

Stephanie Freiwald

# Supply Chain Design



Stephanie Freiwald

## Supply Chain Design

Das Supply Chain Design als strategisches Supply Chain Management beinhaltet als wesentlichen Aspekt die Konfiguration der Supply Chain. Dabei sind die über eine Preisminimierung hinausgehenden Auswahlkriterien der Zulieferer sowie die aus dem langfristigen Planungshorizont der Fragestellung resultierende Unsicherheit geeignet zu berücksichtigen. In dieser Arbeit werden die vielfältigen betriebswirtschaftlichen Aspekte des Supply Chain Design umfassend diskutiert und ein Kriterienkatalog zur Auswahl von Zulieferern entwickelt. Die Unsicherheit wird mit Hilfe des neu entwickelten Konzeptes der Zielrobustheit abgebildet. Die Planungsentscheidungen im Rahmen des Supply Chain Design können durch das vorgestellte Vorgehen unterstützt und in ihren Konsequenzen quantifiziert werden.

Stephanie Freiwald, geboren 1975 in Bochum, studierte Wirtschaftswissenschaft an der Ruhr-Universität Bochum. Nach dem Abschluss als Diplom-Ökonomin arbeitete sie ab 2001 als Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Unternehmensforschung und Rechnungswesen an der Ruhr-Universität Bochum. Die Promotion erfolgte 2005.

## Supply Chain Design

# **BOCHUMER BEITRÄGE ZUR UNTERNEHMENSFÜHRUNG**

Herausgegeben von

Prof. Dr. Michael Abramovici, Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Walther Busse von Colbe,  
Prof. Dr. Dr. h.c. Werner H. Engelhardt, Prof. Dr. Roland Gabriel,  
Prof. Dr. Gert Laßmann, Prof. Dr. Wolfgang Maßberg, Prof. Dr. Bernhard Pellens,  
Prof. Dr. Marion Steven, Prof. Dr. Rolf Wartmann, Prof. Dr. Brigitte Werners

Herausgegeben

vom Direktorium des Instituts für Unternehmensführung  
der Ruhr-Universität Bochum

**Band 72**



**PETER LANG**

Frankfurt am Main · Berlin · Bern · Bruxelles · New York · Oxford · Wien

Stephanie Freiwald

# Supply Chain Design

Robuste Planung mit differenzierter Auswahl  
der Zulieferer



**PETER LANG**

Europäischer Verlag der Wissenschaften

## **Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

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

Open Access: The online version of this publication is published on [www.peterlang.com](http://www.peterlang.com) and [www.econstor.eu](http://www.econstor.eu) under the international Creative Commons License CC-BY 4.0. Learn more on how you can use and share this work: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>.



This book is available Open Access thanks to the kind support of ZBW – Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft.

Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2005

Gedruckt auf alterungsbeständigem,  
säurefreiem Papier.

D 294

ISSN 1860-479X

ISBN 3-631-54375-1

ISBN 978-3-631-75511-2 (eBook)

© Peter Lang GmbH

Europäischer Verlag der Wissenschaften

Frankfurt am Main 2005

Alle Rechte vorbehalten.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Printed in Germany 1 2 3 4 6 7

[www.peterlang.de](http://www.peterlang.de)

## Geleitwort

Vor dem Hintergrund zunehmender Globalisierung und der damit einhergehenden Steigerung des Wettbewerbs ist die effiziente Erfüllung der Kundenanforderungen von besonderer Wichtigkeit für Unternehmen. Zur Erreichung dieser Anforderungen ist auch die gesamte Wertschöpfungskette vom Rohstoff über die verschiedenen Produktions-, Lager- und Transportstufen bis hin zum Kunden zu beachten und möglichst zu optimieren. Hier kann das Supply Chain Management mit einer unternehmensübergreifenden Berücksichtigung der Material- und Informationsflüsse wesentliche Unterstützung liefern. Im Rahmen des Supply Chain Designs, einem strategischen Teil des Supply Chain Managements, werden Produktions- und Lagerstandorte und Zulieferer ausgewählt, die den Bedingungsrahmen für spätere Entscheidungen über die konkret zu beschaffenden, zu produzierenden, zu lagernden und zu transportierenden Mengen bilden. Derartige strategische Entscheidungen sollten robust sein, um eine angemessene Reaktion auf die bei der Planung noch unsicheren, zukünftig eintretenden unterschiedlichen Situationen zu ermöglichen.

Frau Dr. Freiwald behandelt diese aktuelle, theoretisch sowie praktisch interessante betriebswirtschaftliche Problematik und entwickelt ein Konzept zur Entscheidungsunterstützung mittels quantitativer Methoden und Modelle für das Supply Chain Design. Insbesondere prognosegetriebene Supply Chains mit den Unsicherheiten hinsichtlich zukünftig nachgefragter Mengen und die differenzierte Auswahl der Zulieferer stehen im Zentrum der Ausführungen. Besonderes Gewicht wird auf die Ermittlung einer robusten Lösung gelegt, die die längerfristige Festlegung von Standorten und Zulieferern derart vornimmt, dass für unterschiedliche zukünftige Nachfragerrealisationen jeweils gute Lösungen durch kurzfristige Mengenanpassungen im Rahmen der längerfristig verfügbaren Kapazitäten möglich sind. Ein weiterer zentraler Gesichtspunkt ist die quantitative Berücksichtigung der differenzierten Auswahl der Zulieferer, bei der neben den Kosten auch weitere wichtige Kriterien eingehen.

Die bisher in der Literatur vorgeschlagenen quantitativen Ansätze zum Supply Chain Design werden detailliert erörtert und strukturiert. Als erstes eigenständiges Ergebnis wird ein allgemein gültiges Basismodell zum Supply Chain Design formuliert, für das sehr umfassend und präzise detailliert Zusatzkomponenten vorgeschlagen werden, die die Anwendung des Modells in den unterschiedlichsten realen Kontexten ermöglichen. Der in bisherigen quantitativen Ansätzen meist vernachlässigte Gesichtspunkt der Berücksichtigung der Zuliefererauswahl, zumindest über eine reine Kostenbetrachtung hinaus, wird von Frau Dr. Freiwald aufgegriffen. Die relevanten Kriterien werden in ihrer situationsspezifischen Bedeutung herausgestellt und auf innovative Art kompe-

tent in quantitative Modelle integriert. Von besonderer Schwierigkeit ist die Berücksichtigung des Risikos unterschiedlicher zukünftiger Umweltzustände im Supply Chain Design. Hier verwendet Frau Dr. Freiwald ein Robustheitskonzept, welches sie basierend auf bekannten Ansätzen entscheidungstheoretisch fundiert innovativ konzipiert und formalisiert in die vorgeschlagenen komplexen mathematischen Optimierungsmodelle integriert.

Dass dieses theoretische Konzept einsetzbar ist und Fortschritte für die praktische Bewältigung komplexer Probleme des Supply Chain Designs leistet, wird ausführlich anhand der prototypischen Realisation belegt. Das gewählte Beispiel entspricht einer typischen realen Situation, sodass die mit sehr aufwendigen, umfangreichen Berechnungen erzielten detaillierten Ergebnisse Rückschlüsse auf das Einsatzpotenzial des vorgestellten Konzepts erlauben. Durch die sehr ansprechende Form der Aufbereitung mittels umfangreicher Tabellen und Graphiken sind die höchst anspruchsvollen Analysen und erzielten Resultate im Detail nachvollziehbar.

Die vorliegende Arbeit ist innovativ und stellt einen besonderen wissenschaftlichen Fortschritt dar, in dem theoretische Erkenntnisse im betriebswirtschaftlichen Bereich gewonnen, für Anwendungen erschlossen und prototypisch realisiert werden. Es ist zu wünschen, dass sie in Wissenschaft und Unternehmenspraxis große Beachtung findet.

Prof. Dr. Brigitte Werners



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit, die im Januar 2005 an der Ruhr-Universität Bochum von der Fakultät für Wirtschaftswissenschaft als Dissertation angenommen wurde, entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin des Lehrstuhls für Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Unternehmensforschung und Rechnungswesen. An dieser Stelle möchte ich all denen danken, die direkt oder indirekt zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr. Brigitte Werners für die Betreuung der Arbeit. Durch ihre stete Diskussionsbereitschaft, auch während ihrer knappen Zeit als Dekanin der Fakultät, und ihre vielfältigen Anregungen hat sie sehr zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Frau Prof. Dr. Marion Steven danke ich für die Übernahme des Korreferats, dem Institut für Unternehmensführung für die Aufnahme dieser Arbeit in ihre Schriftenreihe.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls danke ich für die schöne Zeit und die verschiedensten interessanten Diskussionen. Besonders hervorzuheben ist Bernd Slaghuis, der als mein Schreibtischnachbar und guter Freund immer dafür gesorgt hat, dass meine Motivation nicht nachlässt. Für die Hilfe bei der Strukturierung meiner Gedanken und das Korrekturlesen meiner Arbeit bin ich ihm zu Dank verpflichtet. Den studentischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls gilt mein Dank für die vielfältige Unterstützung während meiner Promotion. Stellvertretend möchte ich hier Thomas Wülfing, Ann-Kristin Klas und Stefanie Reinhardt nennen. Unserer Sekretärin Inge Spieker danke ich für die kontinuierliche Bereitstellung eines koffeinhaltigen Getränks und die tolle Zusammenarbeit.

Mein besonderer Dank gilt Jens Thorn, nicht nur für fachliche Anregungen und Diskussionen sowie unermüdliches Korrekturlesen, sondern ebenfalls für seine moralische Unterstützung. Schließlich gebührt meiner Mutter ein besonders herzlicher Dank dafür, dass sie meine Ausbildung ermöglicht und mich jederzeit unterstützt und ermutigt hat.

Stephanie Freiwald



**Inhaltsverzeichnis**

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	XIII
<b>Tabellenverzeichnis</b>	XV
<b>Abkürzungs- und Symbolverzeichnis</b>	XVII

<b>1 Einleitung</b>	1
<b>2 Supply Chain Design als Basis des Supply Chain Management</b>	5
2.1 Grundlagen des Supply Chain Management	5
2.1.1 Der Begriff des Supply Chain Management	5
2.1.2 Ziele und Aufgaben des Supply Chain Management	10
2.2 Supply Chain Design als strategisches Supply Chain Management	16
2.2.1 Der Begriff des Supply Chain Design	16
2.2.2 Ziele und Aufgaben des Supply Chain Design	19
2.3 Zusammenarbeit im Rahmen des Supply Chain Design	24
2.3.1 Collaborative Planning	24
2.3.2 Supplier und Customer Relationship Management	28
<b>3 Quantitative Planungsunterstützung im Supply Chain Design</b>	33
3.1 Grundlagen quantitativer Planungsunterstützung	33
3.1.1 Mathematische Modelle zur Planungsunterstützung	33
3.1.2 Charakteristika mathematischer Modelle zum Supply Chain Design	37
3.2 Supply Chain Design unter Sicherheit	39
3.2.1 Supply Chain Design mit deterministischen Modellen	39
3.2.2 Analyse und Bewertung der vorgestellten Modelle	44
3.3 Supply Chain Design unter Unsicherheit	49
3.3.1 Supply Chain Design mit stochastischen Modellen	49
3.3.2 Analyse und Bewertung der vorgestellten Modelle	52

3.4 Entwicklung eines umfassenden Modells zum Supply Chain Design	57
3.4.1 Modellierung der Grundstruktur	57
3.4.2 Anwendungsspezifische Detaillierungen und Erweiterungen	61
3.4.3 Besonderheiten mehrperiodiger Modelle	68
<b>4 Die Berücksichtigung der Zulieferer im Supply Chain Design</b>	<b>75</b>
4.1 Die Bedeutung der Beschaffung im Supply Chain Management	75
4.2 Verfahren zur Auswahl von Zulieferern	77
4.2.1 Nutzwertanalyse und Multi-Attributive Nutzentheorie	77
4.2.2 Mathematische Optimierungsansätze	80
4.2.3 Analytic Hierarchy Process	84
4.2.4 Data Envelopment Analysis	89
4.2.5 Analyse und Bewertung der vorgestellten Verfahren	93
4.3 Kriterien zur Auswahl von Zulieferern	95
4.3.1 Analyse der in der Literatur verwendeten Auswahlkriterien	95
4.3.2 Entwicklung beschaffungssituationsspezifischer Auswahlkriterien	98
4.4 Supply Chain Design mit fundierter Zuliefererauswahl	105
4.4.1 Beitrag der Kriterien zur quantitativen Zuliefererauswahl	105
4.4.2 Erweiterung der Modelle zum Supply Chain Design	110
<b>5 Robuste Planungsunterstützung im Supply Chain Design</b>	<b>115</b>
5.1 Quantitative Planungsunterstützung bei Unsicherheit	115
5.2 Stochastische Modelle zur Planung bei Unsicherheit	117
5.2.1 Darstellung verschiedener Modellierungsansätze	117
5.2.2 Besonderheiten szenariobasierter Ansätze	121
5.3 Robuste Planungsunterstützung	123
5.3.1 Der Begriff der Robustheit	123
5.3.2 Robustheit in mathematischen Modellen	128

---

5.4 Planungsunterstützung bei Mehrfachzielsetzung	138
5.4.1 Mehrfachzielsetzung in mathematischen Modellen	138
5.4.2 Erweiterung des Robustheitskonzeptes um die Zielrobustheit	140
5.5 Robustheit im Supply Chain Design	147
5.5.1 Robustheit im Supply Chain Design bei einem Ziel	147
5.5.2 Robustheit im Supply Chain Design bei Mehrfachzielsetzung	153
<b>6 Anwendung zur Konfiguration einer robusten Supply Chain</b>	<b>159</b>
6.1 Darstellung der Problemstruktur	159
6.1.1 Ausgangssituation	159
6.1.2 Unsicherheit	161
6.2 Robustheit im Supply Chain Design	163
6.2.1 Verwendete Ersatzmodelle	163
6.2.2 Analyse der szenariooptimalen Ergebnisse	164
6.2.3 Bestimmung einer robusten Supply Chain	171
6.3 Robustheit im Supply Chain Design mit erweiterter Zuliefererauswahl	182
6.3.1 Erweiterte Ausgangssituation und verwendete Ersatzmodelle	182
6.3.2 Analyse der Ergebnisse bei gegebenem Anspruchsniveau	185
6.3.3 Analyse der Ergebnisse bei gleicher relativer Abweichung	191
6.3.4 Analyse der Ergebnisse bei Gewichtung der Ziele	197
6.3.5 Analyse ausgewählter Ergebnisse bei a posteriori bekannten Präferenzen	204
6.4 Kritische Würdigung	207
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>211</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>215</b>



