke steigen an, da jeweils mehr Lieferanten angefahren werden. Deutlich wird dies, wenn die transportierten Mengeneinheiten in Bezug zur zurückgelegten Gesamtstrecke gesetzt werden. Hier wird bei den kleineren Sendungen im Schnitt die vierfache Wegstrecke je Mengeneinheit zurückgelegt. Das starke Ansteigen der Durchlaufzeit in den Teilprozessen des Transports ist im Modell auch der Vorgabe von Planungsintervallen (tägliche Tourenplanung) geschuldet. Längere Touren führen also dazu, dass bei einem Verpassen von Planungszeitfenstern sprungfixe Verzögerungen auftreten. Ein Vergleich der beiden Vorholgebiete zeigt zudem, dass das zufällig-geclusterte Gebiet RC im Modell durch ungünstigere Kombinationen der Tourpunkte anfälliger für diesen Effekt ist (vgl. Abb. 6.7).

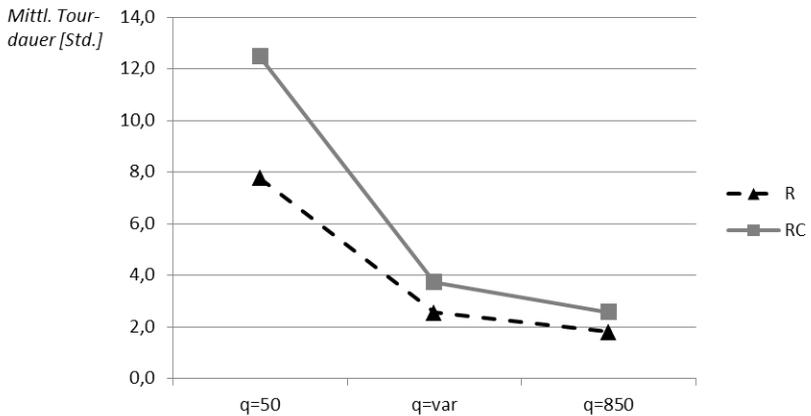


Abbildung 6.7: Mittlere Tourdauer in verschiedenen Vorholgebieten

In der Realität wären die sichtbaren Einflüsse auf das Transportsystem vermutlich weniger stark ausgeprägt, da eine Tourenplanung über viele Kunden in Kombination mit flexiblen Priorisierungs- und Kapazitätsentscheidungen häufig trotzdem zu einer günstigen Auftragskombination aus Sicht der Kunden und des Logistikdienstleisters führen würde. Die Betrachtung *ceteris paribus* zeigt jedoch deutlich den starken Wirkzusammenhang zwischen der taktischen Planung der beiden Teilprozesse eines logistischen Netzwerks. Zu Erreichung eines Gesamtoptimums müsste das Bestandsmanagement des Herstellers simultan zur Kapazitäts- und Ablaufplanung der Lieferanten und Logistikdienstleister erfolgen, um den kostenmäßigen Trade-off zwischen einer Auftragsbündelung und einem möglichst kontinuierlichen Materialfluss kleiner Lose zu finden.

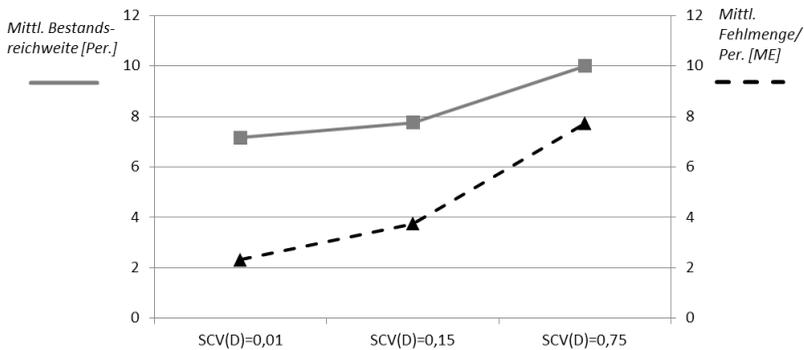


Abbildung 6.8: Einfluss der Nachfragevariabilität auf das Bestandsniveau und die Fehlmenen

Die Abbildung 6.8 zeigt den Einfluss der Variabilität der Periodennachfrage ( $SCV(D)$ ) auf die mittlere Bestandsreichweite und die mittlere Fehlmenge je Periode. Ausgangslage der Betrachtung ist wiederum die Grundkonfiguration mit einer einheitlichen Variabilität über alle Sekundärprodukte von 0,15. Zum Vergleich wird eine besonders niedrige Nachfrageschwankung mit einer Variabilität von 0,01 sowie eine hohe Einstellung mit 0,75 simuliert. Erwartungsgemäß führt die gleichmäßigere Nachfrage zu einer Verbesserung beider Kennzahlen. Die Servicegrade verbessern sich leicht und das Bestandsniveau sinkt über alle Sekundärprodukte von der höchsten bis zur niedrigsten Einstellung um rund 28% ab. Ein Einfluss der Nachfragevariabilität auf die übrigen Teilprozesse des logistischen Netzwerks lässt sich im modellierten Fall nicht zeigen. So ändern sich die durchschnittliche Wiederbeschaffungszeit und die Kennzahlen bei den Logistikdienstleistern und Lieferanten nicht. Der Hersteller hat also durch eine Verstetigung der eigenen Prozesse (etwa durch eine nivellierte Produktionsplanung) den Nutzen zunächst im eigenen Verantwortungsbereich zu erwarten. In Hinblick auf den Bullwhip-Effekt werden sich Vorteile allerdings mittel- und langfristig auch bei den Lieferanten einstellen.

### 6.3.3 Untersuchungen zur Maßnahmenwirksamkeit

In der *folgenden Experimentreihe* wird die *Wirksamkeit von taktischen Maßnahmen* mit Bezug zu dem in Kapitel 4.1.3 vorgestellten Katalog untersucht. Dazu wird zunächst auf der taktischen Ebene geprüft, welchen Einfluss die Auslegung des Bestellpunkt  $s$  hat. Dazu werden optimistische bzw. pessimistische Annahmen über die in der Realität nur abschätzbare Wiederbeschaffungszeit  $l$  getroffen. Die Abbildung 6.9 zeigt die gemessene Verteilung der Wiederbeschaffungszeit in der Grundkonfiguration über alle Sekundärprodukte. Der Durchlauf eines Auftrags, von Aufgabe der Bestellung bis zum Eingang ins Lager, wird im Schnitt in 86,2 Stunden oder 3,6 Perioden absolviert. Unter der konservativen Annahme über die Wiederbeschaffungszeit von  $l = 5$  Perioden wird dieser Wert in rund 96% der Fälle erreicht. Der Bestellpunkt  $s$  wird im folgenden Experiment für Annahmen über  $l$  von 3 bis 7 Perioden bestimmt (vgl. Anhang A) und der Einfluss auf die Kennzahlen untersucht.

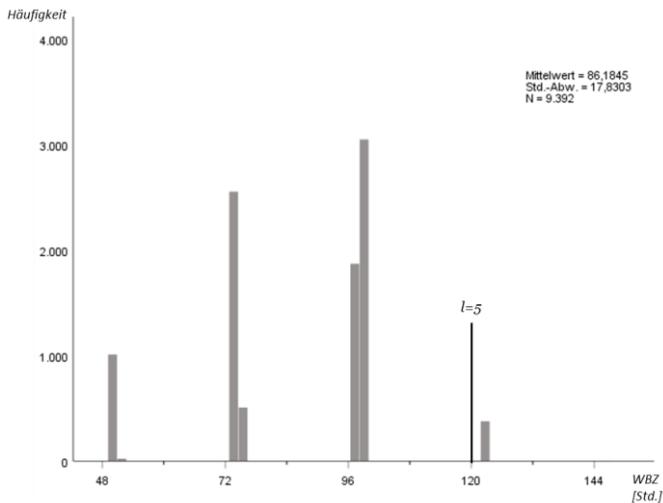


Abbildung 6.9: Histogramm der Wiederbeschaffungszeit in der Grundkonfiguration

In Abbildung 6.10 ist zu sehen, wie sich die aus den vorherigen Untersuchungen bereits bekannten Kennzahlen bei geänderten Annahmen über die Wiederbeschaffungszeit bei der Auslegung des Bestellpunkts  $s$  verhalten. Bei pessimistischer Planung ( $l = 7$ ) steigt der mittlere physische Lagerbestand im Vergleich zur optimistischen Planung leicht an. Die mittlere Fehlmenge je Periode sinkt hingegen durch den höher liegenden Bestellpunkt ab. Die Durchlaufzeiten der einzelnen Teilprozesse sowie die übrigen Kennzahlen im System ändern sich in allen drei Szenarien nicht. Es bestehen keine messbaren Wirkzusammenhänge zwischen der Bestellpunktauslegung im untersuchten Rahmen und den modellierten physischen logistischen Prozessen im Transport. Deutlich sichtbar ist allerdings, dass die Kennzahl der Liefertermintreue bei der optimistischen Planung stark absinkt, da nun eine schnellere Wiederbeschaffung erwartet wird. Es zeigt sich allerdings auch, dass die negativen Auswirkungen (etwa durch Fehlmengenereignisse) nicht korrelieren. Eine Logistik, die sich ausschließlich auf starre Liefertermine stützt, würde in der Folge zu Ineffizienz durch eine unnötige Priorisierung von Aufträgen führen.

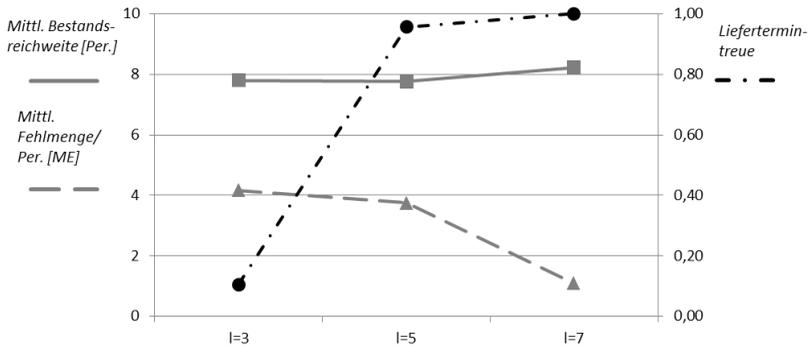


Abbildung 6.10: Einfluss der Annahme über die Wiederbeschaffungszeit auf das Bestandsniveau, die Fehlmengen und die Liefertermintreue

Zur Untersuchung des Einflusses der Transportkapazität auf das Gesamtsystem, werden die zur Verfügung stehenden Transportmittel variiert. Zum

einen erfolgt dazu die Einstellung der Anzahl der Transportmittel je Planungsintervall und zum anderen wird die Steigerung der Kapazität durch das Verkürzen der Planungsintervalle erreicht. Die Tabelle 6.5 zeigt die Entwicklung der Tourkennzahlen für die unterschiedlichen Planungsszenarien (Erläuterung der Bezeichnung am Beispiel der Grundkonfiguration Pl.=24/1: Die Tourenplanung erfolgt in einem Planungsintervall von 24 Stunden mit jeweils einem Transportmittel). Durch die Reduzierung der Transportkapazität steigen der Anteil genutzter Transportmittel und die Anzahl der Sendungen und Mengeneinheit je Transportmittel an. Eine Steigerung der Kapazität bewirkt gegenteilige Effekte. Dabei macht es für die betrachteten Kennzahlen kaum einen Unterschied, ob die Anzahl der verfügbaren Transportmittel bei gleichbleibendem Planungsintervall erhöht wird oder das Planungsintervall verkürzt wird. Letzteres wäre jedoch sinnvoller, da ein Fahrzeug dann für aufeinander folgende Umläufe verwendet werden könnte.

Prozess	Kennzahl	Pl.=12/1	Pl.=24/2	Pl.=24/1	Pl.=48/1
Vorlauf	Grad ungenutzter Touren	0,24	0,24	0,01	0,00
	Mittl. Strecke [km]	69	69	91	154
	Mittl. Dauer [Std.]	2,4	2,4	3,2	5,2
	Mittl. Anzahl Aufträge	1,3	1,3	2,0	3,9
	Mittl. Anzahl ME	274	273	422	831
Nachlauf	Grad ungenutzter Touren	0,18	0,29	0,00	0,00
	Mittl. Strecke [km]	191	191	191	191
	Mittl. Dauer [Std.]	4,3	4,3	4,3	4,4
	Mittl. Anzahl Aufträge	1,1	1,3	1,9	3,9
	Mittl. Anzahl ME	246	270	418	831
Gesamt	Gesamtstrecke [km]/ Gesamtanzahl ME	1,0	1,0	0,7	0,4

Tabelle 6.5: Einfluss der Transportkapazität auf die Tourkennzahlen

Ein Blick auf die Kennzahlen des Herstellers (vgl. Tabelle 6.6) verrät, dass durch die Reduzierung der Transportkapazität auch eine Verlängerung der mittleren Wiederbeschaffungszeit einhergeht. Der Anteil der Wartezeit nimmt dabei erheblich zu, da die Teilprozesse durch die verlängerten Planungsintervalle im Transport noch weniger synchron laufen und Aufträge bis zur nächsten Planung und Ausführung ruhen. Hinsichtlich des mittleren Lagerbestands (wieder über alle Sekundärprodukte betrachtet) zeigt sich eine geringfügige Verschlechterung durch die Reduzierung der Transportkapazität.