**Abbildungsverzeichnis**

Abb. 1.1: Aufbau der Arbeit	2
Abb. 2.1: Struktur einer dreistufigen Supply Chain	7
Abb. 2.2: Visualisierung des Bullwhip-Effektes	11
Abb. 2.3: Ziele des Supply Chain Management	13
Abb. 2.4: Supply Chain Planning-Matrix	15
Abb. 2.5: Der Order Penetration Point in der Supply Chain	20
Abb. 2.6: Collaborative Planning anhand der Supply Chain Planning-Matrizen	27
Abb. 2.7: Phasen des Supplier Relationship Management	30
Abb. 3.1: Charakterisierung von Optimierungsmodellen	36
Abb. 4.1: Beschaffungsobjekte bei verschiedenen Beschaffungsbegriffen	75
Abb. 4.2: Bewertung von Zulieferern mit AHP	85
Abb. 4.3: Versorgungsrisiko-ABC-Portfolio	99
Abb. 4.4: Zulieferer-Abnehmer-Beziehungstypen-Portfolio	102
Abb. 4.5: Zuliefererportfolio	103
Abb. 4.6: Zulieferer-Produkt-Portfolio	104
Abb. 4.7: Erweiterte Zuliefererbewertung im Supply Chain Design mit AHP	109
Abb. 5.1: Entscheidungssituation der verschiedenen Robustheitsbegriffe	126
Abb. 5.2: Trade-Off-Kurve Optimalitätsrobustheit vs. Anspruchsniveau	145
Abb. 5.3: Trade-Off-Kurven Optimalitätsrobustheit bei zwei Zielen	146
Abb. 6.1: Darstellung einer möglichen Supply Chain	159
Abb. 6.2: Darstellung der Produktionsstruktur	160
Abb. 6.3: Nachfrageszenarien	162
Abb. 6.4: Optimale Supply Chain für Szenario 1	165
Abb. 6.5: Optimale Supply Chain für Szenario 2	166
Abb. 6.6: Optimale Supply Chain für Szenario 3	167
Abb. 6.7: Optimale Supply Chain für Szenario 4	168
Abb. 6.8: Gesamtdeckungsbeiträge bei einem Ziel	175
Abb. 6.9: Absolutes Bedauern bei einem Ziel	176
Abb. 6.10: Relatives Bedauern bei einem Ziel	176
Abb. 6.11: Unerfüllte Nachfrage bei einem Ziel	177
Abb. 6.12: Struktur der robusten Supply Chain bei einem Ziel	181
Abb. 6.13: Unerfüllte Nachfrage der Modelle mit Anspruchsniveau	186

Abb. 6.14: Absolutes Bedauern der Modelle mit Anspruchsniveau	187
Abb. 6.15: Relatives Bedauern der Modelle mit Anspruchsniveau	187
Abb. 6.16: Kumuliertes relatives Bedauern der Modelle mit Anspruchsniveau	188
Abb. 6.17: Struktur der robusten Lösung (AN)	191
Abb. 6.18: Unerfüllte Nachfrage der Modelle mit gleicher Abweichung	193
Abb. 6.19: Absolutes Bedauern der Modelle mit gleicher Abweichung (GDB)	193
Abb. 6.20: Absolutes Bedauern der Modelle mit gleicher Abweichung (GBZ)	194
Abb. 6.21: Kumuliertes relatives Bedauern der Modelle mit gleicher Abweichung	195
Abb. 6.22: Unerfüllte Nachfrage der Zielgewichtungsmodelle	198
Abb. 6.23: Absolutes Bedauern der Zielgewichtungsmodelle (GDB)	199
Abb. 6.24: Absolutes Bedauern der Zielgewichtungsmodelle (GBZ)	199
Abb. 6.25: Gewichtetes kumuliertes relatives Bedauern (ZG)	200
Abb. 6.26: Struktur der robusten Lösung (ZG)	203
Abb. 6.27: Minimaler Gesamtdeckungsbeitrag bei variierenden Anspruchsniveaus	204
Abb. 6.28: Unerfüllte Nachfrage bei variierenden Anspruchsniveaus	205
Abb. 6.29: Trade-Off-Kurve Typ 1 zum maximalen relativen Bedauern	205
Abb. 6.30: Trade-Off-Kurve Typ 2 zum maximalen relativen Bedauern	206
Abb. 6.31: Unerfüllte Nachfrage bei schwankenden Zielgewichten	207



## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Ausgewählte Definitionen des Begriffs Supply Chain	5
Tab. 2.2: Ausgewählte Definitionen des Begriffs Supply Chain Management	9
Tab. 2.3: Definitionen des Begriffs Supply Chain Design	17
Tab. 2.4: Merkmale zur Abgrenzung von Zuliefererbeziehungen	29
Tab. 3.1: Charakteristika deterministischer Optimierungsmodelle zum Supply Chain Design	45
Tab. 3.2: Inhaltliche Charakteristika deterministischer Modelle zum Supply Chain Design	46
Tab. 3.3: Charakteristika stochastischer Optimierungsmodelle zum Supply Chain Design	53
Tab. 3.4: Inhaltliche Charakteristika stochastischer Modelle zum Supply Chain Design	54
Tab. 4.1: 9-Punkte-Skala zur Bewertung der Paarvergleiche im AHP	86
Tab. 4.2: Ansätze zur Bewertung und Auswahl von Zulieferern	94
Tab. 4.3: In der Literatur verwendete Kriterien zur Auswahl von Zulieferern	97
Tab. 4.4: Beispiel zur Zuliefererbewertung	113
Tab. 5.1: Unsichere Einflussfaktoren im Supply Chain Management	115
Tab. 5.2: Literaturüberblick über Robustheit in mathematischen Modellen	135
Tab. 6.1a: Mindestbestellmengen	161
Tab. 6.1b: Maximale Bestellmengen	161
Tab. 6.2: Rohstoffpreise der Zulieferer	161
Tab. 6.3: Darstellung der verwendeten Modelle bei einem Ziel	163
Tab. 6.4: Mögliche Konsequenzen bei Anwendung der optimalen Lösung Szenario 1	166
Tab. 6.5: Mögliche Konsequenzen bei Anwendung der optimalen Lösung Szenario 2	167
Tab. 6.6: Mögliche Konsequenzen bei Anwendung der optimalen Lösung Szenario 3	168
Tab. 6.7: Mögliche Konsequenzen bei Anwendung der optimalen Lösung Szenario 4	169
Tab. 6.8: Mögliche Konsequenzen bei Anwendung der optimalen Lösung D-EW	170
Tab. 6.9: Ergebnisse der deterministischen Modelle bei einem Ziel	171
Tab. 6.10: Ergebnisse der Chance-Constrained-Modelle bei einem Ziel	173

Tab. 6.11: Ergebnisse der Kompensationsmodelle bei einem Ziel	174
Tab. 6.12: Relative Abweichungen von den besten möglichen Ausprägungen	178
Tab. 6.13: Streuungsmaße des Gesamtdeckungsbeitrags bei einem Ziel	179
Tab. 6.14: Struktur der robusten Supply Chain bei einem Ziel	180
Tab. 6.15: Bewertungen der Zulieferer bei einer Maximierungszielsetzung	182
Tab. 6.16: Bewertungen der Zulieferer bei einer Minimierungszielsetzung	182
Tab. 6.17: Szenariooptima der Zielsetzung Zuliefererbewertung	183
Tab. 6.18: Darstellung der verwendeten Modelle bei Mehrfachzielsetzung	184
Tab. 6.19: Ergebnisse der Modelle mit Anspruchsniveau	186
Tab. 6.20: Relative Abweichungen von den besten möglichen Ausprägungen (AN)	188
Tab. 6.21: Streuungsmaße des Gesamtdeckungsbeitrags (AN)	189
Tab. 6.22: Struktur der robusten Supply Chain bei Mehrfachzielsetzung (AN)	190
Tab. 6.23: Ergebnisse der Modelle mit gleicher Abweichung	192
Tab. 6.24: Relative Abweichungen von den besten möglichen Ausprägungen (GA)	195
Tab. 6.25: Ergebnisse der Zielgewichtungmodelle	197
Tab. 6.26: Relative Abweichungen von den besten möglichen Ausprägungen (ZG)	200
Tab. 6.27: Struktur der robusten Supply Chain bei Mehrfachzielsetzung (ZG)	202

**Abkürzungs- und Symbolverzeichnis**

$\alpha$	Zulässigkeitswahrscheinlichkeit
$\beta^1, \beta^2$	Gewichtungsfaktoren für die Optimalitätsrobustheit der verschiedenen Zielsetzungen
$\gamma$	Servicelevel (Prozentsatz der Nachfrage, die mindestens erfüllt werden soll)
$\rho$	Variable zur Erfassung der Zulässigkeitsrobustheit
$\omega$	Gewichtungsfaktor für die verschiedenen Robustheitsarten
$\xi$	Variable zur Erfassung der Optimalitätsrobustheit
$\xi^1, \xi^2$	Variable zur Erfassung der Optimalitätsrobustheit hinsichtlich Zielsetzung 1 bzw. 2
$a$	Anlagentyp, $a \in A$
$\tilde{A}$	Koeffizientenmatrix der Restriktionen mit unsicheren Parametern
$A_{rp}$	Bedarfskoeffizient, Menge des Rohstoffs $r$ , die erforderlich ist um eine Einheit des Produktes $p$ herzustellen
$AB_z$	Aggregierte Bewertung des Zulieferers $z$
AHP	Analytic Hierarchy Process
AN	Modelle mit vorgegebenem Anspruchsniveau
$AN^2$	Anspruchsniveau hinsichtlich der Optimalitätsrobustheit von Zielsetzung 2
ANZL	Anzahl Lager
$ANZL^{\min}$	Minimale Anzahl Lager
$ANZL^{\max}$	Maximale Anzahl Lager
ANZP	Anzahl Produktionsstandorte
$ANZP^{\min}$	Minimale Anzahl Produktionsstandorte
$ANZP^{\max}$	Maximale Anzahl Produktionsstandorte
$AQ_{rz}$	Ausschussquote von Zulieferer $z$ hinsichtlich Rohstoff $r$
$\tilde{b}$	Vektor der rechten Seite mit unsicheren Parametern
$best_{pjt}$	Lagerbestand des Produktes $p$ in Lager $j$ am Ende der Periode $t$
$bin^s$	Binärvariable, die angibt, ob in Szenario $s$ Unzulässigkeiten auftreten
$B_{pi}$	Kapazitätsinanspruchnahme des Produktionsstandortes $i$ für die Produktion einer Einheit des Produktes $p$
$c$	Kunde, $c \in C$
$\tilde{c}^T$	Vektor der Zielfunktionskoeffizienten mit unsicheren Parametern

$C_{pj}$	Kapazitätsinanspruchnahme des Lagers $j$ für die Lagerung einer Einheit des Produktes $p$
$D_{pc}$	Nachfrage des Kunden $c$ nach Produkt $p$
DEA	Data Envelopment Analysis
EKQ <sub>z</sub>	Eigenkapitalquote von Zulieferer $z$
ERP	Enterprise Resource Planning
EW	Erwartungswert
FBKA <sub>ai</sub>	Fixkosten für den Betrieb der Anlage $a$ am Standort $i$
FBKL <sub>j</sub>	Fixkosten für den Betrieb eines Lagers $j$
FBKP <sub>i</sub>	Fixkosten für den Betrieb des Produktionsstandortes $i$
FEKA <sub>ai</sub>	Fixkosten für die Errichtung einer Anlage des Typs $a$ am Standort $i$
FEKL <sub>j</sub>	Fixkosten, die anfallen, wenn am Standort $j$ ein Lager errichtet wird
FEKP <sub>i</sub>	Fixkosten, die anfallen, wenn am Standort $i$ ein Produktionsstandort errichtet wird
FEP <sub>z</sub>	Forschungs- und Entwicklungspotenzial von Zulieferer $z$
GA	Modelle mit gleicher (relativer) Abweichung
gbz	Aus der robusten Lösung resultierende Gesamtbewertung der Zulieferer
GBZ <sup>s</sup> <sub>opt</sub>	Optimale Gesamtbewertung der Zulieferer des Szenarios $s$
gdb <sup>s</sup>	Aus der robusten Lösung resultierender Gesamtdeckungsbeitrag des Szenarios $s$
GDB <sup>s</sup> <sub>opt</sub>	Optimaler Gesamtdeckungsbeitrag des Szenarios $s$ bei vollständiger Erfüllung der Nachfrage
GE	Geldeinheiten
hilf	Hilfsvariable
hilf <sub>ik,k<sub>2</sub>,t</sub>	Binärvariable, die angibt, ob in Periode $t$ an Standort $i$ der Kapazitätsmodus von $k_1$ zu $k_2$ geändert wird
$i$	Produktionsstandort, $i \in I$
$j$	Lagerstandort, $j \in J$
$k$	Kapazitätsmodus, $k \in K$
kap <sub>j</sub>	Kapazität des Lagers $j$
kapp <sub>i</sub>	Kapazität des Produktionsstandortes $i$
KAPA <sub>a</sub> <sup>max</sup>	Maximalkapazität der Anlage $a$
KAPL <sub>j</sub> <sup>max</sup>	Kapazitätsobergrenze des Lagers $j$
KAPL <sub>j</sub> <sup>min</sup>	Mindestkapazität des Lagers $j$
KAPP <sub>i</sub> <sup>max</sup>	Kapazitätsobergrenze des Produktionsstandortes $i$

$KAPP_i^{\min}$	Mindestkapazität des Produktionsstandortes $i$
$KAPWK_{ik_1k_2t}$	Kosten des Wechsels der Kapazitätsmodus von $k_1$ zu $k_2$ des Standortes $i$ in Periode $t$
$KAPZ_{rz}^{\max}$	Maximale Bestellmenge des Rohstoffs $r$ bei Zulieferer $z$
$KAPZ_{rz}^{\min}$	Mindestbestellmenge des Rohstoffs $r$ bei Zulieferer $z$
$KL_k^{\max}$	Maximalauslastung des Lagermodus $k$
$KL_k^{\min}$	Mindestauslastung des Lagermodus $k$
$KP_k^{\max}$	Maximalauslastung des Produktionsmodus $k$
$KP_k^{\min}$	Mindestauslastung des Produktionsmodus $k$
$LTQ_{rz}$	Quote nicht liefertermintreu gelieferter Rohstoffe $r$ von Zulieferer $z$
$M$	Große Zahl
$ME$	Mengeneinheiten
$MADM$	Multiple Attribute Decision Making
$MAUT$	Multi Attribute Utility Theory
$MCDM$	Multiple Criteria Decision Making
$MERB$	Minimierung des erwarteten relativen Bedauerns
$MMB$	Minimierung des maximalen Bedauerns
$MMRB$	Minimierung des maximalen relativen Bedauerns
$MODM$	Multiple Objective Decision Making
$NIQ_z$	Nettoinvestitionsquote von Zulieferer $z$
$OPP$	Order Penetration Point
$p$	Produkt, $p \in P$
$P_s$	Eintrittswahrscheinlichkeit von Szenario $s$
$PR_{pc}$	Preis, den Kunde $c$ für eine Einheit des Produktes $p$ bezahlt
$q^T$	Vektor der Zielfunktionskoeffizienten der Kompensationsvariable $\tilde{y}$
$r$	Rohstoff, $r \in R$
$R_{pr}$	Recyclingkoeffizient (Menge des Rohstoffs $r$ , die aus einer zurückgegebenen Einheit des Produktes $p$ resultiert)
$RET_{pc}$	Menge des Produktes $p$ , die von Kunde $c$ zum Recycling zurückgegeben wird
$RT$	Risikoterm
$s$	Szenario, $s \in S^1$
$SCM$	Supply Chain Management
$SCN$	Supply Chain Network
$SK$	Strafkosten je Einheit unbefriedigter Kundennachfrage

<sup>1</sup> In den Kapiteln 5 und 6 wird der Index  $s$  an die szenarioabhängigen Variablen und Parameter angefügt.

STA	Standardabweichung
t	Periode, $t \in T^2$
$u_s^+$	Überschreitung des szenariooptimalen Zielfunktionswertes bei Szenario s
$u_s^{1+}, u_s^{2+}$	Überschreitung des szenariooptimalen Zielfunktionswertes der Zielfunktion 1 bzw. 2 bei Szenario s
$u_s^-$	Unterschreitung des szenariooptimalen Zielfunktionswertes bei Szenario s
$u_s^{1-}, u_s^{2-}$	Unterschreitung des szenariooptimalen Zielfunktionswertes der Zielfunktion 1 bzw. 2 bei Szenario s
$v_s^+$	Positive Restriktionsverletzung
$v_s^-$	Negative Restriktionsverletzung
$v_{spc}^-$	Unerfüllte Nachfrage des Produktes p bei Kunde c in Szenario s
VAR	Varianz
$VBK_{rzi}$	Variable Beschaffungskosten für eine Einheit des Rohstoffs r von Zulieferer z und Lieferung zum Produktionsstandort i
$VLK_{pj}$	Variable Lagerhaltungskosten für eine Einheit des Produktes p in Lager j
$VLK_{pjc}$	Variable Lagerhaltungskosten für eine Einheit des Produktes p in Lager j inklusive der variablen Transportkosten zu Kunde c
$VK_{ijc}$	Variable Kosten für die Produktion am Standort i, die Lagerung in Lager j und den Transport der gesamten Nachfrage des Kunden c
$VPK_{pi}$	Variable Produktionskosten für eine Einheit des Produktes p am Standort i
$VPK_{pij}$	Variable Produktionskosten für eine Einheit des Produktes p am Standort i inklusive der variablen Transportkosten zu Lager j
$VTKL_{jc}$	Variable Transportkosten für eine Einheit eines Produktes von Lager j zu Kunde c
$VTKP_{ij}$	Variable Transportkosten für eine Einheit eines Produktes von Produktionsstandort i zu Lager j
W	Koeffizientenmatrix der Kompensationsvariable $\tilde{y}$
$x_1$	Vektor szenariounabhängiger Strukturvariablen (nicht-antizipierend)
$x_2^s$	Vektor szenarioabhängiger Strukturvariablen (antizipierend)
$x_{ijc}$	Anteil an der Gesamtnachfrage des Kunden c, der in Produktionsstandort i produziert und über Lager j zu Kunde c transportiert wird
$xb_{rzi}$	Menge des Rohstoffs r, die von Zulieferer z an Produktionsstandort i geliefert wird

<sup>2</sup> In Kapitel 3.4.3 werden die im Zeitablauf veränderlichen Variablen und Parameter um den Index t ergänzt.

$x_{l_{pjc}}$	Menge des Produktes $p$ , die von Lager $j$ an Kunde $c$ geliefert wird
$x_{p_{pij}}$	Menge des Produktes $p$ , die in Produktionsstandort $i$ produziert und zu Lager $j$ transportiert wird
$x_{r_{pci}}$	Menge, des Produktes $p$ , die von Kunde $c$ zu Produktionsstandort $i$ transportiert wird, um dort recycelt zu werden
$\tilde{y}$	Kompensationsvariable, die die Verletzung der Restriktionen in Abhängigkeit vom unsichern Umweltzustand beinhaltet
$yp_i$	Binärvariable für die Produktionsstandortentscheidung
$yp_{ik}$	Binärvariable für die Produktionsstandort- und Kapazitätsmodusentscheidung
$yp_{ikt}^B$	Binärvariable, die angibt, ob in Periode $t$ ein am Standort $i$ ein Produktionsstandort der Kapazität $k$ betrieben wird
$yp_{ikt}^E$	Binärvariable, die angibt, ob in Periode $t$ am Standort $i$ ein Produktionsstandort der Kapazität $k$ errichtet wird
$yl_j$	Binärvariable für die Lagerstandortentscheidung
$yl_{jk}$	Binärvariable für die Lagerstandort- und Kapazitätsmodusentscheidung
$yl_{jkt}^B$	Binärvariable, die angibt, ob in Periode $t$ am Standort $j$ ein Lager der Kapazität $k$ betrieben wird
$yl_{jkt}^E$	Binärvariable, die angibt, ob in Periode $t$ am Standort $j$ ein Lager der Kapazität $k$ errichtete wird
$yz_{rz}$	Binärvariable für die Zuliefererauswahlentscheidung für den Rohstoff $r$
$z$	Zulieferer, $z \in Z$
$z_s(x_1, x_2^s)$	Zielfunktionswert der robusten Lösung bei Szenario $s$
$z_s^1(x_1, x_2^s)$	Zielfunktionswert der robusten Lösung der Zielfunktion 1 bei Szenario $s$
$z_s^2(x_1, x_2^s)$	Zielfunktionswert der robusten Lösung der Zielfunktion 2 bei Szenario $s$
$za_{ai}$	Binärvariable für die Anlageninstallationsentscheidung
$zs_{jc}$	Binärvariable für die Single Sourcing-Entscheidung
$zs_{pjc}$	Binärvariable für die produktspezifische Single Sourcing-Entscheidung
$Z_s^{opt}$	Optimaler Zielfunktionswert von Szenario $s$
$Z_s^{lopt}, Z_s^{2opt}$	Optimaler Zielfunktionswert der Zielfunktion 1 bzw. 2 bei Szenario $s$
ZG	Zielgewichtungsmodelle



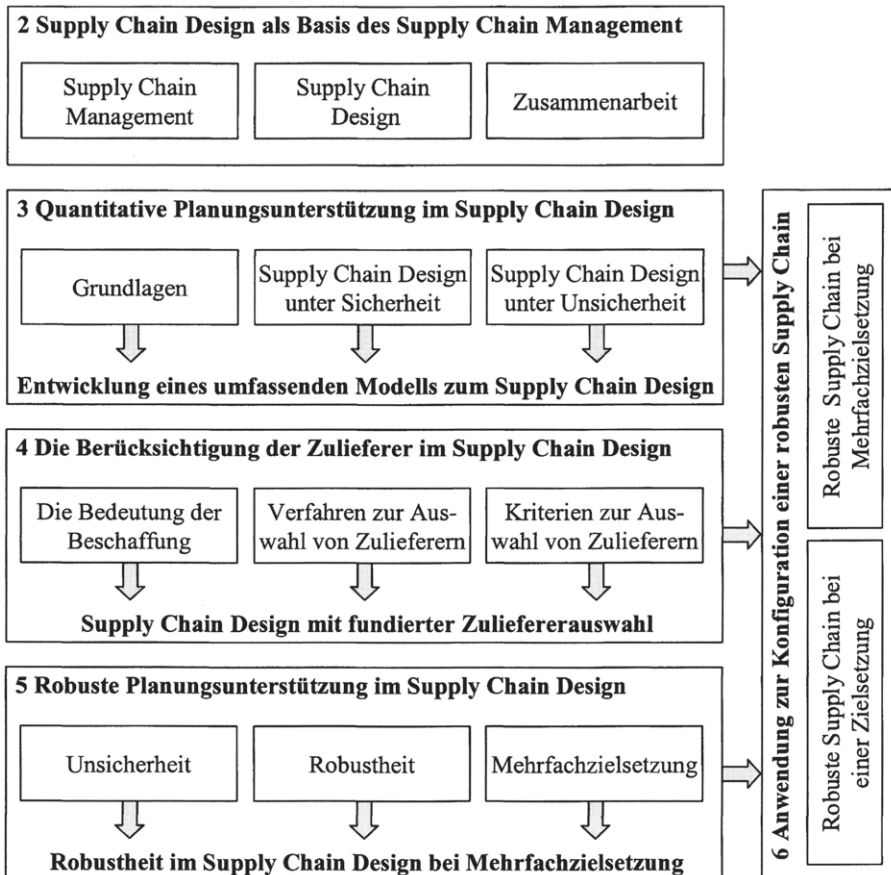


## 1 Einleitung

Das strategische Supply Chain Management beinhaltet als wesentliche Planungsaufgabe die Konfiguration der Supply Chain, auch bekannt unter dem Begriff Supply Chain Design. Dies umfasst die Planung der Standorte und Kapazitäten der Produktionsstätten und Lager sowie die Planung möglicher Materialflüsse der Rohstoffe, Zwischen- und Endprodukte vom Zulieferer bis zum Endproduktkunden. Im Rahmen des strategischen Supply Chain Management ist die Auswahl der Zulieferer insbesondere dann von Bedeutung, wenn es sich bei den zu beschaffenden Produktionsfaktoren um Schlüssel- oder Engpassfaktoren handelt. Im Zusammenhang mit der Konfiguration der Supply Chain erfolgt die Auswahl der Zulieferer in Modellen häufig auf Basis der Preise der zu beschaffenden Produktionsfaktoren. Insbesondere für eine langfristige Zusammenarbeit mit Schlüsselzulieferern ist jedoch eine sorgfältige Auswahl etwa im Hinblick auf das Forschungs- und Entwicklungspotenzial oder die finanzielle Lage dieser Zulieferer geboten. Darüber hinaus können auf Grund des langfristigen Planungshorizonts vielfältige Einflussfaktoren, insbesondere die Nachfrage, mit Unsicherheit behaftet sein. Es ist daher anzustreben, eine robuste Supply Chain zu gestalten, die unter verschiedenen Szenarien möglichst gute Ergebnisse hinsichtlich der relevanten Zielsetzungen zur Folge hat. Ziel dieser Arbeit ist daher die Einbindung der bisher separat behandelten Zuliefererauswahl in den Prozess des Supply Chain Design sowie die Konfiguration einer robusten Supply Chain unter Berücksichtigung der erweiterten Zuliefererbewertung und folglich bei Mehrfachzielsetzung.

Mathematische Modelle können den Entscheidungsträger maßgeblich bei dieser Planung der Supply Chain unterstützen. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher ein umfassendes mathematisches Modell zur Konfiguration einer Supply Chain entwickelt. Die vielfältigen vorgeschlagenen anwendungsspezifischen Erweiterungsmöglichkeiten erlauben eine Anpassung des Modells an verschiedene reale Problemstellungen. Um die beschaffungssituationsspezifischen Kriterien einer fundierten Zuliefererauswahl in den Prozess des Supply Chain Design zu integrieren, ist zunächst eine geeignete Quantifizierung der Bewertungskriterien zu diskutieren. Eine anschließende Analyse der aus der Literatur bekannten Robustheitskonzepte zeigt, dass diese für eine Anwendung bei Mehrfachzielsetzung nicht unmittelbar geeignet sind. Daher folgt die Einführung des Konzeptes der Zielrobustheit. Mittels verschiedener vorgeschlagener Ersatzmodelle ist die Berücksichtigung der zusätzlichen Zielsetzung der erweiterten Zuliefererbewertung im Rahmen der Konfiguration einer robusten Supply Chain möglich. Anhand eines auf einer realen Problemstellung basierenden Beispiels wird abschließend ein allgemeines Vorgehen zur Ermittlung einer robusten Lösung sowohl bei einer Zielsetzung als auch bei Mehrfachzielsetzung vorgestellt.

Der Aufbau der Arbeit ist in Abbildung 1.1 visualisiert und wird im Folgenden detailliert erläutert.



**Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit**

Im Anschluss an die Einleitung erfolgt im zweiten Kapitel eine betriebswirtschaftliche Einordnung des Supply Chain Design in das Konzept des Supply Chain Management. Die verschiedenen in der Literatur vorhandenen Begriffsdefinitionen werden hinsichtlich ihres Umfangs sowie ihrer Vor- und Nachteile diskutiert. Darauf aufbauend erfolgt eine Festlegung der Begriffsdefinitionen als Grundlage für diese Arbeit sowie eine Darstellung der Aufgaben und Ziele des Supply Chain Management und des Supply Chain Design. Eine Untersuchung der Voraussetzungen eines erfolgreichen Collaborative Planning sowie der Bedeutung des Supplier und Customer Relationship Management im Rahmen des Supply Chain Design bildet den Abschluss dieses Kapitels.

Das dritte Kapitel untersucht nach einer kurzen Erläuterung des Modellbegriffs die in der Literatur vorhandenen deterministischen und stochastischen Optimierungsmodelle zum Supply Chain Design. Nach dieser Analyse der in den Modellen erfassten Charakteristika realer Problemstellungen sowie der Art der Berücksichtigung der Unsicherheit wird ein umfassendes Modell zum Supply Chain Design entwickelt. Vielfältige anwendungsspezifische Erweiterungsmöglichkeiten dieses Modells runden das Kapitel ab.

Neben der Planung der räumlichen Struktur sind die Auswahl geeigneter Partner, insbesondere der Zulieferer, Gegenstand des Supply Chain Design. Das vierte Kapitel greift daher diese Anforderung als zweiten Schwerpunkt des Supply Chain Design auf. Ausgehend von einer Erläuterung des Beschaffungsbegriffs und einer Einordnung der Beschaffung in das Supply Chain Management werden zunächst in der Literatur verwendete Verfahren zur Bewertung und Auswahl von Zulieferern vorgestellt. Eine Analyse der verschiedenen in der Literatur vorhandenen Ansätze zur Auswahl von Zulieferern hinsichtlich der verwendeten Auswahlkriterien bzw. Zielsetzungen bei der Auswahl zeigt, dass nicht alle Auswahlkriterien für jedes zu beschaffende Produkt sinnvoll sind. Die Entwicklung eines beschaffungssituationsabhängigen Portfolios von Auswahlkriterien und die Integration der Erkenntnisse dieses Kapitels in das im vorherigen Kapitel entwickelte Modell zum Supply Chain Design beenden dieses Kapitel.