Da die Werte nahe beieinander liegen, erfolgt an dieser Stelle zusätzlich die Ausweisung der Konfidenzintervalle (für  $\alpha = 0,05$ ).

Kennzahl	PI.=12/1		PI.=24/2		PI.=24/1		PI.=48/1	
	Wert	±	Wert	±	Wert	±	Wert	±
Wiederbeschaffungszeit (WBZ) [Std.]	63,1	± 0,8	53,1	± 0,8	86,2	± 1,0	170,1	± 1,4
davon Wartezeit [Std.]	39,2	± 0,7	29,2	± 0,6	61,8	± 0,8	144,6	± 1,3
Physischer Bestand [x100 ME]	62,65	± 0,14	63,29	± 0,15	64,74	± 0,15	69,14	± 0,16

Tabelle 6.6: Einfluss der Transportkapazität auf die Kennzahlen des Herstellers

Zur Untersuchung der Wirkzusammenhänge der Bereitstellungsprozesse bei den Lieferanten und der Umschlagprozesse bei den Hub-Logistikdienstleistern erfolgt die Variation der Planungsintervalle, in der offene Aufträge in die Ausführungsreihenfolge gebracht und physisch abgearbeitet werden können. In der Grundkonfiguration wird zweimal täglich geplant und ausgeführt (PI.=12 [Std.]). Die untersuchten Einstellungen reichen von viermal täglich (PI.=6 [Std.]), über ein tägliches Intervall (PI.=24 [Std.]) bis hin zu einer zweitägigen Planung und Ausführung (PI.=48 [Std.]). Die Tabelle 6.7 zeigt die Auswirkungen auf die untersuchten Zielgrößen.

Kennzahl	PI.=6	PI.=12	PI.=24	PI.=48
Wiederbeschaffungszeit (WBZ) [Std.]	86,2	86,2	122,5	130,6
davon Wartezeit [Std.]	67,7	61,8	97,9	106,1
Bereitstellungsprozess ( $t_{pL}$ ) [Std.]	10,3	16,3	16,5	16,3
Transportprozess Vorlauf ( $t_{pLDV}$ ) [Std.]	35,1	29,1	41,1	41,2
Umschlagprozess ( $t_{pLDH}$ ) [Std.]	7,0	12,8	24,6	32,6
Transportprozess Nachlauf ( $t_{pLDN}$ ) [Std.]	33,7	28,0	40,3	40,5
Physischer Bestand [x100 ME]	64,49	64,74	68,69	72,27

Tabelle 6.7: Einfluss des Planungsintervalls der Lieferanten und Hub-Logistikdienstleister auf die untersuchten Zielgrößen

Es ist zu sehen, dass eine Verkürzung der Intervalle ab einem gewissen Punkt nicht mehr zu einer weiteren Verbesserung der WBZ führt. Es werden allerdings Aufträge früher an den Folgeprozess übergeben, so dass sich die Länge der Zeiträume zwischen den benachbarten Teilprozessen verschiebt. Die Abbildung 6.11 zeigt diesen Effekt für den Umschlagprozess im Hub. Hier führt die weitere Verkürzung dazu, dass die Prozesszeit des Nachlaufs um den gleichen Wert ansteigt. Dies bedeutet, dass sich der zeitliche Handlungsspielraum für den Folgeprozess erweitert und bei entsprechender Planung durch eine Synchronisation der Planungsintervalle über mehrere Prozessschritte eine Reduzierung der WBZ möglich wäre.

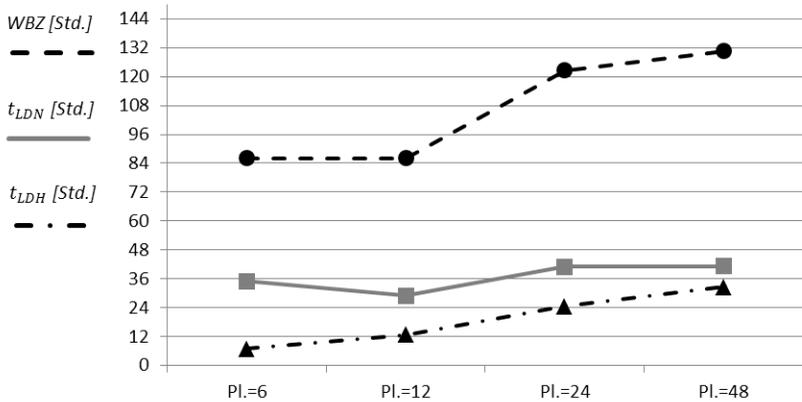


Abbildung 6.11: Mittlere Prozesszeiten für die untersuchten Planungsintervalle

Die Untersuchung der *Wirksamkeit von operativen Maßnahmen* erfolgt in der nächsten *Experimentreihe*, ebenfalls mit Bezug zum vorgestellten Maßnahmenkatalog (vgl. Kapitel 4.1.3). Da das eingangs vorgestellte Grundszenario einen robust geplanten Systemzustand repräsentiert, erfolgt für die Wirksamkeitsbewertung der operativen Maßnahmen zunächst die Modifikation der Ausgangslage. Es wird dazu ein Systemzustand modelliert, der hinsichtlich der Kennzahlen unterhalb der gewünschten Leistungswerte liegt und durch die Maßnahmen realistischerweise noch positiv beeinflusst werden kann. Da die vorhergehenden Untersuchungen gezeigt haben, dass der Einfluss der modellierten Störungen auf das Gesamtsystem jeweils gering ist, wird eine Kombination gewählt. Es werden folgende Einstellungen in Abweichung zur Grundkonfiguration für die Untersuchung der Maßnahmen auf der operativen Ebene modelliert:

- Die Bestelllosgrößen werden wie in der ersten Grundkonfiguration variabel ermittelt und eingestellt. Bei der Auslegung des Bestellpunkts  $s$  wird allerdings eine optimistische Annahme über die Wiederbeschaffungszeit von  $l = 3$  getroffen.

- Die mittleren Fahrgeschwindigkeiten der Dreiecksverteilung im Vor- und Nachlauf werden auf die niedrige Einstellung von 13,9 m/s gesetzt. Dies unterstellt ein von regelmäßigen Verzögerungen betroffenes Verkehrsgeschehen (etwa durch regelmäßigen Stau in Ballungsgebieten).
- Der erste Teilprozess der Bereitstellung bei den Lieferanten wird mit 144 Std. als obere Grenze der Dreiecksverteilung parametrisiert. So werden Lieferverzögerungen bei den Lieferanten simuliert, die über kurzfristige logistische Ablaufprobleme hinaus gehen (etwa durch Verzögerungen in der Produktion). Die Planungsintervalle bei den Lieferanten und Logistikdienstleistern werden einheitlich auf 24 Std. gesetzt. Dies entspricht einer täglichen Auftragsbearbeitung bei allen Akteuren.

Die Tabelle 6.8 zeigt die Auswirkungen der getroffenen Annahmen auf die aggregierten Kennzahlen des Gesamtsystems. Es ist zu sehen, dass das zweite Szenario im Vergleich zur Ausgangslage mit vergleichsweise robuster Planung und zuverlässiger Ausführung der logistischen Prozesse in allen wesentlichen Leistungskategorien abfällt. Es zeigt sich auch hier deutlich der bereits erläuterte Zusammenhang zwischen der Liefertermintreue auf Grundlage fixer Liefertermine sowie den Bestands- und Servicegradwerten. Während die Liefertermintreue durch die Erhöhung der Durchlaufzeiten im System drastisch abfällt, steigen Fehlmengen und Bestand nur moderat an. Eine Beurteilung der Dringlichkeit von Sendungen allein auf Grundlage dieser Kennzahl würde demnach zu einer erheblichen Überschätzung führen.

Kennzahl	Szen.=2	Szen.=1
Wiederbeschaffungszeit (WBZ) [Std.]	162,5	86,2
davon Wartezeit [Std.]	90,2	61,8
Bereitstellungsprozess ( $t_{pL}$ ) [Std.]	63,9	16,4
Transportprozess Vorlauf ( $t_{pLDV}$ ) [Std.]	33,7	29,0
Umschlagprozess ( $t_{pLDH}$ ) [Std.]	24,5	12,8
Transportprozess Nachlauf ( $t_{pLDN}$ ) [Std.]	40,4	28,0
Physischer Bestand [ $\times 100$ ME]	76,43	64,64
Bestandsreichweite [Per.]	9,2	7,8
$\beta$ -Servicegrad	0,99	0,99
Liefertermintreue für $l = 3$	0,00	0,96

Tabelle 6.8: Kennzahlen der zweiten Grundkonfiguration ohne Anwendung operativer Maßnahmen im Vergleich zur Ausgangslage

Eine Maßnahme zur Beeinflussung der Abläufe auf der operativen Ebene ist die *Priorisierung* von Aufträgen. Die bevorzugte Abarbeitung kommt überall dort positiv zum Tragen, wo die Summe der Arbeitsinhalte die Kapazität eines Bearbeitungsloses überschreitet und die Auswahl und Reihenfolgebildung von Aufträgen erfolgen muss. Es wird auf der Grundlage der Simulationsergebnisse des zweiten Grundscenarios eine Lieferanten-fixe Priorisierung der Aufträge vorgenommen. Das Auswahlkriterium ist ein schlechter  $\beta$ -Servicegrad als Ausdruck für entstehende Fehlmengen. Unter Variation des Priorisierungsanteils (zwischen 0% und 25% der Lieferanten) können die Auswirkungen auf das Gesamtsystem und die Aufträge priorisierter und nicht priorisierter Lieferanten untersucht werden.

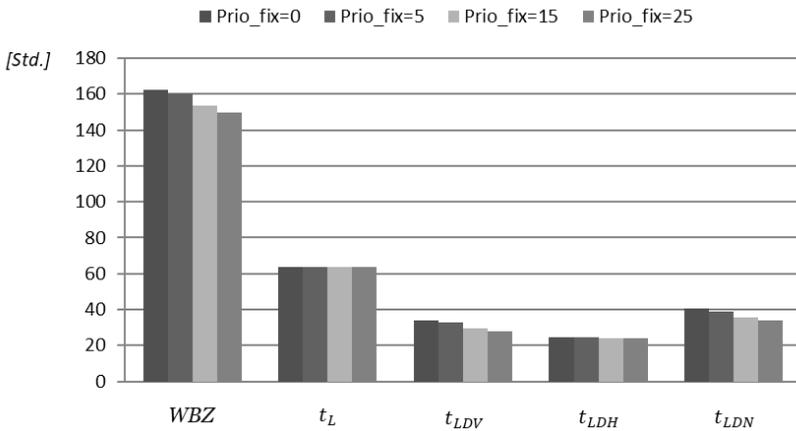


Abbildung 6.12: Mittlere Prozesszeiten für die untersuchte Anzahl priorisierter Lieferanten

Durch die bevorzugte Abarbeitung der Aufträge von Lieferanten mit Priorisierungsmerkmal kommt es für diese zu einer Verkürzung der Durchlaufzeiten im Vor- und Nachlauf. Die Abbildung 6.12 zeigt den Einfluss der Priorisierung auf die mittlere Wiederbeschaffungszeit (WBZ) über alle Lieferanten. Aus Gesamtsystemsicht führt demnach die Beschleunigung der zuvor schlechtesten Aufträge insgesamt zu einer Verkürzung der Durlaufzeiten. Die Einflüsse auf die aggregierten Bestands- und Leistungskennzahlen sind allerdings sowohl für die Lieferanten in der Einzelbetrachtung als auch für das Gesamtsystem äußerst gering (vgl. Tabelle 6.9).

Kennzahl	Prio_fix =0	Prio_fix =5	Prio_fix =15	Prio_fix =25
Wiederbeschaffungszeit (WBZ) [Std.]	162,5	160,2	153,6	149,4
davon Wartezeit [Std.]	90,2	87,6	81,0	77,4
Bereitstellungsprozess ( $t_{pL}$ ) [Std.]	63,9	63,9	63,9	63,4
Transportprozess Vorlauf ( $t_{pLDV}$ ) [Std.]	33,7	32,9	29,6	27,6
Umschlagprozess ( $t_{pLDH}$ ) [Std.]	24,5	24,3	24,2	24,2
Transportprozess Nachlauf ( $t_{pLDN}$ ) [Std.]	40,4	39,0	35,8	34,1
Physischer Bestand [x100 ME]	76,43	76,93	77,13	76,56
$\beta$ -Servicegrad	0,99	0,99	0,99	0,99
Liefertermintreue für $l = 3$	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabelle 6.9: Einfluss eines fixen Priorisierungsmerkmals auf die untersuchten Zielgrößen

Als Mittel der Wahl scheint die fixe Auftragspriorisierung mit Blick auf die Ergebnisse ungeeignet zu sein. Das Gesamtsystem profitiert nicht nennenswert von dieser Maßnahme. Einzelne, als kritisch eingestufte Aufträge, können beschleunigt durch das System geführt werden, ohne eine nennenswerte Verschlechterung der Kennzahlen über alle Aufträge zu verursachen. Im Einzelfall könnten dadurch erhebliche Kostenvorteile erzielt werden (etwa, wenn die Durchführung eines besonders kritischen Produktionsloses durch rechtzeitige Materialbeschaffung gesichert werden kann).