Die Berücksichtigung von Unsicherheit ist bereits während der Planung der Supply Chain wünschenswert und erlaubt die Konfiguration einer robusten Supply Chain, die bei verschiedenen möglichen Umweltentwicklungen zu guten Ergebnissen hinsichtlich der relevanten Zielsetzungen führt. Im fünften Kapitel werden daher zunächst die verschiedenen Entscheidungssituationen bei Unsicherheit und die unterschiedlichen Arten der Einbeziehung von Unsicherheit in mathematischen Modellen kurz erläutert. Anschließend erfolgt eine Erörterung des Begriffs Robustheit und eine Analyse der verschiedenen in der Literatur vorhandenen quantitativen Modelle zur Erzeugung robuster Lösungen. Ausgehend von der Zulässigkeits-, Ergebnis- und Optimalitätsrobustheit wird das Konzept der Zielrobustheit entwickelt, welches bei Problemstellungen mit mehreren Zielsetzungen angewandt werden kann. Abschließend werden basierend auf den im dritten und vierten Kapitel entwickelten Modellen verschiedene Ersatzmodelle zur Konfiguration einer robusten Supply Chain bei Einfach- und Mehrfachzielsetzung vorgestellt.

Das sechste Kapitel zeigt ein Vorgehen zur Ermittlung einer robusten Supply Chain und wendet die in dieser Arbeit entwickelten Modelle und Überlegungen auf ein Beispiel zum Supply Chain Design, welches auf einer realen Problemstellung basiert, an.

Nach der Vorstellung der Problemstruktur werden die ermittelten Lösungen der vielfältigen Modelle zunächst bei der Zielsetzung der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags analysiert und ein Vorgehen zur Auswahl einer robusten Supply Chain vorgestellt. Darüber hinaus wird unter Berücksichtigung der im fünften Kapitel entwickelten Ersatzmodelle zur Erzeugung robuster Lösungen bei Mehrfachzielsetzung das Konzept der Zielrobustheit auf die vorliegende Problemstellung angewandt und eine robuste Lösung vorgeschlagen. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Kapitel sieben.

## 2 Supply Chain Design als Basis des Supply Chain Management

### 2.1 Grundlagen des Supply Chain Management

#### 2.1.1 Der Begriff des Supply Chain Management

Bevor die Einordnung des Supply Chain Design in das Konzept des Supply Chain Management erfolgen kann, ist die Schaffung eines einheitlichen Begriffsverständnisses des Supply Chain Management erforderlich. Dafür ist zunächst der Begriff der Supply Chain zu erläutern. In der deutschsprachigen Literatur wird der Begriff der Supply Chain synonym mit Lieferkette<sup>1</sup>, Logistikkette<sup>2</sup>, Versorgungskette<sup>3</sup> und Wertschöpfungskette<sup>4</sup> verwendet. So unterschiedlich diese verschiedenen Begriffe anmuten, so vielfältig sind auch die Begriffsdefinitionen, die mit dem Begriff Supply Chain einhergehen. Tabelle 2.1 gibt einen chronologischen Überblick über verschiedene Definitionen dieses Begriffs in der deutsch- und englischsprachigen Literatur.

Quelle	Definition
Handfield/Nichols (1999), S. 2	"The supply chain encompasses all activities associated with the flow and transformation of goods from raw materials stage (extraction), through to the end user, as well as the associated information flows."
Ayers (2000), S. 4	"Life cycle processes comprising physical, information, financial, and knowledge flows whose purpose is to satisfy end-user requirements with products and services from multiple linked suppliers."
Mentzer et al. (2001), S. 4	"... a supply chain is defined as a set of three or more entities (organizations or individuals) directly involved in the upstream and downstream flows of products, services, finances, and/or information from a source to a customer."
Otto/Kotzab (2001), S. 160	"... kann die Supply Chain dementsprechend verstanden werden als eine Gruppe sequenziell interdependenter und über Aufträge verbundener Unternehmen, die Produkte in einheitlicher Richtung, vom Stadium der Rohproduktion ... zum Endkunden (transportieren)."
Stadtler (2002), S. 7	"... a supply chain consists of two or more legally separated organizations, being linked by material, information and financial flows."
Günther/Tempelmeier (2003), S. 309	"Unter einer Supply Chain versteht man alle Wertsteigerungsstufen, die ein Produkt auf dem Weg vom Rohstoff bis zum Endverbraucher durchläuft."
Beckmann (2004), S. 2	"Die Supply Chain repräsentiert den Fluss von Leistungsobjekten durch ein Netzwerk von Wertschöpfungspartnern, das sich vom Rohstofflieferanten bis zum Endverbraucher erstreckt."
Chopra/Meindl (2004), S. 4	"A supply chain consists of all parties involved, directly or indirectly, in fulfilling a customer request."

**Tabelle 2.1: Ausgewählte Definitionen des Begriffs Supply Chain**

- <sup>1</sup> Vgl. Beckmann (2004), S. 1; Knolmayer/Mertens/Zeier (2000), S. 2; Zäpfel/Piekarz (1996), S. 12.  
<sup>2</sup> Vgl. Günther/Tempelmeier (2003), S. 9; Steven/Krüger/Tengler (2000), S. 15; Thorn (2002), S. 12.  
<sup>3</sup> Vgl. Corsten/Gössinger (2001), S. 81; Pföhl (2004), S. 20.  
<sup>4</sup> Vgl. Busch/Dangelmaier (2004), S. 4; Kaluza/Dullnig/Malle (2003), S. 6.

Die verschiedenen in Tabelle 2.1 dargestellten Definitionen des Begriffs Supply Chain veranschaulichen die wesentlichen Charakteristika einer Supply Chain. So kann festgestellt werden, dass eine Supply Chain mindestens zwei rechtlich selbstständige Wertschöpfungspartner umfasst.<sup>5</sup> Darüber hinaus beinhalten viele der dargestellten Definitionen die Sicht auf alle Prozesse zwischen Rohstofflieferanten und Endkunden,<sup>6</sup> wobei neben den Prozessen in Richtung der Wertsteigerung auch Rückflüsse zu beachten sind.<sup>7</sup> Des Weiteren sind neben den Materialflüssen ebenfalls Informations- und Finanzflüsse der Supply Chain zuzurechnen.<sup>8</sup> Zahlreiche Autoren betonen, dass eine Supply Chain häufig keine serielle Kette ist, die auf jeder Ebene lediglich einen Standort umfasst und beim Zulieferer beginnt und beim Kunden endet.<sup>9</sup> Vielmehr handelt es sich um ein umfassendes Netzwerk, das konvergierende und divergierende Materialflüsse sowie Rückflüsse beinhalten kann.<sup>10</sup> Zusammenfassend kann der Begriff der Supply Chain wie folgt definiert werden:

Eine Supply Chain ist ein Netzwerk von mindestens zwei rechtlich selbstständigen Unternehmungen, das sich unter Einbeziehung der Material-, Informations- und Finanzflüsse vom Rohstofflieferanten bis zum Endproduktkunden erstreckt.

Neben dieser unternehmensübergreifenden Sicht einer Supply Chain, die durch die geforderten mindestens zwei rechtlich selbstständigen Unternehmungen dieser Definition betont wird, kann es innerbetriebliche Supply Chains geben, die dann auf die Perspektive einer rechtlich selbstständigen Unternehmung mit mehreren Standorten ausgerichtet sind.<sup>11</sup> Ein Beispiel für eine dreistufige Supply Chain ist exemplarisch in Abbildung 2.1 dargestellt. Als Ebenen werden die Zulieferer, die Produktionsstandorte, die Lager und die Kunden betrachtet, so dass der Materialfluss vom Zulieferer bis zum Endkunden in drei Stufen erfolgt. Beliebig viele weitere Strukturen für eine Supply Chain sind denkbar. So können beispielsweise Zulieferer von Zulieferern oder eine weitere Ebene von Produktionsstandorten oder Warenverteilzentren die Struktur in Abbildung 2.1 ergänzen.<sup>12</sup> Materialflüsse zwischen den Standorten einer Ebene sind zwischen den Produktionsstandorten 1 und 2 sowie 2 und 3 angedeutet. Rückflüsse,

<sup>5</sup> Vgl. Beckmann (2004), S. 2; Chopra/Meindl (2004), S. 4; Mentzer et al. (2001), S. 4; Stadler (2002), S. 7.

<sup>6</sup> Vgl. Ayers (2000), S. 4; Beckmann (2004), S. 2; Günther/Tempelmeier (2003), S. 309; Handfield/Nichols (1999), S. 2; Mentzer et al. (2001), S. 4; Otto/Kotzab (2001), S. 160.

<sup>7</sup> Vgl. Mentzer et al. (2001), S. 4.

<sup>8</sup> Vgl. Stadler (2002), S. 7. Handfield/Nichols (1999), S. 2 beziehen neben den Materialflüssen lediglich die Informationsflüsse ein. Mentzer et al. (2001), S. 4 erwähnen neben Material-, Informations- und Finanzflüssen die Dienstleistungsflüsse, Ayers (2000), S. 4 darüber hinaus noch den Wissensfluss.

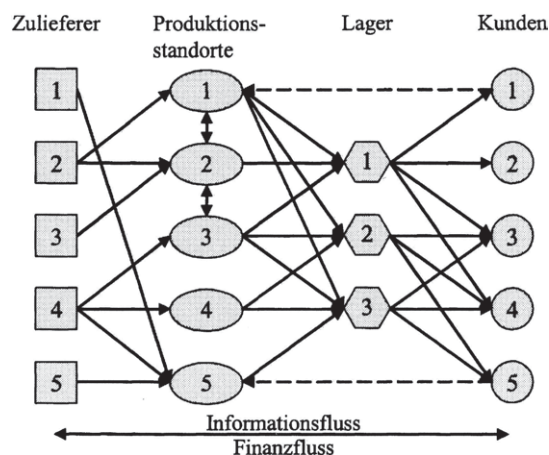
<sup>9</sup> Vgl. Chopra/Meindl (2004), S. 5; Günther/Tempelmeier (2003), S. 309; Krüger/Steven (2000), S. 503.

<sup>10</sup> Vgl. Stadler (2002), S. 7f.

<sup>11</sup> Vgl. Knolmayer/Mertens/Zeier (2000), S. 1f.; Werner (2000), S. 5f. unterscheidet die unternehmensinterne und die unternehmensintegrierte Supply Chain. Krüger/Steven (2000), S. 505 unterscheiden während der Diskussion von Verzögerungsstrategien die unternehmensinterne Supply Chain und die überbetriebliche Verzögerungsstrategie.

<sup>12</sup> Vgl. zu verschiedenen Supply Chains etwa Fleischmann/Meyr (2003), 463ff.

die durch einen Materialfluss entgegen dem eigentlichen Wertschöpfungsprozess charakterisiert sind, werden exemplarisch durch die gestrichelten Pfeile von Kunde 1 zu Produktionsstandort 1 und von Kunde 5 zu Produktionsstandort 5 dargestellt. Diese entgegengerichteten Materialflüsse können aus der Entsorgung von Rückständen, aus Retouren oder aus der Verwendung von Mehrwegverpackungen resultieren und sind im Rahmen des Supply Chain Management ebenfalls zu planen.<sup>13</sup> Der Informationsfluss kann dem Materialfluss entgegengerichtet sein, wenn es sich etwa um Informationen hinsichtlich der vom Endkunden bestellten Produkte handelt.<sup>14</sup> Andernfalls verläuft der Informationsfluss parallel zum Materialfluss, wenn es sich beispielsweise um Informationen über den Lieferstatus handelt.<sup>15</sup> Der Finanzfluss ist zunächst dem Materialfluss entgegengerichtet, wenn beispielsweise die Bezahlung der gelieferten Produkte erfolgt.<sup>16</sup> Mit Materialflüssen entgegen dem eigentlichen Wertschöpfungsprozess können ebenfalls Finanzflüsse verbunden sein, die den gerade beschriebenen Finanzflüssen entgegengerichtet sind.



**Abbildung 2.1: Struktur einer dreistufigen Supply Chain**

Bei einer unternehmungsübergreifenden Supply Chain sind etwa die verschiedenen in Abbildung 2.1 dargestellten Zulieferer rechtlich selbstständige Unternehmungen, während beispielsweise die Produktionsstätten zu einer Unternehmung gehören und die Lager wiederum zu einer weiteren Unternehmung. Im Gegensatz dazu sind bei einer innerbetrieblichen Supply Chain alle betrachteten Standorte, hier Zulieferer, Produktionsstandorte und Lager, einer rechtlich selbstständigen Unternehmung zuzuordnen.

<sup>13</sup> Vgl. Steven/Tengler/Krüger (2003a); Steven/Tengler/Krüger (2003b).

<sup>14</sup> Vgl. hierzu die Ausführungen zum Bullwhip-Effekt in Abschnitt 2.1.2.

<sup>15</sup> Vgl. Steven/Krüger/Tengler (2000), S. 15f.

<sup>16</sup> Vgl. Corsten/Gössinger (2001), S. 127.

Ausgehend von diesem Verständnis einer Supply Chain ist im Folgenden der Begriff des Supply Chain Management zu erläutern. Ähnlich wie bei dem Begriff der Supply Chain existieren in der Literatur eine Vielzahl uneinheitlicher Definitionen des Begriffs Supply Chain Management.<sup>17</sup> Göpfert und Seuring zeigen zwei unterschiedliche Zielrichtungen von Definitionen zum Begriff Supply Chain Management auf, die einerseits in engem Zusammenhang zu dem Begriff der Logistik stehen und andererseits den Prozess- bzw. Beziehungsgedanken in den Vordergrund stellen.<sup>18</sup>

Bei den in Tabelle 2.2 aufgeführten Definitionen weist besonders die Definition von Simchi-Levi, Kaminsky und Simchi-Levi einen eindeutigen Bezug zur Logistik auf, bei der die Überbrückung räumlicher, zeitlicher und mengenmäßiger Differenzen im Vordergrund steht.<sup>19</sup> Ein Teil der Definitionen erweitert die für die Logistik typischen Material- und Informationsflüsse<sup>20</sup> um Finanzflüsse.<sup>21</sup> Die Aufgaben des Supply Chain Management, die Gegenstand des folgenden Abschnitts sind, werden bereits in einigen Definitionen in Form der Gestaltung, Lenkung und Entwicklung der Supply Chain integriert,<sup>22</sup> während andere Definitionen allgemein vom Management der Beziehungen der an der Supply Chain beteiligten Partner sprechen.<sup>23</sup> Bei vielen Definitionen zeigt sich, dass insbesondere die Integration der unternehmungsübergreifenden Prozesse Aufgabe des Supply Chain Management ist,<sup>24</sup> die auch durch die Betonung der unternehmungsübergreifenden Betrachtungen oder aller Wertschöpfungsstufen ausgedrückt wird.<sup>25</sup> Hinsichtlich der in den Definitionen angesprochenen Ziele des Supply Chain Management, die ebenfalls Gegenstand des folgenden Abschnitts sind, wird ganz allgemein von unternehmungsübergreifenden Erfolgspotenzialen<sup>26</sup> und nachhaltigen Wettbewerbsvorteilen<sup>27</sup> oder detaillierter von Kosteneinsparungen<sup>28</sup> und Erfüllung der Kundenbedürfnisse<sup>29</sup> gesprochen.

<sup>17</sup> Vgl. Bechtel/Jayaram (1997), S. 16ff.; Croom/Romano/Giannakis (2000), S. 69; Kotzab/Skjoldager/Vinum (2003), S. 347ff.; Pfohl (2000), S. 5f.; Tan (2001), S. 39f.

<sup>18</sup> Vgl. Göpfert (2004), S. 28ff.; Seuring (2000), S. 324f.

<sup>19</sup> Vgl. Simchi-Levi/Kaminski/Simchi-Levi (2003), S. 1. Für eine Definition von Logistik, bei der die Überbrückung räumlicher, zeitlicher und mengenmäßiger Differenzen im Vordergrund steht, vgl. etwa Günther/Tempelmeier (2002), S. 9. Für einen überblicksartigen Vergleich von Logistik und Supply Chain Management vgl. Kotzab (2000), S. 32ff.

<sup>20</sup> Vgl. etwa Günther/Tempelmeier (2003), S. 9.

<sup>21</sup> Vgl. Göpfert (2004), S. 32; Kuhn/Hellingrath (2002), S. 10; Stadtler (2002), S. 9; Werner (2000), S. 5. van Weele (2002), S. 17 erwähnt neben den Finanzflüssen den Wissensfluss. Die Definition von Chopra/Meindl (2004), S. 6 beinhaltet den allgemeinen Begriff „flows“, es wird jedoch im Text erläutert, dass es sich um Material-, Informations- und Finanzflüsse handelt.

<sup>22</sup> Vgl. Ayers (2000), S. 7; Beckmann (2004), S. 3; Göpfert (2004), S. 32.

<sup>23</sup> Christopher (1998), S. 18; Handfield/Nichols (1999), S. 2.

<sup>24</sup> Vgl. Cooper/Lambert/Pagh (1997), S. 2; Friedrich (2004), S. 146f.; Handfield/Nichols (1999), S. 2; Werner (2000), S. 5.

<sup>25</sup> Vgl. Beckmann (2004), S. 3; Göpfert (2004), S. 32; Krüger/Steven (2000), S. 503.

<sup>26</sup> Vgl. Göpfert (2004), S. 32.

<sup>27</sup> Vgl. Handfield/Nichols (1999), S. 2.

<sup>28</sup> Vgl. Christopher (1998), S. 18.

<sup>29</sup> Vgl. Ayers (2000), S. 7; Stadtler (2002), S. 9; van Weele (2002), S. 17.



Quelle	Definition
Cooper/Lambert/Pagh (1997), S. 2	"The integration of business processes across the supply chain is what we are calling supply chain management"
Christopher (1998), S. 18	"The management of upstream and downstream relationships with suppliers and customers to deliver superior customer value at less cost to the supply chain as whole."
Handfield/Nichols (1999), S. 2	"Supply Chain Management is the integration of these activities through improved supply chain relationships, to achieve a sustainable competitive advantage."
Ayers (2000), S. 7	"Design, maintenance, and operation of supply chain processes for satisfaction of end user needs."
Krüger/Steven (2000), S. 503	"Somit kann unter Supply Chain Management das Management der Leistungserstellung in netzwerkartigen Strukturen über alle Wertschöpfungsstufen hinweg verstanden werden."
Werner (2000), S. 5	"Das Supply Chain Management kennzeichnet die integrierten Unternehmungsaktivitäten von Versorgung, Entsorgung und Recycling, inklusive die sie begleitenden Geld- und Informationsflüsse."
Mentzer et al. (2001), S. 18	"...supply chain management is defined as the systemic, strategic coordination of of the traditional business functions and the tactics across these business functions within a particular company and across businesses within the supply chain, ..."
Kuhn/Hellingrath (2002), S. 10	"Supply Chain Management ist die integrierte, prozessorientierte Planung und Steuerung der Waren-, Informations- und Geldflüsse entlang der gesamten Wertschöpfungskette vom Kunden bis zum Rohstofflieferanten..."
Stadtler (2002), S. 9	"... Supply Chain Management (is) the task of integrating organizational units along a supply chain and coordinating materials, information and financial flows in order to fulfil (ultimate) customer demands ..."
van Weele (2002), S. 17	"... can be described as the management of all activities, information, knowledge and financial resources associated with the flow and transformation of goods and services up from the raw materials suppliers, ...in such a way that the expectations of the end users of the company are being met or surpassed."
Simchi-Levi/Kaminsky/Simchi-Levi (2003), S. 1	"Supply chain management is a set of approaches utilized to efficiently integrate suppliers, manufacturers, warehouses and stores, so that merchandise is produced and distributed at the right quantities, to the right locations, and the right time ..."
Beckmann (2004), S. 3	"Gestaltung, Lenkung und Entwicklung der Supply Chain über alle Wertschöpfungsstufen von der Rohstoffgewinnung bis hin zu Serviceleistungen beim Endverbraucher ..."
Chopra/Meindl (2004), S. 6	"Supply Chain Management involves the management of flows between and among stages in a supply chain ..."
Friedrich (2004), S. 146f.	"... unter SCM (soll) die Integration aller Kerngeschäftsprozesse entlang der Supply Chain, deren ganzheitliche Analyse und die übergreifende Planung dieser Prozesse verstanden werden."
Göpfert (2004), S. 32	"Das Supply Chain Management bildet eine moderne Konzeption für Unternehmensnetzwerke zur Erschließung unternehmungsübergreifender Erfolgspotenziale mittels der Entwicklung, Gestaltung und Lenkung effektiver und effizienter Güter-, Informations- und Geldflüsse."

**Tabelle 2.2: Ausgewählte Definitionen des Begriffs Supply Chain Management**

Eine allgemeine weit gefasste Definition, die die wesentlichen angesprochenen Aspekte beinhaltet und sich darüber hinaus an den Managementfunktionen<sup>30</sup> orientiert, kann dann wie folgt lauten:

Supply Chain Management umfasst die integrierte Planung, Steuerung und Kontrolle der Supply Chain zur Erschließung unternehmungsübergreifender Erfolgspotenziale.

Dabei geht aus der Definition des Begriffs Supply Chain des vorherigen Abschnitts hervor, dass sich die integrierte Planung, Steuerung und Kontrolle auf die Material-, Informations- und Finanzflüsse vom Rohstofflieferanten bis zum Endproduktkunden erstreckt und darüber hinaus mindestens zwei rechtlich selbstständige Unternehmungen an diesem Netzwerk beteiligt sind. Die verschiedenen Aufgaben des Supply Chain Management, die Bestandteil der integrierten Planung, Steuerung und Kontrolle sind, werden im folgenden Abschnitt betrachtet. Darüber hinaus wird die Erschließung unternehmungsübergreifender Erfolgspotenziale als übergeordnete Zielsetzung des Supply Chain Management operationalisiert.

### 2.1.2 Ziele und Aufgaben des Supply Chain Management

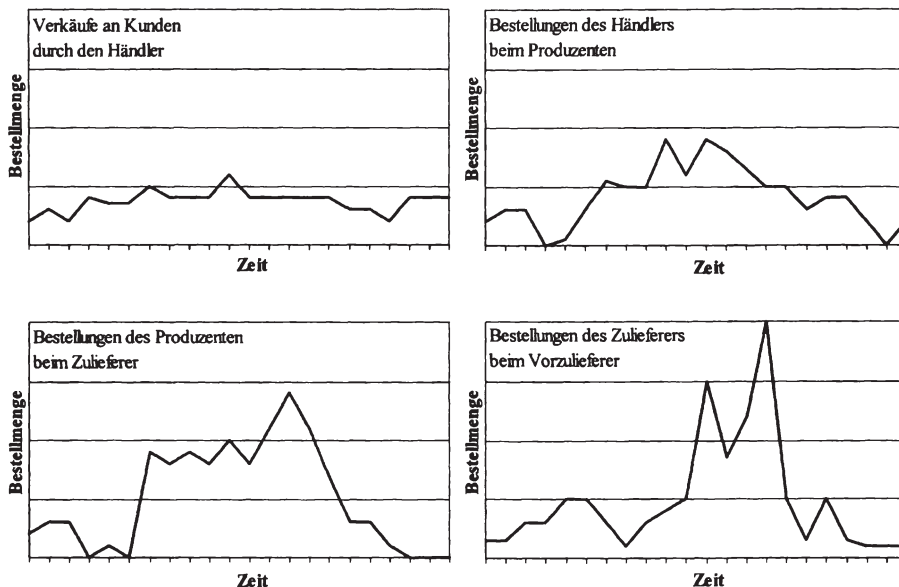
Bevor eine detaillierte Betrachtung der Aufgaben des Supply Chain Management hinsichtlich der integrierten Planung, Steuerung und Kontrolle der Supply Chain durchgeführt werden kann, sind zunächst die mit dem Supply Chain Management verfolgten Ziele zu erläutern. Das im vorherigen Abschnitt aufgezeigte Fundamentalziel der Erschließung unternehmungsübergreifender Erfolgspotenziale ist dafür in Instrumentalziele zu zerlegen.<sup>31</sup> Ein Ziel, das mit dem Supply Chain Management verfolgt wird, ist die Vermeidung des Bullwhip-Effektes, ebenfalls bekannt als Forrester-Effekt oder Peitschenschlageffekt.<sup>32</sup> Der Bullwhip-Effekt beschreibt die Verstärkungen der Bestellmengen, die auftreten, wenn jedem Teilnehmer der Supply Chain lediglich die Nachfrage des unmittelbaren Vorgängers bekannt ist.<sup>33</sup> Eine Visualisierung des Bullwhip-Effektes ist exemplarisch in Abbildung 2.2 dargestellt.

<sup>30</sup> Die Managementfunktionen umfassen Planung, Organisation, Leitung, Koordination und Kontrolle, wobei Organisation, Leitung und Koordination hier unter Steuerung zusammengefasst werden. Vgl. zu diesen und weiteren Managementfunktionen etwa Staehle (1999), S. 81ff.; Steinmann/Schreyögg (2000), S. 8ff.; Wolf (2003), S. 82ff.

<sup>31</sup> Ein Fundamentalziel wird um seiner selbst verfolgt. Ein Instrumentalziel wird verfolgt, weil eine positive Wirkung auf das Fundamentalziel vermutet wird. Vgl. etwa Eisenführ/Weber (2003), S. 56ff.

<sup>32</sup> Vgl. Corsten/Gössinger (2001), S. 85f.; Göpfert (2004), S. 33; Sucky (2004), S. 21f. und für die Ursprungsquelle Forrester (1958).

<sup>33</sup> Vgl. etwa Corsten/Gössinger (2001), S. 86.



**Abbildung 2.2: Visualisierung des Bullwhip-Effektes**  
(Quelle: In Anlehnung an Lee/Padmanabhan/Whang (1997), S. 80.)

Wie in Abbildung 2.2 dargestellt, verstärken sich die Schwankungen der Bestellmengen, je weiter vom Endproduktkunden entfernt die Bestellung ausgelöst wird. Relativ kleine Veränderungen der Nachfragen der Kunden schaukeln sich ausgehend vom Kunden bis zum ersten Zulieferer immer weiter auf und führen somit zu hohen Lagerbeständen und Fehlmengen und verschlechtern die Planbarkeit in einer Supply Chain.<sup>34</sup> Für den Bullwhip-Effekt sind im Wesentlichen vier Ursachen zu nennen:<sup>35</sup>

- Verschiedene Bedarfsvorhersagen
- Zusammenfassungen des Bedarfes zu optimalen Bestellmengen
- Preisfluktuationen
- Antizipierte Lieferkürzungen

Verschiedene Bedarfsvorhersagen, die nicht abgestimmt werden, indem allen Partnern der Supply Chain die Informationen über die Nachfragen der Endproduktkunden zugänglich gemacht werden, führen durch erhöhte Sicherheitsbestände und falsch

<sup>34</sup> Vgl. etwa Knolmayer/Mertens/Zeier (2000), S. 7.

<sup>35</sup> Vgl. Beckmann (2004), S. 8f.; Langemann (2004), S. 438f.; Lee/Padmanabhan/Whang (1997), S. 80ff. Simchi-Levi/Kaminsky/Simchi-Levi (2003), S. 103f. erwähnen darüber hinaus die Lieferzeit. Je länger die Lieferzeit, desto größer der Bullwhip-Effekt.

interpretierte Informationen zum Bullwhip-Effekt.<sup>36</sup> Darüber hinaus kann die Zusammenfassung von Bestellungen zur Verminderung fixer Bestellkosten, beispielsweise bei relativ hohen Transportkosten oder bei Mengenrabatten, zu einer erschwerten Nachfrageprognose führen, da die Bestellmengen groß sind und unregelmäßig auftreten.<sup>37</sup> Der Bullwhip-Effekt kann des Weiteren durch Preisfluktuationen verstärkt werden, indem große Mengen bei niedrigen Preisen gekauft und für die Zukunft gelagert werden, so dass sich das Einkaufsverhalten nicht an dem der Endproduktabnehmer orientiert und dementsprechend auf den nachfolgenden Ebenen den Bullwhip-Effekt verstärken kann.<sup>38</sup> Wenn die bestellten Mengen die lieferbaren Mengen übersteigen, kommt es häufig zunächst zu Teillieferungen und späteren Restlieferungen. Falls dieses aus der Vergangenheit bekannte Verhalten des Zulieferers bereits bei der Bestellung berücksichtigt wird und folglich die bestellte Menge erhöht wird, verstärkt diese antizipierte Lieferkürzung den Bullwhip-Effekt.<sup>39</sup>

Folgen des Bullwhip-Effektes sind überhöhte Lagerbestände, zu geringe oder überschüssige Kapazitäten, schlechter Kundenservice auf Grund langer Lieferzeiten oder nicht erfüllter Nachfrage sowie kostenintensive Sonderaktionen wie Überstunden oder Eillieferungen.<sup>40</sup> Das Supply Chain Management als Konzept zur Verringerung bzw. Vermeidung des Bullwhip-Effektes hat somit die folgenden Zielsetzungen:<sup>41</sup>

- Kostenverringerungen
- Serviceverbesserungen

Alternativ können die weiter detaillierten Ziele des Supply Chain Management, die nicht nur als Instrumentalziele zur Verringerung des Bullwhip-Effektes, sondern ebenfalls zur Erschließung unternehmungsübergreifender Erfolgspotenziale dienen, anhand der Unterpunkte Kosten, Zeit und Qualität, wie in Abbildung 2.3 dargestellt, eingeordnet werden.<sup>42</sup>

<sup>36</sup> Vgl. Lee/Padmanabhan/Whang (1997), S. 80f.; Stadler (2002), S. 24.