## **6.4 Untersuchung einer kooperativen Planung und Steuerung in logistischen Netzwerken**

Die Aufgabe des Supply Chain Management ist bekanntlich die unternehmensübergreifende Planung und Steuerung von Geschäftsprozessen entlang einer Wertschöpfungskette. Die konkreten Ziele ergeben sich aus der Definition von Kennzahlen sowie deren Zielkorridoren und lassen sich über die Effizienz als das Verhältnis aus Leistung und Kosten auffassen. Der Ansatz des Supply Chain Management sieht durch die ganzheitliche Sicht auf logistische Netzwerke bereits eine Kooperation der Akteure vor. Dennoch ist in der Praxis eine Aneinanderreihung monolithischer Planungs- und Steuerungssysteme der Regelfall. Ein Austausch findet meist nur an einzelnen Schnittstellen statt (vgl. Kapitel 3). Im Folgenden wird ein Verfahren einer kooperativen Planung und Steuerung über mehrere Akteure und logistische Planungsdisziplinen hinweg untersucht und die Wirksamkeit bewertet. Ausgangspunkt der folgenden Experimente ist das bereits bekannte Szenario eines logistischen Netzwerks. Die Verfahrenskonfiguration basiert auf dem im vierten Kapitel vorgestellten Konzept einer kooperativen Planung und Steuerung mithilfe von Softwareagenten. Wie dort bereits erläutert wird, ist die Entwicklung einer universell einsetzbaren Lösung nicht zielführend. Vielmehr müssen die zur Verfügung stehenden technischen und organisatorischen Ressourcen mit dem Anwendungsfall in Einklang gebracht werden. Das Konzept dient somit als Leitfaden für die Entwicklung und Umsetzung.

### **6.4.1 Beschreibung des Verfahrensablaufs und der Systemkonfiguration**

Der Ablauf der Planung und Steuerung entspricht in den Grundzügen einer sequentiellen Ablaufsteuerung. Der erfolgreiche Abschluss eines Prozessabschnitts dient als Auslöseereignis für den darauffolgenden Schritt, was zu vergleichsweise geringem Kommunikationsaufwand und Abhängigkeiten führt. Es wird ein Anwendungsfall untersucht, in dem organisatorisch und rechtlich

unabhängige Akteure weiterhin die Entscheidungshoheit behalten und eine Kooperation durch Softwareagenten umsetzen. Im Gegensatz dazu ließen sich simultane Planungsabläufe durch die vollständige Überführung der Planungs- und Steuerungsaufgaben in eine zentrale Instanz (etwa ein gemeinsames Logistikportal) oder eine permanente und echtzeitnahe Kommunikation zwischen allen Agenten über das gesamte logistische Netzwerk realisieren.

Die Koordinationsaufgaben im System übernimmt die Agentenklasse „Bestellung“. Diese wird bei der Bestellauslösung erzeugt und sammelt fortlaufend die relevanten Informationen im Gesamtsystem durch Kommunikation mit den übrigen Agenten. Auf der Grundlage dieser Informationen wird eine fortlaufende Kalkulation der erwarteten Restdurchlaufzeit (ETE) realisiert. Es wird dazu auf Aktualdaten sowie auf dokumentierte Zeitverteilungen (aus der Vergangenheit) der noch zu durchlaufenden Prozessabschnitte zurückgegriffen. Im Gegensatz zu fixen Stammdaten, kann so über die Zeit eine automatisierte Annäherung an realistische Prognosewerte erfolgen. Auf Grundlage der ETE erfolgt die Bewertung der Dringlichkeit eines Auftrags. Dabei wird nicht auf die Planlieferzeit als starre Zielmarke zurückgegriffen, sondern es erfolgt die dynamische Ermittlung eines Lieferzeitzielkorridors. Dazu wird von der Agentenklasse „Hersteller“ bei jedem Nachfrageereignis in Abhängigkeit vom aktuellen Lagerbestand für die offenen Bestellungen ein bevorzugter Liefertermin in Kombination mit Toleranzgrenzen für die verspätete oder verfrühte Anlieferung ermittelt. Das Dringlichkeitsmerkmal einer Sendung wird den übrigen Agenten zur Durchführung der Planungs- und Steuerungsaufgaben bereitgestellt. Durch die Entscheidung über Zuordnung und Reihenfolge wird der Auftrag bei der Prozessdurchführung be- oder entschleunigt. Die Bewertung der Dringlichkeit erfolgt ereignisbasiert, bei jedem Wechsel eines Prozessabschnitts, und periodisch (etwa beim Verharren in einem Zwischenlager). Die Abbildung 6.13 verdeutlicht an einem Beispiel das Zusammenspiel der einzelnen Softwareagenten bei der Ermittlung der Dringlichkeit eines Auftrags.

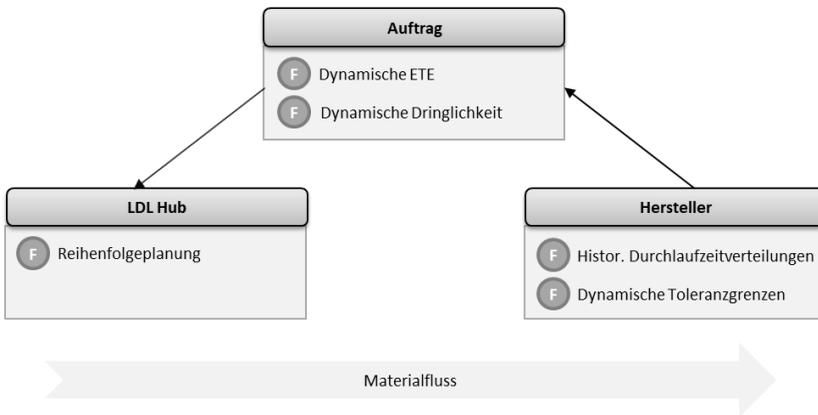


Abbildung 6.13: Zusammenspiel der Softwareagenten bei der Berücksichtigung der Dringlichkeit am Beispiel der Reihenfolgeplanung im Hub

Der untersuchten Systemkonfiguration liegt die Annahme über die Wiederbeschaffungszeit von  $l = 4$  zugrunde, was bei der Auslegung des Bestellpunkts berücksichtigt wird. Die tolerierten Abweichungen  $Tol, O$  und  $Tol, U$  betragen im Grundzustand jeweils 24 Stunden. Die oberen und unteren Toleranzmaße werden durch den Agenten „Hersteller“ dynamisch bei jedem Nachfrageereignis bestimmt und an die Agenten „Auftrag“ der jeweiligen Materialnummer übermittelt. Die Einteilung erfolgt in Abhängigkeit vom Nettobestand in vier unterschiedliche Toleranzklassen. Die Abbildung 6.14 zeigt sowohl die Entscheidungsregeln als auch die resultierenden Toleranzen. Die Bestimmung kann, angepasst an den jeweiligen Anwendungsfall, neben der Bestandssituation auch auf der Grundlage von bekannten Produktionsplänen oder manuellen Anwendereingaben erfolgen.

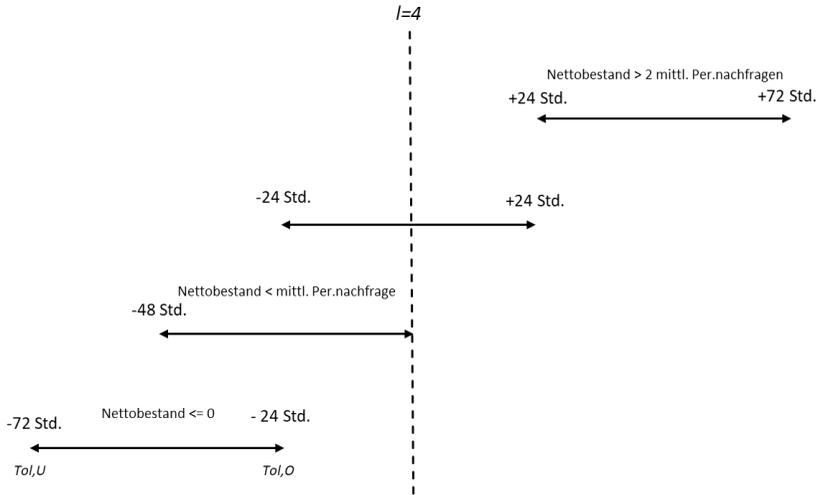


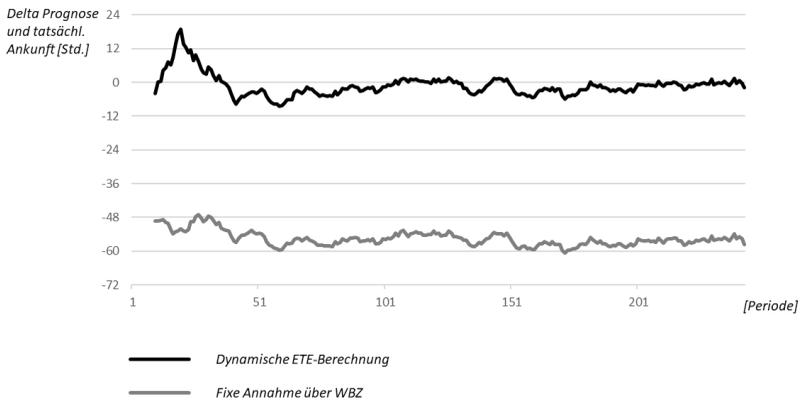
Abbildung 6.14: Entscheidungsregeln und Toleranzmaße im untersuchten Szenario

Zur Beschleunigung priorisierter Aufträge wird bei den Lieferanten eine bevorzugte Abarbeitung mit einer oberen Grenze der Dreiecksverteilung von 24 Stunden (anstatt 144 Stunden) gewählt. Darüber hinaus erfolgt vor der Abarbeitung eine Sortierung der Aufträge nach der Prioritätsklasse bei den Lieferanten sowie den Logistikdienstleistern. Zur Entschleunigung der als weniger dringlich markierten Aufträge werden diese bei den Lieferanten und Hub-Logistikdienstleistern in 24 Stunden-Intervallen zwischengelagert, bis die Dringlichkeit wieder mindestens ein neutrales Niveau erreicht. Im Übrigen gelten die Annahmen aus dem zweiten Grundscenario zu Bestelllosgröße sowie den Durchlaufzeiten bei den Lieferanten und Logistikdienstleistern. Im Vergleichszenario erfolgt die Abarbeitung der Aufträge nach dem FIFO-Prinzip, ohne die Möglichkeit einer Be- oder Entschleunigung.

## 6.4.2 Untersuchung der Verfahrenswirksamkeit

Bei der Betrachtung der Simulationsergebnisse zeigt sich, dass das implementierte Verfahren zur kooperativen Planung und Steuerung im operativen Zeithorizont grundsätzlich funktionsfähig ist. Die Ermittlung von Durchlaufzeitverteilungen, die Bestimmung von Toleranzgrenzen, die Ermittlung von Durchlaufzeitprognosen, die Ermittlung von Dringlichkeitsmerkmalen sowie die Berücksichtigung eben dieser bei den Planungs- und Steuerungsentscheidungen der verschiedenen Akteure zeigen im Zusammenspiel eine plausible Wirkung.

Die Abbildung 6.15 zeigt, wie gut die Annahme einer fixen Wiederbeschaffungszeit im Vergleich zur dynamisch berechneten ETE-Prognose den späteren Ankunftszeitpunkt vorhersehen kann. Während eine fixe Annahme bei diesem Szenario eines zu optimistisch geplanten Netzwerks regelmäßig unterschätzt, nähert sich die dynamisch berechnete Prognose durch die Nutzung historischer Daten der tatsächlichen Ankunft an. Da das Verfahren eine Lernphase durchläuft, können Verbesserungen der Prognosegenauigkeit über die Zeit beobachtet werden. Während diese vergleichsweise genauen Prognosewerte für die dynamische Dringlichkeitsbestimmung herangezogen werden, kann die statische Annahme über die Wiederbeschaffungszeit weiterhin für etablierte betriebliche Kennzahlen wie die Liefertreue genutzt werden. Das Delta beider Werte zeigt Handlungsbedarf im taktischen Planungshorizont auf und kann somit für einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess genutzt werden (etwa im Bestandsmanagement).