<sup>37</sup> Vgl. Simchi-Levi/Kaminsky/Simchi-Levi (2003), S. 104; Stadler (2002), S. 24f.

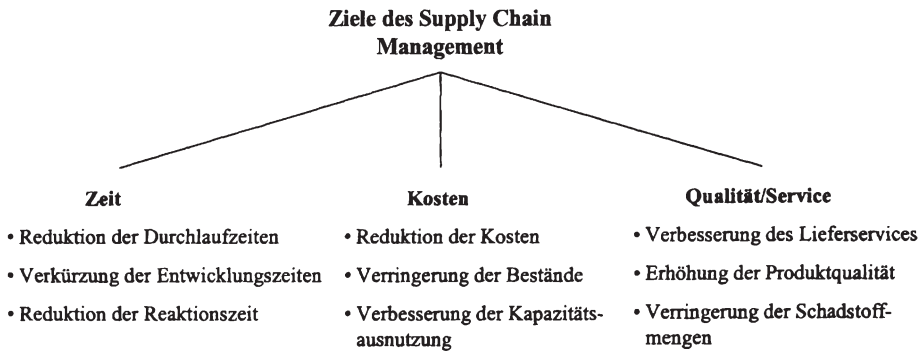
<sup>38</sup> Vgl. Lee/Padmanabhan/Whang (1997), S. 81f.; Simchi-Levi/Kaminsky/Simchi-Levi (2003), S. 104.

<sup>39</sup> Vgl. Lee/Padmanabhan/Whang (1997), S. 82f.; Simchi-Levi/Kaminsky/Simchi-Levi (2003), S. 104; Stadler (2002), S. 25.

<sup>40</sup> Vgl. Chopra/Meindl (2004), S. 480f.; Lee/Padmanabhan/Whang (1997), S. 79.

<sup>41</sup> Vgl. Beckmann (2004), S. 12; Corsten/Gössinger (2001), S. 95; Mentzer et al. (2001), S. 15; Simchi-Levi/Kaminsky/Simchi-Levi (2003), S. 7; Stölzle (1999), S. 164. Kistner/Steven (2001), S. 333 und Shapiro (2001), S. 8f. sehen in der Minimierung der Kosten das wichtigste Ziel des Supply Chain Management. Stadler (2002), S. 8 fordert die Minimierung der Kosten für ein festgelegtes, allgemein akzeptiertes Service-niveau.

<sup>42</sup> Vgl. Busch/Dangelmaier (2004), S. 8f.; Hahn (2000), S. 13; Weber/Dehler/Wertz (2000), S. 265f.



**Abbildung 2.3: Ziele des Supply Chain Management**

### *Qualität/Service*

Die Verbesserung des Kundenservices als Ziel des Supply Chain Management umfasst die Erhöhung der Lieferbereitschaft und damit verbunden die Vermeidung von „Out-Of-Stock“-Situationen und folglich die Verbesserung des Lieferservices durch bedarfsgerechte Anlieferung.<sup>43</sup> Ein weiteres Ziel des Supply Chain Management betrifft die Erhöhung des Kundennutzens, beispielsweise operationalisiert durch die Erhöhung der Produktqualität. Qualitätsvorteile können im Rahmen der Zusammenarbeit der verschiedenen an der Wertschöpfung beteiligten Unternehmungen der Supply Chain realisiert werden, indem ein abgestimmtes und durchgängiges Vorgehen der Qualitätsplanung, -lenkung und -prüfung zu einer verbesserten Produktqualität führt.<sup>44</sup> Darüber hinaus kann die Verringerung der Schadstoffmengen, einerseits während der Produktion und andererseits während der Entsorgung der Produkte, ein weiteres Instrumentalziel des Supply Chain Management zur Erschließung unternehmungsübergreifender Erfolgspotenziale sein.<sup>45</sup>

### *Zeit*

Die Zeit als ein Ziel des Supply Chain Management kann ein entscheidender Vorteil gegenüber Wettbewerbern sein, etwa wenn die Auftragserfüllung schneller als bei anderen Wettbewerbern ist.<sup>46</sup> Ziele des Supply Chain Management, die die Zeit betreffen, umfassen folglich die Reduktion der Durchlaufzeiten und damit eine schnellere Auftragserfüllung sowie schnelle Anpassungen an Änderungen des Marktes, etwa

<sup>43</sup> Vgl. Vahrenkamp (2003), S. 2; Zäpfel/Piekarz (1996), S. 16.

<sup>44</sup> Vgl. Dangelmeier/Pape/Rüther (2004), S. 10.

<sup>45</sup> Vgl. Jehle (2000), S. 216f.

<sup>46</sup> Vgl. Handfield/Nichols (1999), S. 53ff.

durch verkürzte Produkt- oder Prozessentwicklungszeiten.<sup>47</sup> Eine weitere zeitliche Zielsetzung des Supply Chain Management ist die Reaktionszeit. Die häufig mit einer Planung verbundenen Soll-Ist-Abweichungen können frühzeitig identifiziert werden und ermöglichen auf diese Weise die rechtzeitige Aufdeckung von Engpässen, Störungen oder zusätzlichen Zeitpuffern sowie die Ergreifung von Maßnahmen zur Vermeidung oder Nutzung dieser Effekte.<sup>48</sup>

### *Kosten*

Die Maximierung des Gewinns steht als Ziel einer Unternehmung in empirischen Befragungen häufig an erster Stelle.<sup>49</sup> Da jedoch nicht alle in einer Unternehmung bzw. einer Supply Chain anfallenden Kosten die verschiedenen jeweiligen Entscheidungen beeinflussen, ist der Gewinnmaximierung eine Maximierung des Deckungsbeitrags vorzuziehen, der den Betrag kennzeichnet, den eine Handlungsalternative zur Deckung ohnehin anfallender, d. h. nicht von der Entscheidung betroffener Kosten, beiträgt.<sup>50</sup> Bei konstanten Erlösen, denen die Annahme zu Grunde liegt, dass die geplante und die tatsächlich realisierte Nachfrage hinsichtlich Preis und Menge übereinstimmen, entspricht das Ziel der Deckungsbeitragsmaximierung dem Ziel der Kostenminimierung.<sup>51</sup> Die Kostenminimierung kann durch die Reduktion von Lagerbeständen oder durch verbesserte Ressourcennutzung und damit durch eine verbesserte Planung der gesamten Supply Chain erreicht werden.<sup>52</sup> Darüber hinaus können Kostensenkungspotenziale etwa auch Materialkosten, Fertigungskosten, Transportkosten, Investitionskosten oder Produktentwicklungskosten umfassen.<sup>53</sup>

Nach dieser Erläuterung verschiedener Zielsetzungen des Supply Chain Management werden nun die Aufgaben des Supply Chain Management vorgestellt und anhand des Planungshorizonts in operative, taktische und strategische Planungsaufgaben unterteilt. Die verschiedenen Planungsaufgaben können, wie in Abbildung 2.4 dargestellt, mit Hilfe der Supply Chain Planning-Matrix strukturiert werden.

<sup>47</sup> Vgl. Dangelmeier/Pape/Rüther (2004), S. 9; Vahrenkamp (2003), S. 2; Walther (2001), S. 14.

<sup>48</sup> Dieses Vorgehen bezeichnen Steven/Krüger (2004a) als Supply Chain Event Management.

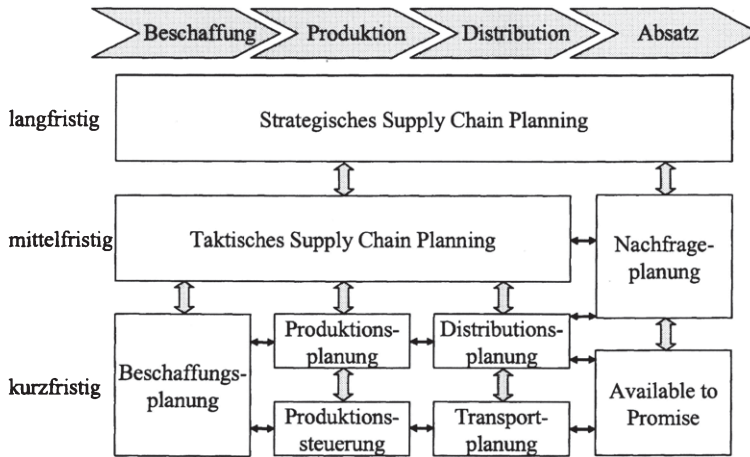
<sup>49</sup> Vgl. Horváth (2001), S. 147f.; Welge/Al-Laham (2003), S. 182f.

<sup>50</sup> Vgl. etwa Hummel/Männel (1995), S. 50; Weber (2004), S. 389. Für verschiedene Arten von Deckungsbeiträgen vgl. etwa Macha (2003), S. 180ff.; Weber (2004), S. 210ff.

<sup>51</sup> Vgl. Shapiro (2001), S. 8.

<sup>52</sup> Vgl. Kodweiss/Nadjmabadi (2001), S. 72.

<sup>53</sup> Vgl. Shapiro (2001), S. 8; Stölzle (1999), S. 164.



**Abbildung 2.4: Supply Chain Planning-Matrix**

(Quelle: In Anlehnung an Corsten/Gössinger (2001), S. 157; Thorn (2002), S. 56.)

Die Supply Chain Planning-Matrix charakterisiert die Planungsprozesse des Supply Chain Management anhand des Planungshorizonts und der betrieblichen Funktionsbereiche.<sup>54</sup> Dabei umfasst die langfristige Planung alle Funktionsbereiche und wird als strategisches Supply Chain Planning bezeichnet. Die mittelfristige Planung beinhaltet das taktische Supply Chain Planning und die Nachfrageplanung. Auf der kurzfristigen, operativen Ebene kann zwischen Planung und Steuerung der Beschaffung, der Produktion und der Distribution unterschieden werden. Darüber hinaus ist der operativen Ebene Available to Promise zugeordnet, was die konkrete Festlegung von Lieferterminen und deren Einhaltung umfasst. Insgesamt zeigt sich, dass die im Supply Chain Management zu betrachtenden Planungsprobleme in einzelne Teilprobleme zerlegt werden, die über geeignete Schnittstellen miteinander verbunden sind.<sup>55</sup> Die Einteilung in lang-, mittel- und kurzfristige Planungsaufgaben des Supply Chain Management wird ebenfalls durch die folgende Dreiteilung erfasst.<sup>56</sup>

- Supply Chain Configuration
- Supply Chain Planning
- Supply Chain Execution

<sup>54</sup> Vgl. Fleischmann/Meyr/Wagner (2002), S. 76f.; Rohde/Meyr/Wagner (2000), S. 10.

<sup>55</sup> Vgl. Kistner/Steven (2001), S. 337.

<sup>56</sup> Vgl. Busch/Dangelmaier (2004), S. 7; Dangelmaier/Pape/Rüther (2004), S. 8; Kistner/Steven (2001), S. 335ff.; Walther (2001), S. 12. Chopra/Meindl (2004), S. 7 unterscheiden „supply chain strategy or design“, „supply chain planning“ und „supply chain operation“. Harrison (2001), S. 413; Swaminathan/Tayur (2003), S. 1388 unterscheiden „supply chain design“ und „supply chain execution“. Zäpfel/Piekarz (1996), S. 13 bezeichnen dies als Gestaltungs- und Lenkungsaufgaben.

Supply Chain Execution als Begriff für die Steuerung und Kontrolle der Prozesse auf der operativen Ebene hat einen Planungshorizont von einigen Wochen oder Tagen und umfasst die Abwicklung der konkreten Kundenaufträge.<sup>57</sup> Dies beinhaltet etwa die Reihenfolge der Auftragseinlastung, die Reihenfolge der Beladung der LKW sowie die Festlegung der Touren und Routen.<sup>58</sup>

Die taktische Ebene hat einen Planungshorizont von etwa einem Jahr oder zumindest einigen Monaten<sup>59</sup> und umfasst das Supply Chain Planning und die Nachfrageplanung. Dazu gehören die mittelfristige Planung des Bedarfs, der Bestände, der Produktion, der Distribution sowie der Transporte, der Transportmittel und der Standorte der Distributionslager.<sup>60</sup>

Supply Chain Configuration mit langfristigem, strategischem Planungshorizont von mehreren Jahren<sup>61</sup> beinhaltet die Planung und Konfiguration des Netzwerks.<sup>62</sup> Dies umfasst beispielsweise die Auswahl der beteiligten Kooperationspartner sowie die Standort- und Kapazitätsplanung.<sup>63</sup> Die Konfiguration der Supply Chain bildet die Grundlage aller weiteren Planungsaufgaben und entspricht dem Supply Chain Design, was Gegenstand des folgenden Abschnitts ist.

## 2.2 Supply Chain Design als strategisches Supply Chain Management

### 2.2.1 Der Begriff des Supply Chain Design

Wie sich in den vorherigen Abschnitten gezeigt hat, sind die Begriffe Supply Chain und Supply Chain Management in der Literatur nicht einheitlich definiert. Ähnliches kann, wie im Folgenden zu zeigen ist, bei dem Begriff Supply Chain Design beobachtet werden. Viele Autoren benutzen den Begriff Supply Chain Design, ohne den weitergehenden Erläuterungen eine Begriffsdefinition voranzustellen.<sup>64</sup> Darüber hinaus zeigt sich, dass für gleiche oder ähnliche Aufgabenstellungen, die der Konfiguration der Supply Chain zugeordnet werden können, unterschiedliche Begriffe verwendet werden. Einen Überblick über diese verschiedenen Begriffe mit den zugehörigen Definitionen gibt Tabelle 2.3:

<sup>57</sup> Vgl. Chopra/Meindl (2004), S. 7.

<sup>58</sup> Vgl. Simchi-Levi/Kaminsky/Simchi-Levi (2003), S. 9.

<sup>59</sup> Vgl. Chopra/Meindl (2004), S. 7; Lee et al. (2002), S. 379.

<sup>60</sup> Vgl. Thorn (2002), S. 26f.

<sup>61</sup> Vgl. Chopra/Meindl (2004), S. 7; Lee et al. (2002), S. 379.

<sup>62</sup> Vgl. Kistner/Steven (2001), S. 335.

<sup>63</sup> Vgl. Steven/Krüger/Tengler (2000), S. 17; Walther (2001), S. 12.

<sup>64</sup> Vgl. etwa Gabriel (2003); Hwang (2002); Korpela et al. (2002); Sabri/Beamon (2000).



Quelle	Definition
Ballou (2001), S. 418	"... the (supply chain) network design problem is one of configuring the nodal points on a product flow network that range from the sources of raw material to the points of final consumption."
Harrison (2001), S. 413	"Supply chain design is the process of determining the supply chain infrastructure - the plants, distribution centers, transportation modes and lanes, production processes, etc. that will be used to satisfy customer demands."
Kistner/Steven (2001), S. 335	"Im Mittelpunkt der Supply Chain Configuration steht die strategisch ausgerichtete Planung und Konfiguration der dem Netzwerk zugrunde liegenden Netzwerkstruktur."
Shapiro (2001), S. 294	"Supply Chain Design refers to decisions regarding the facilities owned and operated by the company and the company's relationship with its suppliers."
Walther (2001), S. 12	"Die Konfiguration integrierter Lieferketten bezieht sich auf ... die Modellierung und Optimierung spezifischer Lieferketten in bezug auf die beteiligten Kooperationspartner sowie deren Standorte und Kapazitäten ..."
Persson/Olhager (2002), S. 231	"By supply chain design we mean the structure of the chain, i.e. the sequential links between different sourcing, production and distribution activities or processes."
Talluri/Baker (2002), S. 545	"... SCN design involves the identification of an effective combination of suppliers, producers, and distributors that provide the right mix and quantity of products and services to customers."
Yan/Yu/Cheng (2003), S. 2135	"Supply chain design is to provide an optimal platform for efficient and effective supply chain management."
Chopra/Meindl (2004), S. 7	"Supply chain strategy or design: During this phase, a company decides how to structure the supply chain over the next several years."

**Tabelle 2.3: Definitionen des Begriffs Supply Chain Design**

Die Begriffserläuterungen in Tabelle 2.3 umfassen neben dem Begriff Supply Chain Design<sup>65</sup> die Begriffe Supply Chain Network Design<sup>66</sup> und Supply Chain Configuration<sup>67</sup> bzw. Konfiguration der Supply Chain. Alle Definitionen stehen im Zusammenhang mit der Struktur der Supply Chain, wobei die weitaus meisten Begriffserläuterungen auf den Prozess der Festlegung der Struktur abzielen. Lediglich Persson und Olhager verwenden den Begriff Supply Chain Design als die festzulegende Struktur selbst.<sup>68</sup> In den folgenden Kapiteln dieser Arbeit wird sowohl der Begriff Supply Chain Design als auch der Begriff Konfiguration einer Supply Chain für den Prozess der Planung der Struktur einer Supply Chain verwendet. Das Resultat des Supply Chain Design ist die Supply Chain. Da der Begriff der Kette (Chain) sich ebenfalls auf

<sup>65</sup> Vgl. Chopra/Meindl (2004), S. 7; Harrison (2001), S. 413; Persson/Olhager (2002), S. 231; Shapiro (2001), S. 294; Yan/Yu/Cheng (2003), S. 2135.

<sup>66</sup> Vgl. Ballou (2001), S. 418; Talluri/Baker (2002), S. 545.

<sup>67</sup> Vgl. Kistner/Steven (2001), S. 335; Walther (2001), S. 12.

<sup>68</sup> Vgl. Persson/Olhager (2002), S. 231.

ein Netzwerk bezieht,<sup>69</sup> kann der Begriff Supply Chain Network Design mit dem Begriff Supply Chain Design gleichgesetzt werden. In der deutschsprachigen Literatur ist eher der Begriff der Konfiguration der Supply Chain gebräuchlich,<sup>70</sup> wohingegen in der englischsprachigen Literatur der Begriff Supply Chain Design gängig ist.<sup>71</sup> Zielsetzung des Prozesses Supply Chain Design ist eine möglichst optimale Supply Chain,<sup>72</sup> die ein effektives und effizientes Supply Chain Management ermöglicht.<sup>73</sup> Gemäß dieser Sichtweise ist das Supply Chain Design dem Supply Chain Management vorgelagert, was die Bedeutung des Supply Chain Design betont. Da es sich bei dem Prozess des Supply Chain Design jedoch ebenfalls um eine Planungsaufgabe handelt, ist eine Sichtweise, die das Supply Chain Design als Teil des Supply Chain Management betrachtet, insbesondere im Rahmen einer Neugestaltung einer bestehenden Supply Chain ebenfalls schlüssig. Des Weiteren wird das Supply Chain Design häufig mit dem strategischen Supply Chain Management gleichgesetzt und dementsprechend als ein Teil des Supply Chain Management gesehen.<sup>74</sup> In Anlehnung an diese Sichtweise wird der Begriff des Supply Chain Design wie folgt definiert:

Supply Chain Design ist der Prozess der Planung einer Supply Chain, die ein effektives und effizientes Supply Chain Planning und Supply Chain Execution gestattet.

Der Begriff der Planung einer Supply Chain beinhaltet nicht nur die Festlegung der räumlichen Struktur der Supply Chain, sondern die Gestaltung der Beziehungen zu den Kooperationspartnern bzw. zu den Zulieferern sind darüber hinaus ebenfalls Gegenstand des Supply Chain Design.<sup>75</sup> Als Vorläufer des Begriffs Supply Chain Design kann der Begriff Production-Distribution-Design bezeichnet werden, bei dem die Struktur des Produktions- und Distributionsnetzwerkes geplant wird.<sup>76</sup> Dies ist insbesondere auf die Ähnlichkeit der Planungsaufgaben zurückzuführen, die allerdings abweichend vom Supply Chain Design die Zulieferer nicht zwingend einbeziehen.<sup>77</sup>

Der folgende Abschnitt geht auf die verschiedenen Aufgaben ein, die mit der Festlegung der räumlichen Struktur einer Supply Chain verbunden sind. Zusätzlich

<sup>69</sup> Vgl. hierzu die Ausführungen zum Begriff der Supply Chain in Abschnitt 2.1.1.

<sup>70</sup> Vgl. etwa Kistner/Steven (2001), S. 335; Walther (2001), S. 12.

<sup>71</sup> Vgl. Chopra/Meindl (2004), S. 7; Harrison (2001), S. 413; Persson/Olhager (2002), S. 231; Shapiro (2001), S. 294; Yan/Yu/Cheng (2003), S. 2135.

<sup>72</sup> Vgl. Talluri/Baker (2002), S. 545; Walther (2001), S. 12.

<sup>73</sup> Vgl. Yan/Yu/Cheng (2003), S. 2135.

<sup>74</sup> Vgl. Busch/Dangelmaier (2004), S. 7; Kistner/Steven (2001), S. 335.

<sup>75</sup> Vgl. Shapiro (2001), S. 294; Walther (2001), S. 12.

<sup>76</sup> Vgl. etwa Brown et al. (1987); Dasci/Verter (2001); Erengüc/Simpson/Vakharia (1999). Vidal/Goetschalckx (1997), S. 2 bezeichnen Modelle zum Supply Chain Design als „strategic production-distribution models“ und beziehen die Ebene der Zulieferer ein.

<sup>77</sup> Vgl. Brown et al. (1987), S. 1469f. Dasci/Verter (2001) stellt zwar in einer Abbildung das „production-distribution system“ mit Zulieferern vor, berücksichtigt diese in dem vorgestellten Modell jedoch nicht.

werden verschiedene Ziele des Supply Chain Design diskutiert. Die Beziehungen der verschiedenen Partner einer Supply Chain sowie die Voraussetzungen einer integrierten Planung sind Gegenstand des Abschnitts 2.3.

### 2.2.2 Ziele und Aufgaben des Supply Chain Design

Ziel des Supply Chain Design ist die Bereitstellung einer effizienten und effektiven Supply Chain, auf deren Basis die Ziele des Supply Chain Management realisiert werden können.<sup>78</sup> Die in den vorherigen Abschnitten dargestellten Ziele des Supply Chain Management bilden folglich die Grundlage für die Ziele des Supply Chain Design. Zusammengefasst heißt dies, dass bei der Konfiguration einer Supply Chain Kosten, Zeit- und Qualitäts- bzw. Serviceaspekte relevant sind.<sup>79</sup> Darüber hinaus betonen einige Autoren explizit die Flexibilität als Zielsetzung des Supply Chain Design, wobei eine Detaillierung dieser allgemeinen Zielsetzung Flexibilität unterbleibt.<sup>80</sup> Auf Grund des langfristigen Planungshorizonts, der mit der strategischen Planung verbunden ist, sind Entscheidungen im Rahmen des Prozesses des Supply Chain Design Entscheidungen unter Unsicherheit.<sup>81</sup> Unter der Annahme, dass die Flexibilität gefordert wird, um auf verschiedene zukünftig mögliche Umweltzustände reagieren zu können, ist die Flexibilitätsforderung mit der Robustheitsforderung gleichzusetzen, bei der eine Supply Chain gewünscht wird, die für alle möglichen Umweltzustände „gut geeignet“ ist.<sup>82</sup> Diese Forderung nach einer robusten Supply Chain wird durch die langfristigen und hohen Investitionen, die mit der Errichtung einer Supply Chain verbunden sind, unterstrichen.

Die zu fertigenden Produkte können die Struktur der Supply Chain und die mit dem Supply Chain Design bevorzugt zu verfolgenden Zielsetzungen beeinflussen. Dabei sind in zwei extremen Formen Standardprodukte und kundenspezifisch gefertigte Produkte zu unterscheiden. Standardprodukte, die nicht an kundenindividuelle Anforderungen angepasst werden, führen zu einer prognosegetriebenen Supply Chain, wohingegen kundenspezifische Produkte, bei denen der individuelle Auftrag des Kunden im Vordergrund steht zu einer kundenauftragsgetriebenen Supply Chain führen.<sup>83</sup> Neben diesen extremen Formen sind eine Reihe weiterer Mischformen denkbar, die anhand des Order Penetration Point<sup>84</sup>, an denen prognosegetriebene und kundenauftragsge-

<sup>78</sup> Vgl. Chopra/Meindl (2004), S. 100f.; Talluri/Baker (2002), S. 544f.; Yan/Yu/Cheng (2003), S. 2135.

<sup>79</sup> Vgl. hierzu Abbildung 2.3 sowie die zugehörigen Erläuterungen.

<sup>80</sup> Vgl. Bloech/Bogaschewsky/Roland (2004), S. 362; Junginger/Lindemann/Karagiannis (2002), S. 40.

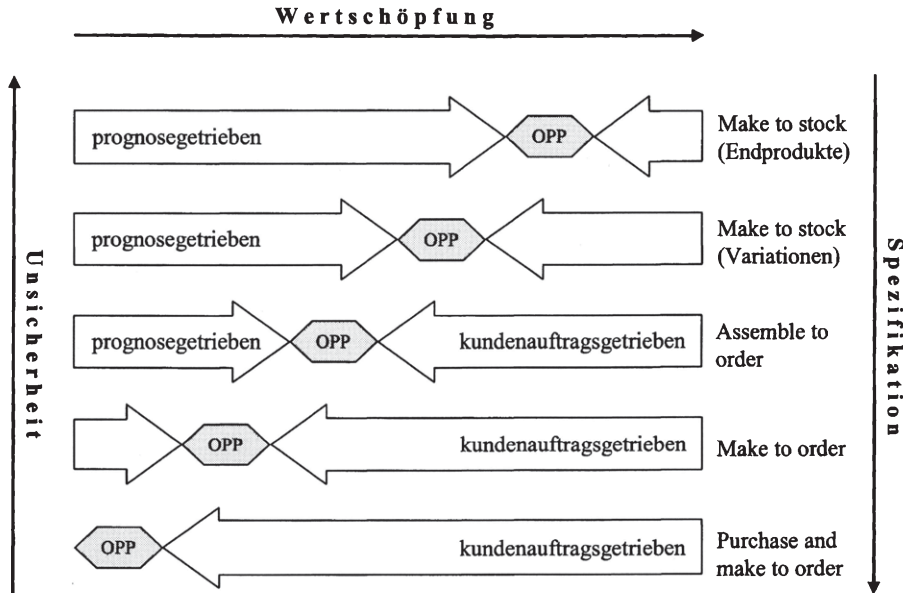
<sup>81</sup> Vgl. Harrison (2001), S. 414; Lee et al. (2002), S. 379.

<sup>82</sup> Vgl. zu dem Begriff der Robustheit und zu den Robustheitsbetrachtungen im Supply Chain Design Kapitel 5 und Kapitel 6.

<sup>83</sup> Vgl. Corsten/Gössinger (2001), S. 99.

<sup>84</sup> Beckmann (2004), S. 33 bezeichnet diesen Punkt als Kundenauftragsentkopplungspunkt.

triebene Bestandteile der Supply Chain aufeinander treffen, charakterisiert werden können.<sup>85</sup>



**Abbildung 2.5: Der Order Penetration Point in der Supply Chain**  
(Quelle: In Anlehnung an Corsten/Gössinger (2001), S. 101.)

In Abbildung 2.5 sind verschiedene abstrahierte Strukturen dargestellt, die sich hinsichtlich der Stelle in der Supply Chain, an der die Kundenaufträge auf die prognosegetriebene Supply Chain treffen, unterscheiden. Diese Stelle ist in der Abbildung 2.5 in Anlehnung an den Order Penetration Point mit OPP gekennzeichnet.