Abbildung 6.15: Abweichung zwischen Ankunftsprognose und -zeit ( $w=10$ )

In der Abbildung 6.16 ist die Verteilung der Dringlichkeitsbewertung für die untersuchten Prozessabschnitte zu sehen. In allen Teilabschnitten des logistischen Netzwerks kommt es sowohl zu einer Hoch- als auch zu einer Herabstufung von Aufträgen. Während in den frühen Phasen der Auftragsabwicklung das Gros der Bestellungen noch eine neutrale Dringlichkeit aufweist, werden mit zunehmendem Prozessfortschritt mehr Aufträge hochgestuft. Die Betrachtung der Priorisierungsquoten gibt ebenfalls wichtige Hinweise zur Anpassung des Systems auf der taktischen Ebene. Durch eine zu optimistische Annahme der Wiederbeschaffungszeit in Verbindung mit engen Toleranzgrenzen kommt es zu einer starken Ausprägung von hohen Priorisierungsmerkmalen. Der Agent „Auftrag“ versucht dadurch die vom Agenten „Hersteller“ gesetzten Ziele im Zusammenspiel mit den übrigen Agenten zu erreichen. Sofern eine Priorisierung nicht auf Kosten von zurückgestuften Aufträgen erfolgen kann, ist kein positiver Effekt zu erwarten. Ebenso kann eine Beschleunigung nur innerhalb der Grenzen erfolgen, die die Struktur und Ressourcen des logistischen Netzwerks hergeben. Reicht dies regelmäßig nicht aus, muss eine Anpassung auf der taktischen oder gar strategischen Ebene erfolgen.

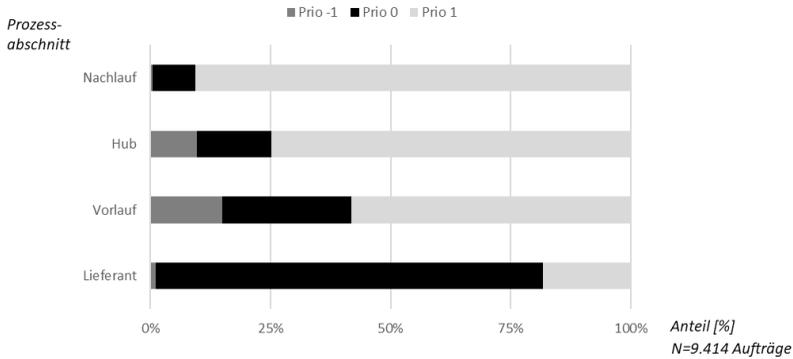


Abbildung 6.16: Verteilung der gesetzten Priorisierungsmerkmale

Ein Blick auf die aggregierten Kennzahlen des logistischen Netzwerks in Tabelle 6.10 zeigt die Unterschiede zwischen dem kooperativen Verfahren und der Ablaufsteuerung nach dem FIFO-Prinzip. Die Wiederbeschaffungszeit verkürzt sich im Mittel, da die Prozesse beim Lieferanten und bei den Logistikdienstleistern für priorisierte Aufträge schneller durchlaufen werden können, ohne nennenswerte Verzögerungen für die übrigen Aufträge zu erzeugen. Im Hub kommt es durch die Zwischenlagerung der herabgestuften Aufträge zu einer Verlängerung der durchschnittlichen Durchlaufzeit. Der Servicegrad wird durch die kooperative Planung und Steuerung auf hohem Niveau bei gleichzeitiger Bestandserhöhung verbessert. Die Liefertermintreue, gemessen gegen die fixe Annahme über die Wiederbeschaffungszeit, verbessert sich ebenfalls.

Kennzahl	Koop.	FIFO
Wiederbeschaffungszeit (WBZ) [Std.]	151,4	162,1
davon Wartezeit [Std.]	85,4	89,9
Bereitstellungsprozess ( $t_{pL}$ ) [Std.]	57,3	63,6
Transportprozess Vorlauf ( $t_{pLDV}$ ) [Std.]	28,6	33,8
Umschlagprozess ( $t_{pLDH}$ ) [Std.]	27,0	24,3
Transportprozess Nachlauf ( $t_{pLDN}$ ) [Std.]	38,4	40,4
Physischer Bestand [x100 ME]	77,57	76,13
$\beta$ -Servicegrad	0,99	0,99
Liefertermintreue für $l = 4$	0,03	0,01

Tabelle 6.10: Einfluss der kooperativen Planung und Steuerung auf die untersuchten Zielgrößen im Vergleich zur Ablaufsteuerung mittels FIFO

Beim Blick auf die Kennzahlen des Transports zeigen sich ebenfalls Verbesserungen im Vergleich zu FIFO. Die Sendungen werden stärker gebündelt, so dass mehr Touren ungenutzt bleiben können und die Auslastung der gefahrenen Touren steigt. Die zurückgelegte Strecke sowie die benötigte Zeit je Fahrt erhöhen sich dadurch natürlich ebenfalls. Die Tabelle 6.11 zeigt die Werte für beide Fälle.

Prozess	Kennzahl	Koop.	FIFO
Vorlauf	Grad ungenutzter Touren	0,04	0,01
	Mittl. Strecke [km]	93,0	90,9
	Mittl. Dauer [Std.]	3,68	3,61
	Mittl. Anzahl Aufträge	2,03	1,99
	Mittl. Anzahl ME	431,4	422,4
Nachlauf	Grad ungenutzter Touren	0,01	0,00
	Mittl. Strecke [km]	191,0	191,0
	Mittl. Dauer [Std.]	4,88	4,89
	Mittl. Anzahl Aufträge	1,97	1,97
	Mittl. Anzahl ME	419,4	417,8
Gesamt	Gesamtstrecke [km]/ Gesamtanzahl ME	1,5	1,5

Tabelle 6.11: Einfluss der kooperativen Planung und Steuerung auf die Tourkennzahlen im Vergleich zur Ablaufsteuerung mittels FIFO

Wie in den vorherigen Experimenten bereits dargelegt wurde, ist der Einfluss auf die aggregierten Kennzahlen des Gesamtsystems durch Maßnahmen im operativen Zeithorizont vergleichsweise gering. Es lohnt sich daher ein vertiefender Blick auf die Gesamtkosten, die sich aus den Kostensätzen des Akteur-übergreifenden Gesamtkostenmodells ergeben. Es zeigt sich eine Kosteneinsparung im Transport, bedingt durch die bessere Ressourcennutzung. Die Kosten für entstandene Fehlmengen sinken, müssen allerdings gegen die höheren Bestandskosten sowie die Kosten für die priorisierte Behandlung von Aufträgen abgewogen werden. Die Tabelle 6.12 zeigt die Berechnung am Beispiel der Annahme über den Fehlmengenkostensatz von 100% des Werts einer Mengeneinheit sowie eines Priorisierungskostensatz von 5% der allgemeinen Dispositionskosten. Die übrigen Kostensätze werden in Kapitel 6.1 dieser Arbeit eingeführt und erläutert. Die Berechnung erfolgt für beide Verfahrensansätze als Gesamtsumme über ein Betriebsjahr sowie heruntergebrochen auf einen einzelnen Auftrag.

Kostenkategorie	Kostenposition	Koop.		FIFO	
		Betriebs- jahr [kEUR]	Auftrag [EUR]	Betriebs- jahr [kEUR]	Auftrag [EUR]
Transport Vorlauf	Fixkosten Touren	926,8	98,45	948,0	100,70
	Fixkosten ungen. Touren	5,0	0,53	1,8	0,19
	Wegabh. Kosten	474,1	50,36	474,1	50,36
	Zeitabh. Kosten	511,6	54,34	513,3	54,53
Transport Nachlauf	Fixkosten Touren	954,0	101,34	958,0	101,76
	Fixkosten ungen. Touren	0,9	0,10	0,3	0,03
	Wegabh. Kosten	1.002,3	106,47	1.006,5	106,92
	Zeitabh. Kosten	698,3	74,18	702,7	74,64
Lagerhaltung	Bestandskosten	193,9	20,60	190,3	20,22
	Fehlmengenkosten	874,1	92,85	909,2	96,58
	Lagerkosten Hersteller	23,3	2,47	22,8	2,43
	Lagerkosten Lieferant	59,7	6,34	66,3	7,04
	Lagerkosten Hub	28,2	2,99	25,3	2,69
Disposition	Allgemeine Dispokosten	141,2	15,00	141,2	15,00
	Priokosten Lieferant	1,2	0,13	0,00	0,00
	Priokosten Vorlauf	3,0	0,32	0,00	0,00
	Priokosten Hub	4,6	0,49	0,00	0,00
	Priokosten Nachlauf	6,4	0,68	0,00	0,00
	<b>Gesamt</b>	<b>5.908,6</b>	<b>627,63</b>	<b>5.960,0</b>	<b>633,09</b>

Tabelle 6.12: Berechnung der Gesamtkosten für einen Fehlmengenkostensatz von 100% und einen Priorisierungskostensatz von 5%

Die Abbildung 6.17 zeigt das jährliche Einsparpotential der kooperativen Planung und Steuerung im Vergleich zu FIFO für das untersuchte Szenario. Für niedrige Fehlmengenkostensätze in Kombination mit hohen Priorisierungskosten ergeben sich höhere Kosten durch die Anwendung des kooperativen Verfahrens. Sofern allerdings Fehlmengenergebnisse kostenintensive Folgen haben, sind Eingriffe auf der operativen Ebene lohnend. In der Praxis liegt die Schwierigkeit sicherlich in der Bestimmung eines solchen Fehlmengenkostensatzes, da die Folgen häufig nicht trennscharf erfasst werden und in nicht oder nur schwierig mess- und zuordenbaren Kosten aufgehen (Unruhekosten). Zweifelsohne haben aber jede Störung und jeder operative Klimmzug einen Preis.

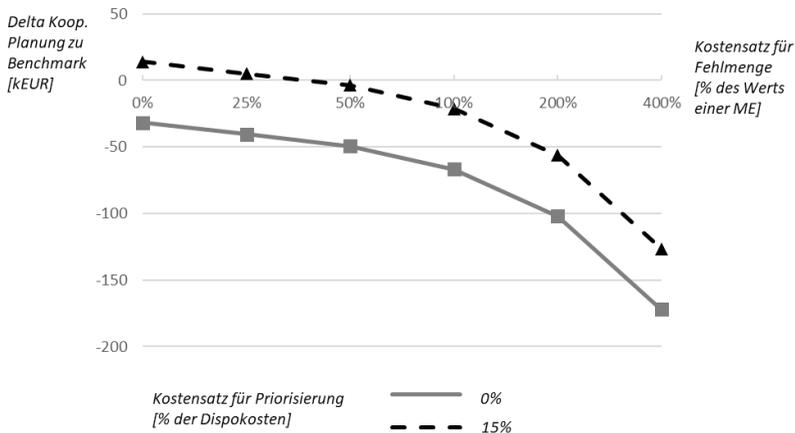


Abbildung 6.17: Gesamtkosten der untersuchten Verfahren im Vergleich für unterschiedliche Kostensatzannahmen über ein Betriebsjahr

## 6.5 Zusammenfassende Bewertung

Gegenstand des Kapitels war zunächst die Untersuchung, welchen Einfluss typische Störungen der physischen logistischen Abläufe auf die aggregierten Kenngrößen eines logistischen Netzwerks haben. Dazu wurden Ablaufkomplika­tionen in allen Teilprozessen modelliert und mit Blick auf die Auswirkungen auf das Gesamtsystem analysiert. Im Anschluss wurde die Wirksamkeit von Einzelmaßnahmen des Maßnahmenkatalogs (vgl. Kapitel 4) auf der taktischen und der operativen Handlungsebene untersucht. Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse erfolgte schließlich die Evaluierung einer kooperativen Planung und Steuerung eines logistischen Netzwerks, wie sie im vierten Kapitel konzeptionell vorgestellt wurde. Um die Durchführbarkeit der Experimente zu ermöglichen, wurden geeignete Testinstanzen generiert. Die Absicherung der Aussagekraft erfolgte im Zuge einer statistischen Experimentplanung.

Bei der Untersuchung der Störgrößen hat sich gezeigt, dass Prozessabweichungen im untersuchten Ausmaß die Zielgrößen des Gesamtsystems in einer aggregierten Sicht nur verhältnismäßig gering negativ beeinflussen. Die vorhandenen Puffer eines robust geplanten Logistiknetzwerks können Verzögerungen vom Umfang weniger Stunden in der Regel abfangen. Der Anteil der einzelnen Teilprozesse an der Gesamtdurchlaufzeit der Aufträge variiert hingegen ebenso wie deren Wartezeitanteil. Beide Größen sind für die Identifikation von schlecht synchronisierten Prozessfolgen gut geeignet. Schwankungen der Nachfrage haben im untersuchten Rahmen geringen Einfluss auf den bereits hohen  $\beta$ -Servicegrad und die aggregierten Kennzahlen der Lieferanten und der Logistikdienstleister. Es lässt sich allerdings durch eine Verstärkung der Nachfrage eine deutliche Senkung des Bestandsniveaus zeigen.

Die Auslegung der Parameter einer Lagerhaltungspolitik hat erheblichen Einfluss auf das logistische Netzwerk. Kleine Bestelllosgrößen senken zwar die Bestände, führen allerdings in den Experimenten im Transport zu einer Steigerung der zurückgelegten Gesamtstrecke je Mengeneinheit. Von der größten bis zur kleinsten Einstellung steigt diese um den Faktor 4, was zu einer

steigenden Beanspruchung der Transportmittel sowie längeren Durchlaufzeiten der Aufträge führt. Bei der Auslegung der Bestellparameter kann somit nicht von der in der Praxis weithin verbreiteten Annahme der Unabhängigkeit von Bestellmenge und Wiederbeschaffungszeit ausgegangen werden. Vielmehr müssen die Wechselwirkungen mit dem Transportsystem bei der Abschätzung der Wiederbeschaffungszeit explizit berücksichtigt werden. Kim und Benton (1995) sowie Hariga (2000) verwerfen ebenfalls die Unabhängigkeitsannahme, allerdings mit Bezug zu einer vorgelagerten Produktionsstufe und weniger mit Blick auf den Transport. Die Beobachtungen decken sich ebenfalls mit den Untersuchungsergebnissen von Zillus (2003).

Die Experimente zur kooperativen Planung und Steuerung im operativen Zeithorizont mittels Softwareagenten zeigen für das untersuchte Szenario eine Reduzierung der Fehlmengen sowie eine bessere Nutzung der Ressourcen im Transport. Die Mechanismen zur Priorisierung von Aufträgen zeigen Wirkung, so dass es in der Folge zur Be- und Entschleunigung kommt. Im Gegenzug zu den Einsparungen kommt es zu einer leichten Erhöhung des Bestandsniveaus. Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit hängt letztlich von den realen Kostensätzen ab. Im Rahmen der Arbeit wurde ein Kostenmodell zur prozessübergreifenden Betrachtung aufgestellt und mit den Ergebnissen der Simulation sowie Kostenannahmen aus der Literatur berechnet. Das Wissen über die Verteilung der Kosten kann für die Ermittlung von Ausgleichszahlungen zwischen den einzelnen Akteuren genutzt werden.

Ein kooperatives Planungs- und Steuerungsverfahren auf der Basis von automatisiert arbeitenden Softwareagenten wird für den skizzierten Anwendungsfall als grundsätzlich umsetzbar eingeschätzt. Logistische Netzwerke zeichnen sich allerdings durch stark verteilte und inhomogene Prozess- und Systemstrukturen aus. Modelle zur Bewertung von Systemzuständen und Ablaufvarianten können nur so gut funktionieren, wie die Datenlage es zulässt. Je komplexer ein Anwendungsfall wird, desto stärker ist die Gefahr einer zu stark idealisierten Sicht auf die Realität oder einer unangemessen umfangreichen Modellierung einzelner Systemaspekte. Der kritischen Beurteilung der

„real world awareness“ ist daher ein hoher Stellenwert beizumessen. Der Mensch wird auch zukünftig bei unvorhersehbaren Ereignissen und Störungen größeren Ausmaßes unersetzlich bleiben und die in Betrieb befindlichen Systeme zur automatisierten Planung und Steuerung müssen in ihrer Funktion überwacht werden. Es besteht jedoch die Chance, sowohl die Qualität als auch die Effizienz menschlicher Entscheidungen zu steigern. Gerade in Hinblick auf die Planung und Weiterentwicklung des logistischen Systems auf der strategischen und taktischen Ebene liefert das operative Verfahren durch die permanente Erhebung und Strukturierung von Daten wichtige Erkenntnisse.



## 7 Fazit und Ausblick

Gegenstand dieser Arbeit ist die Untersuchung und Weiterentwicklung von Konzepten und Verfahren zur Planung und Steuerung logistischer Netzwerke im taktischen und operativen Zeithorizont. Da nicht nur einzelne Unternehmen, sondern vielmehr ganze Supply Chains im Wettbewerb stehen, kommt der Lösung logistischer Entscheidungsprobleme über mehrere Abschnitte einer Prozesskette hinweg eine hohe Bedeutung zu. Es wurde der Frage nachgegangen, wie eine Kooperation der beteiligten Akteure basierend auf Softwareagenten realisiert werden kann. Die Evaluierung der entwickelten Modelle erfolgte mithilfe von Simulation. Da zu den Auswirkungen von Ablaufkomplikationen bei der Ausführung physischer Logistikprozesse sowie von Eingriffsmaßnahmen auf der taktischen und operativen Ebene nur vereinzelte Arbeiten zu Teilaspekten vorhanden sind, erfolgte eine tiefgehende Analyse im Rahmen der Simulationsstudie.

Im zweiten Kapitel der Arbeit wird ein Literaturüberblick über die Ursachen und Folgen von Volatilität in logistischen Netzwerken geliefert. Dazu wird der Aufbau solcher Systeme in den Teilaspekten der Prozessstruktur, der Netzwerkstruktur und der Bedeutung von Informationen erörtert. Es konnten daraus Anforderungen für die Weiterentwicklung und den Einsatz von Planungs- und Steuerungssystemen in logistischen Netzwerken abgeleitet werden. Die Auswertung der Forschung zu lang- und kurzfristigen Störeinflüssen in Supply Chains zeigt den Bedarf an quantitativen Untersuchungen zu den Wirkzusammenhängen in der Ausführungsphase logistischer Prozesse.

Das dritte Kapitel behandelt die methodischen Ansätze, die bei einer Akteurübergreifenden Planung und Steuerung in logistischen Netzwerken von Relevanz sind. So müssen Modelle des Bestandsmanagement, einer Transportplanung sowie einer allgemeinen Reihenfolgeplanung gelöst und in Einklang gebracht werden. Ansätze des Supply Chain Management geben den Rahmen

für den proaktiven und reaktiven Umgang mit Risiken und Störungen vor. Die Auswertung des Forschungsstands zu kooperativen Ansätzen zeigt die grundsätzliche Eignung von agentenbasierten Systemen und webbasierten Kollaborationsplattformen auf. Es fehlt allerdings nach wie vor an Lösungen, die eine einfache und dennoch zuverlässige Ablaufentscheidung über mehrere logistische Teildisziplinen hinweg ermöglichen. Ebenso mangelt es derzeit noch an einer Verknüpfung des operativen mit dem taktisch-strategischen Planungshorizont. Einen Beitrag zum Schluss dieser Lücke liefert das in Kapitel 4 vorgestellte Konzept zur Entwicklung eines kooperativen Planungs- und Steuerungsverfahrens. Mithilfe von Softwareagenten lassen sich die Planungsaufgaben der beteiligten Akteure abbilden und in Einklang bringen. Modelle zur Prozesszeit- und Prozesskostenbewertung sowie Hinweise zu Ablaufsteuerung und Systemarchitektur ermöglichen die Entwicklung eines anwendungsspezifischen Verfahrens.

Um die Untersuchung von stochastischen Einflüssen, der Wirksamkeit von Maßnahmen auf der taktischen und operativen Ebene sowie die Evaluierung von Verfahren zur kooperativen Planung und Steuerung zu ermöglichen, wurde im Rahmen der Arbeit ein geeignetes Simulationsmodell entwickelt. Im fünften Kapitel dieser Arbeit erfolgt die Vorstellung des Modells. Die Gestaltung von Modellarchitektur, Modellgrößen und Prozessabläufen erfolgte möglichst modular und lässt somit eine Adaption auf weitere Fragestellungen und Anwendungsszenarien zu. Die Werkzeuge für das Pre- und Post-Processing, die Datenhaltung und das Lösen von Optimierungsproblemen können bedarfsgerecht ausgewählt und über gängige Schnittstellen an die Simulationsumgebung angebunden werden.

Im sechsten Kapitel wurden typische Ablaufstörungen der physischen Logistikprozesse und deren Einfluss auf die aggregierten Kennzahlen eines logistischen Netzwerks untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass der Einfluss von Einzelstörungen bei einem System mit korrekt dimensionierten Puffern vergleichsweise gering ist. Störungen in größerem Umfang bedürfen Anpassungen auf der taktischen Ebene. Dabei hat vor allem die Auslegung der

Parameter einer Bestellpolitik erheblichen Einfluss auf das System. In den Experimenten konnten zwischen der Bestellmenge und der Wiederbeschaffungszeit Wechselwirkungen durch die Struktur des logistischen Netzwerks beobachtet werden. Diese sollten vor der Parameterbestimmung Anwendungsfall-spezifisch mittels Simulation untersucht und berücksichtigt werden. Es wurde im sechsten Kapitel ein Verfahren zur kooperativen Planung und Steuerung entwickelt und im Vergleich zu einer Ablaufsteuerung mittels FIFO evaluiert. Das Verfahren zeigte eine wirksame Priorisierung von Aufträgen. Die Grundlage bildet eine Dringlichkeitsbewertung, basierend auf dynamischen Toleranzwerten zum Liefertermin sowie die regelmäßige Prognose von Restdurchlaufzeiten. Durch den Einsatz des Verfahrens konnte für das untersuchte Szenario eine Reduzierung der Fehlmengen sowie eine Steigerung der Effizienz im Transport erzielt werden. Dem gegenüber steht eine Erhöhung des Bestandsniveaus. Die Durchführung einer Wirtschaftlichkeitsbewertung wurde mit den Modelldaten aufgezeigt.

Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf liegt in der Übertragung des vorgestellten Ansatzes auf weitere logistische Disziplinen. So könnte ein agentenbasiertes Verfahren auch in der innerbetrieblichen Logistik eine automatisierte Ermittlung der Auftragsdringlichkeit ermöglichen und Hinweise auf die taktische Anpassung des Systems geben. Darüber hinaus besteht die Herausforderung darin, die ermittelten Dringlichkeitsmerkmale in den Optimierungsproblemen der verschiedenen Teildisziplinen bestmöglich zu integrieren. Da, wie bereits erläutert, für die Planung und Steuerung von logistischen Netzwerken keine universellen Lösungen bereitgestellt werden können, empfiehlt sich die Anwendungsfall-spezifische Funktionserprobung und Kalibrierung der Verfahren mittels Simulation. Dabei kann die Forschung durch weitere Untersuchungen an Referenzszenarien eine Vorarbeit leisten.



# Literaturverzeichnis

- AEB und DHBW (2014): Global Trade Management Agenda 2014. Zukünftige Herausforderungen, Risiken und Lösungsansätze im globalen Supply Chain Management. Studie der AEB und DHBW. Duale Hochschule Baden-Württemberg. Stuttgart.
- Alicke, K. (2005): Planung und Betrieb von Logistiknetzwerken. Unternehmensübergreifendes Supply Chain Management. 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Andler, K. (1929): Rationalisierung der Fabrikation und optimale Losgröße. Dissertation. Techn. Hochschule Stuttgart.
- AnyLogic Company (2018): Simulationssoftware für alle geschäftlichen Herausforderungen. <http://www.anylogic.de/features>. [abgerufen am 01.10.2018]
- APICS (2018): SCOR SUPPLY CHAIN OPERATIONS REFERENCE MODEL. <http://www.apics.org/sites/apics-supply-chain-council>. [abgerufen am 01.10.2018]
- Arndt, H. (2015): Logistikmanagement. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Arnold, D.; Furmans, K. (2009): Materialfluss in Logistiksystemen. 6. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Axsäter, S. (2015): Inventory Control. 3. Auflage. Basel: Springer International Publishing.

- Baghalian, A.; Rezapour, S.; Zanjirani Farahani, R. (2013): Robust supply chain network design with service level against disruptions and demand uncertainties: A real-life case. *European Journal of Operational Research* 227(1). S. 199-215.
- Bauer, M.; Kunert, C.; Mertin, M.; Paepcke, U.; Schygulla, M.; Meyer, A.; Baechle, F.; Joering, V.; Helvy, P.; Karch, T.; Stadler, A. (2017): Production plan based recovery of vehicle routing plans within integrated transportnetworks. Forschungsinitiative des BMWi "ProveIT". Gemeinsamer Abschlussbericht. Projektlaufzeit: 01.11.2013 - 31.10.2016. Karlsruher Institut für Technologie.
- Bauernhansl, T. (2014): Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: Bauernhansl, T.; ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B.: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Baumgarten, H. (2004): Entwicklungsphasen des Supply Chain Management. In: Baumgarten, H.; Darkow, I.-L.; Zadek, H.: *Supply Chain Steuerung und Services. Logistik-Dienstleister managen globale Netzwerke - Best Practices*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Becker, J.; Kadar, B.; Colledani, M.; Stricker, N.; Urgo, M.; Unglert, J.; Gyulai, D.; Moser, E. (2016): The RobustPlaNet Project. Towards Shock-Robust Design Of Plants And Their Supply Chain Networks. *IFAC-PapersOnLine* 49(12), S. 29-34.
- Beckmann, H. (2004): *Supply Chain Management: Grundlagen, Konzept und Strategien*. In: Beckmann, H.: *Supply Chain Management. Strategien und Entwicklungstendenzen in Spitzenunternehmen*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

- Benders, J.; Bijsterveld van M. (2000): Leaning on Lean. The Reception of a Management Fashion in Germany. *New Technology, Work and Employment* 15(1), S. 50–64.
- Berg, E., Knudsen, D.; Norrman, A. (2008): Assessing performance of supply chain risk management programmes. A tentative approach. *International Journal of Risk Assessment and Management* 9(3). S. 288 - 310.
- Blackhurst, J.; Craighead, C.W.; Elkins, D.; Handfield, R.B. (2005): An empirically derived agenda of critical research issues for managing supply-chain disruptions. *International Journal of Production Research* 43(19). S. 4067-4081.
- Bolstorff, P.A.; Rosenbaum, R.G.; Poluha, R. (2007): Spitzenleistungen im Supply Chain Management. Ein Praxishandbuch zur Optimierung mit SCOR. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Borshchev, A. (2013): *The Big Book of Simulation Modeling. Multimethod Modeling with AnyLogic 6*. Oakbrook Terrace: AnyLogic North America.
- Braun, D. (2012): *Von welchen Supply-Chain-Management-Maßnahmen profitieren Automobilzulieferer?. Eine wertorientierte Analyse an der Schnittstelle zwischen Zulieferer und Automobilhersteller*. Dissertation. Philipps-Universität Marburg.
- Brenner, J. (2015): *Lean Production. Praktische Umsetzung zur Erhöhung der Wertschöpfung*. München: Carl Hanser Verlag.
- Bretzke, W.R. (2015): *Logistische Netzwerke*. 3. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

- Brunner, F. J. (2017). Japanische Erfolgskonzepte: Kaizen, KVP, Lean Production Management, Total Productive Maintenance, Shopfloor Management, Toyota Production System, GD<sup>3</sup> Lean Development. 4. Auflage. München: Carl Hanser Verlag.
- Bruns, R.; Dunkel, J. (2015): Complex Event Processing. Komplexe Analyse von massiven Datenströmen mit CEP. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Bundesamt für Güterverkehr (2017): Marktbeobachtung Güterverkehr. Jahresbericht 2016. Köln.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (2011): Raumordnungsbericht 2011. Bonn.
- Cauvin, A.C.A.; Ferrarini, A.F.A.; Tranvouez, E.T.E. (2009): Disruption management in distributed enterprises. A multi-agent modelling and simulation of cooperative recovery behaviours. Int. Journal of Production Economics 122. S. 429-439.
- Chen, F.; Drezner, Z.; Ryan, J.K.; Simchi-Levi, D. (2000): Quantifying the Bullwhip Effect in a Simple Supply Chain. The Impact of Forecasting, Lead Times, and Information. Management Science 46(3), S. 436-443.
- Chen, P.-S.; Wu, T.-S. (2013): A modified failure mode and effects analysis method for supplier selection problems in the supply chain risk environment: A case study. Computers & Industrial Engineering 66(4). S. 634-642.
- Chopra, S.; Sodhi, M.S. (2004): Managing Risk to Avoid Supply-Chain Breakdown. MIT SMR 46(1), S. 53-62.
- Christopher, M. (2016): Logistics & Supply Chain Management. 5. Auflage. Harlow: Pearson Education Limited.

- Clarke, G.; Wright, J.W. (1964): Sheduling vehicles from a central delivery depot to a number of delivery points. ORQ 12, S. 568-581.
- Conforti, M.; Cornuejols, G.; Zambelli, G. (2014): Integer Programming. Basel: Springer International Publishing.
- Conway, R.W.; Maxwell, W.L.; Miller, L.W. (1967): Theory of Scheduling. Mineola: Dover Publications.
- Corsten, D.; Gabriel, C. (2002): Supply Chain Management erfolgreich umsetzen. Grundlagen, Realisierung und Fallstudien. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Dangelmaier, W. (2009): Theorie der Produktionsplanung und -steuerung. Im Sommer keine Kirschrainen? [sic]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Dantzig, G.B.; Fulkerson, R.; Johnson, S. (1954): Solution of a Large-Scale Traveling-Salesman Problem. Journal of the Operations Research Society of America 2(4), S. 393–410.
- Dantzig, G.B.; Ramser, J.H. (1959): The Truck Dispatching Problem. Management Science 6(1), S. 80-91.
- Dehdari, P. (2013): Measuring the Impact of Lean Techniques on Performance Indicators in Logistics Operations. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie.
- Dentgen, L.W. (2015): Entscheidungslogische Gestaltung selbststeuernder Logistiksysteme. Am Beispiel der Luftfracht. Dissertation. TU Hamburg-Harburg.
- Dror, M.; Trudeau, P. (1989): Savings by Split Delivery Routing. Transportation Science 23(2), S. 141.

- DIN IEC 60050-351: 2014-09: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch. Teil 351: Leittechnik. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN ISO 9000: 2015-11. Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN ISO 9001: 2015-11. Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- Domschke, W., Drexel, A., Klein, R., Scholl, A. (2015): Einführung in Operations Research. 9. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Domschke, W., Scholl, A., Voß S. (1997): Produktionsplanung. Ablauforganisatorische Aspekte. 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Domschke, W.; Scholl, A. (2010): Logistik. Rundreisen und Touren. 5. Auflage. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Dorschel, W.; Dorschel, J. (2015): Einführung. In: Dorschel, J. (Hrsg.): Praxishandbuch Big Data. Wirtschaft - Recht - Technik. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Dreßler, D.; Beißert, U. (2013): Entwicklung eines integrierten Ansatzes für das Störungsmanagement in komplexen Transportnetzen unter Berücksichtigung variabler Störungsdauern. In: Dangelmaier, W.; Laroque, C.; Klaas, A. (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik. Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung. ASIM-Mitteilung Nr. 147. Tagungsband 15. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik. Paderborn, 09.-11.10.2013. S.157-166.
- Elbert, R.; Özsucu, Ö.; Bogusch, C.; Thiel, D.; Reinhardt, D. (2014): Dynamo PLV – Dynamische und nahtlose Integration von Produktion, Logistik und Verkehr. Auszug aus dem Forschungsbericht des Fachgebiets Unternehmensführung und Logistik (15). TU Darmstadt.

- Fahrmeir, L., Heumann, C., Künstler, R., Pigeot, I., Tutz, G. (2016): Statistik. Der Weg zur Datenanalyse. 8. Auflage. Heidelberg: Springer Spektrum.
- Faust, P. (2009): Zweite Lean-Welle – die sieben Thesen. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 104(3), S. 157–163.
- Feess, E.; Gillenkirch, R. (2018): System. In: Springer Gabler Verlag: Gabler Wirtschaftslexikon. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/3210/system-v12.html>. [abgerufen am 01.10.2018]
- Fischäder, H. (2007): Störungsmanagement in netzwerkförmigen Produktionssystemen. Dissertation. TU Ilmenau.
- Fleischmann, B. (2009): Begriffliche Grundlagen. In: Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K. (Hrsg.). Handbuch Logistik. 3. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Fleischmann, B.; Meyr, H.; Wagner, M. (2015): Advanced Planning. In: Stadtler et al.: Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software and Case Studies. 5. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Fleischmann, B.; Koberstein, A. (2015): Strategic Network Design. In: Stadtler et al.: Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software and Case Studies. 5. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Forrester, J.W. (1958): Industrial Dynamics. A major breakthrough for decision makers. Harvard Business Review, S. 37-66.
- Forrester, J.W. (1961): Industrial Dynamics. Cambridge: MIT Press.
- Furmans, K.; Wlcek, H. (2012): Lean Management in Lägern. Arbeitskreisbericht. Hamburg: DVV Media Group.

- Gabler, M.; Schröder, S.; Friedrich, H.; Lidtke, G. (2013): Generierung der Nachfragestrukturen für die mikroskopische Simulation des städtischen Distributionsverkehrs im Lebensmittelhandel. In: Clausen., U.; Thaller, C. (Hrsg.). *Wirtschaftsverkehr 2013. Datenerfassung und verkehrsträgerübergreifende Modellierung des Güterverkehrs als Entscheidungsgrundlage für die Verkehrspolitik*. Fachtagung Wirtschaftsverkehr. Proceedings. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Gadanzo, C.F. (2003): *A Theory of Supply Chains*. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 526. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Gath, M. (2016): *Optimizing Transport Logistics Processes with Multiagent Planning and Control*. Dissertation. Universität Bremen.
- Gelau, T.; Hansen, O.; Herrmannsdörfer, M. (2014): Managing supply chain disruptions. A comparison of the automotive and food supply chain. 20th Conference of the International Federation of Operational Research Societies (IFORS), Barcelona 13.-18.07.2014. Paper HA-44.2.
- Gesetz zur Kontrolle und Transparenz im Unternehmensbereich (KonTraG). Vom 27. April 1998. Bundesgesetzblatt Jahrgang 1998 Teil I Nr. 24. Bonn.
- Gietz, M. (2009): Transport- und Tourenplanung. In: Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K. (Hrsg.). *Handbuch Logistik*. 3. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Gillett, B.; Miller, L. (1974): A heuristic algorithm for the vehicle dispatching problem. *ORQ* 22. S. 340-349.
- Golden, B.L.; Stewart, W.R. (1985): Empirical analysis of heuristics. In: Lawler, E.L.; Lenstra, J.K.; Rinnooy Kan, A.H.G.; Shmoys, D.B. (Hrsg.): *The Traveling Salesman Problem. A Guided Tour of Combinatorial Optimization*. Hoboken: Wiley John + Sons.

- Gomory, R.E. (1958): Outline of an algorithm for integer solutions to linear programs. *Bulletin of the American Mathematical Society* 64, S. 275-278.
- Götze, U.; Mikus, B. (2015): Der Prozess des Risikomanagements in Supply Chains. In: Siepermann, C.; Vahrenkamp, R.; Siepermann, M. (Hrsg.): *Risikomanagement in Supply Chains. Gefahren abwehren, Chancen nutzen, Erfolg generieren*. 2. Auflage. Berlin: Erich Schmidt Verlag.
- Graham, R.L.; Lawler, E.L.; Lenstra, J.K.; Rinnooy Kan, A.H.G. (1979): Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling. A survey. *Annals of Discrete Mathematics* 5, S. 287-326.
- Grünert, T.; Irnich, S. (2005a): *Optimierung im Transport. Band I: Grundlagen*. Herzogenrath: Shaker Verlag.
- Grünert, T.; Irnich, S. (2005b): *Optimierung im Transport. Band II: Wege und Touren*. Herzogenrath: Shaker Verlag.
- Gudehus, T. (2012a): *Logistik 1. Grundlagen, Verfahren und Strategien*. 4. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Gudehus, T. (2012b): *Logistik 2. Netzwerke, Systeme und Lieferketten*. 4. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Günthner et al. (2013a): *Schlanke Logistikprozesse. Handbuch für den Planer*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Günthner et al. (2013b): *Lean Logistics. Methodisches Vorgehen und praktische Anwendung in der Automobilindustrie*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Hake, G.; Grünreich, D.; Meng, L. (2002): *Kartographie. Visualisierung räumlicher Informationen*. 8. Auflage. Berlin: de Gruyter Verlag.

- Haraguchi, M.; Lall, U. (2014): Flood risks and impacts: A case study of Thailand's floods in 2011 and research questions for supply chain decision making. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 14(3). S. 256-272.
- Hariga, M. (2000): Setup cost reduction in (Q,r) policy with log size, setup time and lead-time interactions. *Journal of Operational Research Society* 51, S. 1340-1345.
- Hartung, J. (2009): Statistik. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik. 15. Auflage. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Harris, F.W. (1913): How Many Parts to Make at Once Factory. *The Magazine of Management* 10(2), S. 135-136.
- Heckmann, I.; Nickel, S. (2015): A Simulation-based Supply Chain Risk Analysis Framework. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Hrsg.): *Simulation in Production and Logistics 2015*. ASIM-Mitteilung Nr. 157. Tagungsband 16. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik. Dortmund, 23.-25.09.2015. S.177-186.
- Heckmann, I.; Comes, T.; Nickel, S. (2015): A critical review on supply chain risk. Definition, measure and modeling. *Omega* 52. S. 119-132.
- Heesen, B. (2014): *Wissenschaftliches Arbeiten. Methodenwissen für das Bachelor-, Master- und Promotionsstudium*. 3. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Hopp, W.J.; Spearman, M.L. (2001): *Factory physics. Foundations of manufacturing management*. 2. Auflage. New York City: McGraw Hill.
- International Organization for Standardization (ISO) (2018): *ISO 31000:2018. Risk management. Guidelines*.

- Johnson, J.R. (1954): Optimal two- and three-stage productions schedules with setup times included. *Naval Research Logistics Quarterly* 1, S. 61-68.
- Jung, H. (2016): Konzept einer agentenbasierten Transportsteuerung für komplexe, dynamische und multimodale Logistiknetzwerke. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie.
- Jüttner, U.; Peck, H.; Christopher, M. (2003): Supply Chain Risk Management. Outlining an Agenda for Future Research. *International Journal of Logistics: Research & Applications* 6(4). S. 197-210.
- Kagermann, H.; Anderl, R.; Gausemeier, J.; Schuh, G.; Wahlster, W. (2016): Industrie 4.0 in a Global Context. Strategies for Cooperating with International Partners. Acatech Study. Acatech Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. Berlin.
- Kern, C. (2007): Anwendung von RFID-Systemen. 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Kersten, W.; Seiter, M.; von See, B.; Hackius, N.; Maurer, T. (2017): Trends und Strategien in Logistik und Supply Chain Management. Chancen der digitalen Transformation. Bundesvereinigung Logistik (BVL). Bremen.
- Kim, J.; Benton, W. (1995): Lot size dependent lead times in a Q,R inventory system. *International Journal of Production Research* 33(1), S. 474-485.
- Klein, R.; Scholl, A. (2012): Planung und Entscheidung. Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse. 2. Auflage. München: Vahlen Verlag.
- Knemeyer, M.A.; Zinn, W.; Eroglu, C. (2009): Proactive planning for catastrophic events in supply chains. *Journal of Operations Management* 27(2), S. 141-153.

- Koch, S. (2012): Logistik. Eine Einführung in Ökonomie und Nachhaltigkeit. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Kuhn, A. (2008): Grundlagen des Prozesskettenmanagements. In: Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K. (Hrsg.). Handbuch Logistik. 3. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Land, A.H.; Doig, A.G. (1960): An Automatic Method of Solving Discrete Linear Programming Problems. *Econometrica* 28(3), S. 497-520.
- Laux, H.; Gillenkirch, R.M., Schenk-Mathes, H.Y. (2012): Entscheidungstheorie. 8. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Law, A.M. (2015): Simulation Modeling and Analysis. 5. Auflage. New York City: McGraw Hill.
- Lee, H.L.; Padmanabhan, V.; Whang, S. (1997): The Bullwhip Effect in Supply Chains. *Sloan Management Review* 38(3), S. 93-102.
- Lepratti, R.; Lamparter, S.; Schröder, R. (2014): Transparenz in globalen Lieferketten der Automobilindustrie. Ansätze zur Logistik- und Produktionsoptimierung. Erlangen: Publicis Publishing.
- Liebler, K; Beissert, U.; Motta, M.; Wagenitz, A. (2013): Introduction OTD-NET and LAS. Order-to-delivery network simulation and decision support systems in complex production and logistics networks. In: Pasupathy, R.; Kim, S.-H.; Tolk, A.; Hill, R.; Kuhl, M. E. (Hrsg.): Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference. Washington D.C. S. 439-451.
- Liker, J.K. (2011). Der Toyota-Weg: 14 Managementprinzipien des weltweit erfolgreichsten Automobilkonzerns. 7. Auflage. München: FinanzBuch Verlag.
- Lödding, H. (2016): Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. 3. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg.

- März, L.; Weigert, G. (2011): Simulationsgestützte Optimierung. In: März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G.: Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Mattfeld, D.; Vahrenkamp, R. (2014): Logistiknetzwerke. Modelle für Standortwahl und Tourenplanung. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Mentzer, J.T.; DeWitt, W.; Keebler, J.S.; Min, S.; Nix, N.W.; Smith, C.D. (2001): Defining Supply Chain Management. In: Lynch, C.F.: Logistics Outsourcing. A Management Guide. Boston: Springer.
- Meyr, H.; Stadtler, H. (2015): Types of Supply Chains. In: Stadtler et al.: Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software and Case Studies. 5. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Miroglio, D. (2014): Control towers for the pharmaceutical supply chains. How can the pharmaceutical supply chains increase transverse visibility and be more collaborative to enhance their resilience?. Broschüre Altran S.A.S. München.
- Morschett, D. (2005): Formen von Kooperationen, Allianzen und Netzwerken. In: Zentes, J.; Swoboda, B.; Morschett, D. (Hrsg.): Kooperationen, Allianzen und Netzwerke. Grundlagen-Ansätze-Perspektiven. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Muth, J.F.; Thompson, G.L. (1963): Industrial scheduling. Industrial series in management. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Norrman, A; Jansson, U. (2004): Ericsson's proactive supply chain risk management approach after a serious sub-supplier accident. International Journal of Physical Distribution and Logistics Management 34(5). S. 434-456.

- Nyhuis, P.; Wiendahl, H.P. (1999): Logistische Kennlinien. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Nyhuis, P. (2008): Entwicklungsschritte zu Theorien der Logistik. In: Nyhuis, P.: Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Oke, A.; Gopalakrishnan, M. (2009): Managing disruptions in supply chains: A case study of a retail supply chain. International Journal of Production Economics 118(1). S. 168-174.
- OpenStreetMap (2018): OpenStreetMap Deutschland – Die freie Wiki-Weltkarte. <https://www.openstreetmap.de/index.html>. [abgerufen am 01.10.2018]
- Pfohl, H.-C. (2016): Logistikmanagement. Konzeption und Funktionen. 3. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Porter, M. E. (2010): Wettbewerbsvorteile. Spitzenleistungen erreichen und behaupten. 7. Auflage. Frankfurt am Main: Campus Verlag.
- Pyke, D.; Tang, C. (2010): How to mitigate product safety risks proactively. Process, challenges and opportunities. International Journal of Logistics Research and Applications 13(4). S. 243-256.
- Rabe, M.; Clausen, U. (2015): Simulation in production and logistics 2015. ASIM-Mitteilung Nr. 157. Tagungsband 16. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik. Dortmund, 23.-25.09.2015. S. 1-730.
- Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S. (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Ramanathan, U.; Ramanathan, R. (2014): Supply Chain Strategies, Issues and Models. London: Springer Verlag.

- Reuter, B.; Rohde, J. (2015): Coordination and Integration. In: Stadler et al.: Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software and Case Studies. 5. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Robrade, A. (1991): Dynamische Einprodukt-Lagerhaltungsmodelle bei periodischer Bestandsüberwachung. Physica-Schriften zur Betriebswirtschaft 34. Heidelberg: Springer Physica.
- Rockwell Automation (2018): Arena Simulation Software. <https://www.arenasimulation.com/>. [abgerufen am 01.10.2018]
- Ropke, S.; Cordeau, J.F. (2009): Branch-and-Cut-and-Price for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows. Transportation Science 43 (3). S. 267-286.
- Rose, O.; März, L. (2011): Simulation. In: März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G.: Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Scheer, A.-W. (1991): Architektur integrierter Informationssysteme. Grundlagen der Unternehmensmodellierung. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Scheer, A.-W.; Jost, W.; Wagner, K. (2005): Von Prozessmodellen zu lauffähigen Anwendungen. ARIS in der Praxis. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Schlag, S.; Runzheimer, B. (2001): Balanced Scorecard im Produktionssystemcontrolling. Anwendbarkeit und Ausgestaltung für den operativen Bereich. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.
- Schmidt, A.; Schneider, M. (2008): Lager- und Materialflussprozesse. In: Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K.

(Hrsg.). Handbuch Logistik. 3. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Schmitt, A.J. (2011): Strategies for customer service level protection under multi-echelon supply chain disruption risk. *Transportation Research Part B: Methodological* (45)8, S. 1266-1283.

Schniederjans, M.J.; Schniederjans, D.G.; Schniederjans, A.M. (2010): *Topics In Lean Supply Chain Management*. 14. Auflage. Singapur: World Scientific Publishing.

Scholl, A. (2008): Modellierung logistischer Systeme. In: Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K. (Hrsg.). *Handbuch Logistik*. 3. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Scholz-Reiter, B.; de Beer, C.; Freitag, M.; Hamann, T.; Rekersbrink, H.; Topi Tervo, J. (2008): *Dynamik logistischer Systeme*. In: Nyhuis, P.: *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Schönsleben, P. (2001): *Integrales Informationsmanagement. Informationssysteme für Geschäftsprozesse - Management, Modellierung, Lebenszyklus und Technologie*. 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Schönsleben, P. (2016): *Integrales Logistikmanagement*. 7. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Schröder, M.; Jami, N.; Beißert, U.; Motta, M. (2015): Konzeptionierung eines integrierten modellbasierten Ansatzes zur Prognose von transportlogistischen und intralogistischen Ereignissen in Logistiknetzwerken. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Hrsg.): *Simulation in Production and Logistics 2015*. ASIM-Mitteilung Nr. 157. Tagungsband 16. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik. Dortmund, 23.-25.09.2015. S.147-156.

- Schuh, G.; Stich, V. (2013): Logistikmanagement. Handbuch Produktion und Management 6. 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Seidlmeier, H. (2015): Prozessmodellierung mit ARIS. Eine beispielorientierte Einführung für Studium und Praxis in ARIS 9. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Shao, J.; Sun, Y.; Noche, B. (2015): Optimization of Integrated Supply Chain Planning under Multiple Uncertainty. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Sheffi, Y. (2001): Supply chain management under the threat of international terrorism. *The International Journal of Logistics Management* 12(2), S. 1-11.
- Sheffi, Y.; Rice, J.B. jr. (2005): A Supply Chain View of Resilient Enterprise. *MIT SMR* 47(1). S. 41-48.
- Siemens AG (2018): Simulieren von Logistik und Materialfluss für verbesserte Systemleistung. [https://www.plm.automation.siemens.com/de\\_de/products/tecnomatix/manufacturing-simulation/material-flow/plant-simulation.shtml](https://www.plm.automation.siemens.com/de_de/products/tecnomatix/manufacturing-simulation/material-flow/plant-simulation.shtml). [abgerufen am 30.06.2018]
- Simchi-Levi, D.; Kaminsky, P.; Simchi-Levi, E. (2007): *Designing and Managing the Supply Chain. Concepts, Strategies & Case studies*. 3. Auflage. New York City: McGraw Hill.
- Simatupang, T.M.; Sridharan, R. (2005): An integrative framework for supply chain collaboration. In: *The International Journal of Logistics Management* 16(2). S. 257-274.
- Solomon, M.M. (1987): Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research* 35, S. 254-265.

- Stachowiak, H. (1973): Allgemeine Modelltheorie. Wien New York: Springer.
- Stadtler, H. (2015): Supply Chain Management: An Overview. In: Stadtler et al.: Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software and Case Studies. 5. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Sterman, J. (1989): Modeling Managerial Behavior. Misperceptions of Feedback in a Dynamic Decision Making Experiment. Management Science 35(3), S. 321-339.
- Stickel, M. (2006): Planung und Steuerung von Crossdocking-Zentren. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie.
- Sun, J.; Matsui, M.; Yin, Y. (2012): Supplier risk management. An economic model of P-chart considered due-date and quality risks. International Journal of Production 139(1), S. 58-64.
- Tempelmeier, H. (2015): Bestandsmanagement in Supply Chains. 5. Auflage. Norderstedt: Books on Demand.
- Tempelmeier, H.; Fischer, L. (2010): Approximation of the probability distribution of the customer waiting time under an  $(r, s, q)$  inventory policy in discrete time. International Journal of Production Research 48, S. 5181-5193.
- Thaler, K. (2007): Supply Chain Management. Prozessoptimierung in der logistischen Kette. 5. Auflage. Troisdorf: Bildungsverlag EINS.
- Toth, M. (2009): Prozesse in Logistiknetzwerken. Supply Chain Management. In: Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K. (Hrsg.). Handbuch Logistik. 3. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

- Toth, P.; Vigo, D. (2014): Vehicle routing. Problems, methods, and applications. 2. Auflage. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Trkman, P.; McCormak, K. (2009): Supply chain risk in turbulent environments. A conceptual model for managing supply chain network risk. *International Journal of Production Economics* 119(2), S. 247-258.
- Tuncel, G.; Alpan, G. (2010): Risk assessment and management for supply chain networks: A case study. *Computers in Industry* 61(3), S. 250-259.
- Turabian, K. L.; Booth, W. C. ; Colomb, G. G.; Williams, J. M. (2013): A manual for writers of research papers, theses and dissertations. Chicago style for students and researchers. 8. Auflage. Chicago London: The University of Chicago Press.
- United Nations Economic Commission for Europe (2018): UN/CEFACT. <http://www.unece.org/cefact/>. [abgerufen am 30.06.2018]
- Vahrenkamp, R.; Kotzab, H.; Siepermann, C. (2012): *Logistik. Management und Strategien*. 7. Auflage. München: Oldenbourg.
- Verband der Automobilindustrie (2013): VDA 4985. Datenübertragung von JIT-Abrufen. Berlin.
- Verband der Automobilindustrie (2016): VDA 4984. Datenübertragung von Lieferabrufen. Berlin.
- Verband der Automobilindustrie (2016): VDA 4986. Datenübertragung von Produktionssynchronen Abrufen. Berlin.
- Verband der Automobilindustrie (2016): VDA 4987. Datenübertragung von Lieferavisen. Berlin.
- Verband der Automobilindustrie (2016): VDA 5002. Begriffsbestimmungen im Transport- und Lieferprozess der Automobilindustrie. Berlin.

- Verband der Automobilindustrie (2017): VDA 4987. Transportauftrag mit EDI. Berlin.
- Verein Deutscher Ingenieure (1997): VDI 3633 Blatt 3. Experimentplanung und -auswertung. Düsseldorf.
- Verein Deutscher Ingenieure (2001): VDI 4400 Blatt 1. Logistikkennzahlen für die Beschaffung. Düsseldorf.
- Verein Deutscher Ingenieure (2002): VDI 4400 Blatt 3. Logistikkennzahlen für die Distribution. Düsseldorf.
- Verein Deutscher Ingenieure (2004): VDI 4400 Blatt 2. Logistikkennzahlen für die Produktion. Düsseldorf.
- Verein Deutscher Ingenieure (2009): VDI 3633 Blatt 11. Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Simulation und Visualisierung. Düsseldorf.
- Verein Deutscher Ingenieure (2012): VDI 2870 Blatt 1. Ganzheitliche Produktionssysteme. Grundlagen, Einführung und Bewertung. Düsseldorf.
- Verein Deutscher Ingenieure (2013): VDI 2870 Blatt 2. Ganzheitliche Produktionssysteme. Methodenkatalog. Düsseldorf.
- Verein Deutscher Ingenieure (2014): VDI 3633 Blatt 1. Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Grundlagen. Düsseldorf.
- Verein Deutscher Ingenieure (2016): VDI 3633 Blatt 12. Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Simulation und Optimierung. Düsseldorf.
- Verein Deutscher Ingenieure (2016b): VDI 4465 Blatt 1. Modellbildung. Gründruck. Düsseldorf.

- Verl, A.; Lechler, A. (2014): Steuerung aus der Cloud. In: Bauernhansl, T.; ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B.: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Vilko, J.; Hallikas, J. (2012): Risk assessment in multimodal supply chains. *International Journal of Production Economics* 140(2), S 586-595.
- Wagner, S.; Bode, C. (2006): An empirical Investigation into Supply Chain Vulnerability. *Journal of Purchasing & Supply Management* 12. S. 301-312.
- Waters, D. (2011): *Supply Chain Risk Management. Vulnerability and Resilience in Logistics*. 2. Auflage. London: Kogan Page.
- Weber, J. (2002): *Logistik- und Supply Chain Controlling*. 5. Auflage. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.
- Weber, J. (2012): *Logistikkostenrechnung. Kosten-, Leistungs- und Erlösinformationen zur erfolgsorientierten Steuerung der Logistik*. 3. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Welch, P.D. (1981): *On the Problem of the Initial Transient in Steady-State Simulation*. New York: IBM Watson Research Center.
- Welch, P.D. (1983): *The Statistical Analysis of Simulation Results*. In: Lavenberg, S.S. (Hrsg.): *The Computer Performance Modeling Handbook*. San Diego: Academic Press.
- Weigert, G.; Rose, O. (2011): *Stell- und Zielgrößen*. In: März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G.: *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Wensing, T. (2011). *Periodic Review Inventory Systems*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

- Wenzel, S.; Collisi-Böhmer, S.; Pitsch, H.; Rose, O.; Weiß, M. (2008): Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik. Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Werner, H. (2013): Supply Chain Management. Grundlagen, Strategien, Instrumente und Controlling. 5. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Werners, B. (2013): Grundlagen des Operations Research. Mit Aufgaben und Lösungen. 3. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Wiendahl, H.P. (1997): Fertigungsregelung. Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells. Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig.
- Wittenbrink, P. (2014): Transportmanagement. Kostenoptimierung, Green Logistics und Herausforderungen an der Schnittstelle Rampe. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Wilken, V. (2017): Kostensätze Gütertransport Straße. Unverbindliche Kostensätze für Gütertransport auf der Straße. Ausgabe 2018. Düsseldorf: Verkehrs-Verlag Fischer.
- Womack, J. P.; Jones, D. T.; Ross, D. (2007): The Machine That Changed the World. The story of lean production-- Toyota's secret weapon in the global car wars that is now revolutionizing world industry. London: Free Press.
- Wooldridge, M. (2009): An Introduction to Multi Agent Systems. 2. Auflage. Cambridge: MIT Press.
- Zillus, A. (2003): Untersuchung der Wartezeit von Kundenaufträgen in der Supply Chain. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie.

- Zsifkovits, H.; Krenn, B. (2008): Beherrschung von komplexen Systemen durch Modellbildung und Simulation. In: Engelhardt-Nowitzki, C.; Nowitzki, O.; Krenn, B. (Hrsg.): Management komplexer Materialflüsse mittels Simulation. State-of-the-Art und innovative Konzepte. Wiesbaden: Springer-Gabler.
- Zülch, G.; Stock, P. (2010): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. ASIM-Mitteilung Nr. 131. Tagungsband der ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik. Karlsruhe, 07.-08-10.2010.



## A. Testinstanzen

CUSTNO.	XCOORD.	YCOORD.	DEMAND	LON.	LAT.
1	35	35	Hub	6,9740	51,1172
2	41	49	10	7,0581	51,2430
3	35	17	7	6,9740	50,9554
4	55	45	13	7,2542	51,2070
5	55	20	19	7,2542	50,9824
6	15	30	26	6,6939	51,0722
7	25	30	3	6,8340	51,0722
8	20	50	5	6,7640	51,2519
9	10	43	9	6,6239	51,1890
10	55	60	16	7,2542	51,3418
11	30	60	16	6,9040	51,3418
12	20	65	12	6,7640	51,3867
13	50	35	19	7,1841	51,1172
14	30	25	23	6,9040	51,0273
15	15	10	20	6,6939	50,8925
16	30	5	8	6,9040	50,8476
17	10	20	19	6,6239	50,9824
18	5	30	2	6,5539	51,0722
19	20	40	12	6,7640	51,1621
20	15	60	17	6,6939	51,3418
21	45	65	9	7,1141	51,3867
22	45	20	11	7,1141	50,9824
23	45	10	18	7,1141	50,8925
24	55	5	29	7,2542	50,8476
25	65	35	3	7,3942	51,1172
26	65	20	6	7,3942	50,9824

Tabelle A.1: Standorte und mittlerer Bedarf im Vorholgebiet R (Random)

CUSTNO.	XCOORD.	YCOORD.	DEMAND	LON.	LAT.
1	40	50	Hub	8,6961	49,8031
2	25	85	20	8,4861	50,1175
3	22	75	30	8,4440	50,0277
4	22	85	10	8,4440	50,1175
5	20	80	40	8,4160	50,0726
6	20	85	20	8,4160	50,1175
7	18	75	20	8,3880	50,0277
8	15	75	20	8,3460	50,0277
9	15	80	10	8,3460	50,0726
10	10	35	20	8,2760	49,6683
11	10	40	30	8,2760	49,7132
12	8	40	40	8,2480	49,7132
13	8	45	20	8,2480	49,7581
14	5	35	10	8,2059	49,6683
15	5	45	10	8,2059	49,7581
16	2	40	20	8,1639	49,7132
17	0	40	20	8,1359	49,7132
18	0	45	20	8,1359	49,7581
77	60	12	31	8,9763	49,4616
78	23	3	7	8,4580	49,3808
79	8	56	27	8,2480	49,8570
80	6	68	30	8,2200	49,9648
81	47	47	13	8,7942	49,7761
82	49	58	10	8,8222	49,8749
83	27	43	9	8,5141	49,7402
84	37	31	14	8,6541	49,6324

Tabelle A.2: Standorte und mittlerer Bedarf im Vorholgebiet RC (Random-Clustered)

CUST- NO.	SCV: 0,15 l: 5 q: var	SCV: 0,01 l: 5 q: var	SCV: 0,75 l: 5 q: var	SCV: 0,15 l: 3 q: var	SCV: 0,15 l: 7 q: var	SCV: 0,15 l: 5 q: 50	SCV: 0,15 l: 5 q: 850
2	47	46	56	27	67	59	14
3	30	29	34	16	44	40	1
4	65	62	79	38	92	79	30
5	101	95	127	61	141	121	64
6	145	134	187	90	201	170	103
7	12	12	14	6	18	15	1
8	24	23	28	14	34	27	1
9	41	40	48	23	60	53	8
10	83	79	103	49	116	100	47
11	83	79	103	49	116	100	47
12	59	57	71	34	84	73	25
13	101	95	127	61	141	121	64
14	126	118	161	77	175	149	86
15	107	101	136	65	150	128	70
16	35	35	41	19	52	46	3
17	101	95	127	61	141	121	64
18	7	7	7	3	11	9	1
19	59	57	71	34	84	73	25
20	89	84	111	53	125	107	53
21	41	40	48	23	60	53	8
22	53	51	63	30	75	66	19
23	95	90	119	57	133	114	58
24	155	146	195	94	216	191	120
25	12	12	14	6	18	15	1
26	30	29	36	17	42	34	1

Tabelle A.3: Bestellpunkte  $s$  für die Sekundärprodukte der Lieferanten im Vorholgebiet R (Random)

CUST- NO.	SCV: 0,15 l: 5 q: var	SCV: 0,01 l: 5 q: var	SCV: 0,75 l: 5 q: var	SCV: 0,15 l: 3 q: var	SCV: 0,15 l: 7 q: var	SCV: 0,15 l: 5 q: 50	SCV: 0,15 l: 5 q: 850
2	107	101	136	65	150	128	70
3	161	151	203	98	224	198	126
4	47	46	56	27	67	59	14
5	224	207	290	139	309	271	183
6	107	101	136	65	150	128	70
7	107	101	136	65	150	128	70
8	107	101	136	65	150	128	70
9	47	46	56	27	67	59	14
10	107	101	136	65	150	128	70
11	161	151	203	98	224	198	126
12	224	207	290	139	309	271	183
13	107	101	136	65	150	128	70
14	47	46	56	27	67	59	14
15	47	46	56	27	67	59	14
16	107	101	136	65	150	128	70
17	107	101	136	65	150	128	70
18	107	101	136	65	150	128	70
77	167	157	212	102	233	205	132
78	30	29	34	16	44	40	1
79	152	140	196	94	209	177	109
80	161	151	203	98	224	198	126
81	65	62	79	38	92	79	30
82	47	46	56	27	67	59	14
83	41	40	48	23	60	53	8
84	71	68	87	42	100	86	36

Tabelle A.4: Bestellpunkte  $s$  für die Sekundärprodukte der Lieferanten im Vorholgebiet RC (Random-Clustered)

<b>CUSTNO.</b>	<b>SCV: 0,15</b> <b>l: 4</b> <b>q: var</b>		<b>CUSTNO.</b>	<b>SCV: 0,15</b> <b>l: 4</b> <b>q: var</b>
2	37		2	86
3	23		3	129
4	51		4	37
5	81		5	181
6	118		6	86
7	9		7	86
8	19		8	86
9	32		9	37
10	66		10	86
11	66		11	129
12	46		12	181
13	81		13	86
14	102		14	37
15	86		15	37
16	27		16	86
17	81		17	86
18	5		18	86
19	46		77	134
20	71		78	23
21	32		79	123
22	42		80	129
23	76		81	51
24	124		82	37
25	9		83	32
26	23		84	56

Tabelle A.5: Bestellpunkte  $s$  für die Sekundärprodukte der Lieferanten in den Vorholgebieten R und RC für eine Planlieferzeit von vier Tagen

In einem von Kostendruck geprägten Wettbewerb konkurrieren nicht nur einzelne Unternehmen, sondern vielmehr ganze Wertschöpfungsketten um die Gunst der Kunden. Dem Supply Chain Management kommt durch die übergeordnete Sicht auf die logistischen Prozesse die Aufgabe einer ganzheitlichen Planung und Steuerung über Unternehmensgrenzen hinweg zu. Es mangelt derzeit noch an Verfahren zur effizienten Koordination von Entscheidungsproblemen unterschiedlicher logistischer Teildisziplinen und der Verknüpfung des operativen mit dem taktisch-strategischen Planungshorizont.

In dieser Arbeit werden Ursachen und Folgen von Volatilität in den regelmäßigen Abläufen eines logistischen Netzwerks untersucht. Auf der Grundlage der Erkenntnisse wird ein Konzept zur kooperativen Planung und Steuerung mittels Softwareagenten vorgeschlagen und im Vergleich zu einer Ablaufsteuerung nach dem FIFO-Prinzip in einer Simulationsumgebung evaluiert. Der Fokus liegt dabei auf der Untersuchung der Wirksamkeit einer dynamischen Dringlichkeitsbewertung zur Priorisierung von Aufträgen.