Im obersten dargestellten Fall (make to stock), in dem der prognosegetriebene Teil überwiegt, handelt es sich um Standardprodukte, die auf Lager produziert werden, es kann dann auch von einer Push-Strategie der Supply Chain gesprochen werden.<sup>86</sup> Steigt der kundenauftragsgetriebene Anteil an, werden Varianten eines Grundmodells gefertigt, wobei die Fertigstellung des Endproduktes erst nach Eingang des Kundenauftrags erfolgt.<sup>87</sup> Im dritten dargestellten Fall (assemble to order) werden kundenindividuelle Produkte auf Basis standardisierter Module erstellt, die Montage erfolgt auftragsgetrieben, die Produktion der Module prognosegetrieben.<sup>88</sup> Im Fall des Make to

<sup>85</sup> Vgl. Yang/Burns (2003), S. 2078.

<sup>86</sup> Vgl. Chopra/Meindl (2004), S. 14ff.

<sup>87</sup> Vgl. Beckmann (2004), S. 34.

<sup>88</sup> Vgl. Corsten/Gössinger (2001), S. 100.

order werden alle Prozesse während und nach der Produktion auftragsbezogen ausgelöst, während die Beschaffungsprozesse auf Basis von Prognosen erfolgen.<sup>89</sup> Im extremen Fall, bei dem die ganze Supply Chain erst nach Eingang des Auftrags reagiert, kann auch von dem Pull-Prinzip gesprochen werden.<sup>90</sup> Die Produkte, die diesem Fall zu Grunde liegen, werden nicht nur den Kundenwünschen entsprechend gefertigt, sondern darüber hinaus kundenindividuell entwickelt.<sup>91</sup> Je stärker die zu fertigenden Produkte kundenauftragsgetrieben sind, desto größer ist die Spezifikation der Produkte, d. h. desto individueller sind die Produkte. Andererseits sinkt die Unsicherheit hinsichtlich der Art und Menge der nachgefragten Produkte, da die Supply Chain im Extremfall erst mit Eingang des Auftrags reagiert. Zur Verringerung der durch Variantenvielfalt hervorgerufenen Unsicherheit wird bei gemischten Formen von auftrags- und prognosegetriebener Supply Chain versucht, die Anpassung an Kundenwünsche entlang der Wertschöpfungskette soweit wie möglich zum Kunden zu verschieben. Diese Verzögerung von Produktions- und Logistikprozessen hinsichtlich der Produktdifferenzierung bis zum Eingang eines Kundenauftrags führt dazu, dass die Prognosen für einzelne Varianten nicht benötigt werden und die Lagerung von Endprodukten entfällt.<sup>92</sup> Diese unter dem Begriff Postponement bekannte Strategie erlaubt folglich die Reduktion der Bestände, ohne die Produktverfügbarkeit zu beeinträchtigen.<sup>93</sup>

Die Zielsetzung einer stärker auftragsgetriebenen Supply Chain liegt eher bei der Einhaltung der zugesagten Liefertermine, die Auslastung der Betriebsmittel und niedrige Bestände sind von untergeordneter Bedeutung. Eine stärker prognosegetriebene Supply Chain hingegen zielt auf eine effiziente Abwicklung der Material- und Warenflüsse mit möglichst geringen Beständen und einer hohen Kapazitätsauslastung ab.<sup>94</sup>

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Ziele des Supply Chain Design zwar zunächst allgemein mit den kosten-, service- und qualitätsorientierten Zielen des Supply Chain Management gleichgesetzt werden können, eine Festlegung der Zielsetzung jedoch von den Produkten und der strategischen Ausrichtung der Supply Chain abhängig ist. Im Rahmen dieser Arbeit steht eher das Design einer prognosegetriebenen Supply Chain mit der damit verbundenen Unsicherheit hinsichtlich der nachgefragten Mengen sowie einer effizienten Abwicklung der Material- und Warenflüsse im Vordergrund. Dennoch sind insbesondere die Aspekte einer sorgfältigen Auswahl von

<sup>89</sup> Vgl. Beckmann (2004), S. 34f.

<sup>90</sup> Vgl. Chopra/Meindl (2004), S. 14ff.; Corsten (2000a), S. 40.

<sup>91</sup> Vgl. Corsten/Gössinger (2001), S. 100.

<sup>92</sup> Vgl. Krtiger/Steven (2000), S. 505.

<sup>93</sup> Vgl. etwa Chopra/Meindl (2004), S. 324f.; Christopher (1998), S. 136f.

<sup>94</sup> Vgl. Beckmann (2004), S. 33f.; Corsten/Gössinger (2001), S. 102; Simchi-Levi/Kaminsky/Simchi-Levi (2003), S. 126f.

Zulieferern sowie die Robustheit einer Supply Chain auch bei einer eher auftragsgetriebenen Supply Chain relevant, so dass hier eine Übertragung möglich ist.

Eine zentrale Aufgabe des Supply Chain Design ist die Auswahl von Partnern in der Supply Chain.<sup>95</sup> Neben diesen Entscheidungen auf der institutionellen Ebene sind auf der Prozess- und Ressourcenebene Entscheidungen über Anzahl und Lokalisierung der Ressourcen zur Durchführung der Wertschöpfungsprozesse zu treffen.<sup>96</sup> Diese Aufgaben auf der Prozess- und Ressourcenebene, die der Planung der räumlichen Struktur der Supply Chain entsprechen, können anhand der Ebenen der Supply Chain in Aufgaben, die die Zulieferer, die Produktionsstätten, die Lager und die Kunden betreffen, unterteilt werden.

### *Zulieferer*

Auf der Ebene der Zulieferer ist zunächst zu entscheiden, wie Zulieferer ausgewählt werden sowie welche und wie viele Zulieferer auszuwählen sind.<sup>97</sup> In den folgenden Kapiteln wird gezeigt, dass die Auswahl der Zulieferer im Rahmen des Supply Chain Design in mathematischen Modellen häufig ausschließlich auf Basis der Kosten erfolgt.<sup>98</sup> Gerade im Rahmen einer weit reichenden Kooperation etwa mit Zulieferern von Schlüsselprodukten ist jedoch eine sorgfältige Auswahl dieser Zulieferer beispielsweise hinsichtlich des Forschungs- und Entwicklungspotenzials im Hinblick auf die gemeinsame Entwicklung von Produkten oder Prozessen geboten.<sup>99</sup> Darüber hinaus muss eine Zuordnung von zu beschaffenden Rohstoffen oder Rohstoffgruppen zu Zulieferern sowie eine Festlegung, welcher Zulieferer welche Rohstoffe an welchen Produktionsstandort bzw. welches Lager liefert, erfolgen.<sup>100</sup>

### *Produktionsstätten*

Die Entscheidungen hinsichtlich der Produktionsstätten umfassen zunächst die Festlegung der Anzahl und der jeweiligen Standorte, an denen produziert werden soll.<sup>101</sup> Darüber hinaus sind die Kapazitäten der verschiedenen Produktionsstandorte zu planen. Dies beinhaltet die Art und Anzahl der Produktionsanlagen, die einerseits die gesamte Kapazität festlegen und andererseits die zu fertigenden Produkte den Produktionsstätten zuordnen, sofern die verschiedenen Produkte spezifische Anlagen erfordern.<sup>102</sup> Durch die Festlegung der Art der Produktionsanlagen an den verschiedenen

<sup>95</sup> Vgl. Talluri/Baker (2002), S. 546; Viswanadham/Goankar (2003), S. 118.

<sup>96</sup> Vgl. Sucky (2004), S. 26.

<sup>97</sup> Vgl. Erengüc/Simpson/Vakharia (1999), S. 221; Jang et al. (2002), S. 264; Vidal/Goetschalckx (1997), S. 2.

<sup>98</sup> Vgl. Tabelle 3.2.

<sup>99</sup> Vgl. ausführlich zu den Aspekten der Auswahl von Zulieferern Kapitel 4.

<sup>100</sup> Vgl. Geunes/Chang (2001), S. 133; Harrison (2001), S. 415.

<sup>101</sup> Vgl. Swaminathan/Tayur (2003), S. 1388.

<sup>102</sup> Vgl. für eine derartige Kapazitätsplanung etwa Lucas et al. (2001).

Produktionsstandorten erfolgt ebenfalls eine Zuordnung der Prozesse zu den Produktionsstandorten, da die Prozesse durch die Anlagen determiniert sind.<sup>103</sup>

### *Lager*

Die Ebene der Lager steht bei der Planung der räumlichen Struktur der Supply Chain unter anderem stellvertretend für die Gestaltung des Distributionssystems. Folglich muss zunächst grundlegend entschieden werden, über wie viele Stufen der Distributionsprozess erfolgen soll, d. h. wie viele Ebenen von Lagern oder Warenverteilzentren Teil des Distributionssystems sind.<sup>104</sup> Hinsichtlich jeder Ebene von Lagern oder Warenverteilzentren ist zu entscheiden, welche Anzahl von Lagern zu errichten ist und welche Standorte für diese Lager gewählt werden.<sup>105</sup> Darüber hinaus ist die Kapazität der Lager festzulegen und eine Aufteilung der Kapazität hinsichtlich der verschiedenen zu lagernden Produkte vorzunehmen.<sup>106</sup> Des Weiteren sind die Distributionswege für die verschiedenen Kundengruppen festzulegen, d. h. entweder die Liefermengen der Produkte von den Lagern zu den Kunden zu planen oder im Falle einer Single-Sourcing-Anforderung die Zuordnung der Kunden zu Lagern vorzunehmen.<sup>107</sup> Diese Zuordnungen sind zwar nicht im eigentlichen Sinne dem langfristigen Planungshorizont zuzurechnen, dennoch können die Transportflüsse und die Zuordnungsentscheidungen die Kapazitäts- und Standortentscheidungen beeinflussen und sind somit im Rahmen der Konfiguration der Supply Chain festzulegen.

### *Kunden*

Auf der Ebene der Kunden ist zwar faktisch nicht die räumliche Struktur der Supply Chain zu planen, dennoch beeinflussen die Standorte der Kunden die Struktur der Supply Chain beispielsweise durch die Entfernungen zu den Auslieferungslagern im Hinblick auf den Lieferservice oder die Transportkosten.

Zusammenfassend kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass der Prozess des Supply Chain Design die Planung der räumlichen Struktur der Supply Chain beinhaltet. Die Realisierung unternehmensübergreifender Erfolgspotenziale als Ziel des Supply Chain Management und damit auch des Supply Chain Design setzt des Weiteren voraus, dass die Kooperationsbeziehungen zwischen Partnern einer Supply Chain in organisatorischer, technologischer und mental-sozialer Sicht zusammen passen.<sup>108</sup> Die Gestaltung dieser Kooperationsbeziehungen als Bestandteil des Supply Chain Design ist Gegenstand des folgenden Abschnitts.

<sup>103</sup> Vgl. Harrison (2001), S. 414.

<sup>104</sup> Vgl. Fleischmann/Meyr (2001), S. 15.

<sup>105</sup> Vgl. Chopra/Meindl (2004), S. 7; Geunes/Chang (2001), S. 133; Swaminathan/Tayur (2003), S. 1388.

<sup>106</sup> Vgl. Erengüc/Simpson/Vakharia (1999), S. 222; Simchi-Levi/Kaminsky/Simchi-Levi (2003), S. 25.

<sup>107</sup> Vgl. Sabri/Beamon (2000), S. 581.

<sup>108</sup> Vgl. Walther (2001), S. 12.

## 2.3 Zusammenarbeit im Rahmen des Supply Chain Design

### 2.3.1 Collaborative Planning

Der Begriff des Collaborative Planning oder Collaborative Supply Chain Planning zielt auf die gemeinsame Planung aller an einer Supply Chain beteiligten Unternehmungen ab.<sup>109</sup> Dabei zeichnet sich das Collaborative Planning durch eine längerfristige Kooperation aus, die einen intensiven Datenaustausch umfasst und nach gemeinsam festzulegenden Regeln eine integrierte Planung zur Erreichung der durch das Supply Chain Management angestrebten Ziele gestattet.<sup>110</sup> Ein wesentlicher Aspekt des Collaborative Planning ist, dass die Planungshoheit letztlich in den Einzelunternehmungen, die an der Supply Chain beteiligt sind, verbleibt.<sup>111</sup> Folglich ist Collaborative Planning insbesondere dann relevant, wenn die beteiligten Partner im Rahmen des Supply Chain Management gleichberechtigt sind. Im Gegensatz dazu kann es eine so genannte fokale Unternehmung geben, die auf Grund ihrer dominanten Rolle in der Supply Chain bedeutende Koordinations- und Entscheidungsfunktionen übernimmt.<sup>112</sup> Die fokale Unternehmung kann jedoch ebenfalls die Planungshoheit bei den Einzelunternehmungen belassen, um auf diese Weise eine vertrauensvolle Basis zu schaffen und damit einen intensiven Datenaustausch zur Realisation der Vorteile des Collaborative Planning und damit des Supply Chain Management zu ermöglichen. Als wesentliche Aspekte des Collaborative Planning werden die längerfristige Kooperation, die integrierte Planung und der intensive Datenaustausch im Folgenden näher analysiert.

#### *Längerfristige Kooperation*

Eine stabile Kooperationsbeziehung und damit eine längerfristige Kooperation wird nur dann zustande kommen, wenn die Beziehungen der Partner durch Offenheit und Vertrauen charakterisiert sind.<sup>113</sup> Im Rahmen einer längerfristigen Zusammenarbeit kann das Vertrauen wachsen und die in den Aufbau der Kooperation investierten Mittel zurückfließen.<sup>114</sup> Es hat sich gezeigt, dass gerade mangelndes Vertrauen ein wesentliches Hindernis bei der Umsetzung des Supply Chain Management ist.<sup>115</sup> Vertrauen beinhaltet den Glauben, dass die Partner an dem Wohlergehen des jeweils anderen interessiert sind und die Konsequenzen des eigenen Handelns auf die Partner berücksichtigen.<sup>116</sup> Diese Art des Vertrauens kann als ethisches Vertrauen bezeichnet werden.<sup>117</sup> Darüber hinaus können Kompetenzvertrauen und emotionales Vertrauen

<sup>109</sup> Vgl. Langemann (2004), S. 442.

<sup>110</sup> Vgl. Werners/Thorn (2003), S. 590.

<sup>111</sup> Vgl. Langemann (2004), S. 444; Werners/Thorn (2003), S. 590.

<sup>112</sup> Vgl. Hahn (2000), S. 15; Windischer/Mathier/Grote (2002), S. 15.

<sup>113</sup> Vgl. Kuhn/Hellingrath (2002), S. 85; Schönsleben/Hieber (2004), S. 55; Walther (2001), S. 27.

<sup>114</sup> Vgl. Knolmeyer/Mertens/Zeier (2000), S. 13.

<sup>115</sup> Vgl. Monczka/Trent/Handfield (2005), S. 222.

<sup>116</sup> Vgl. Chopra/Meindl (2004), S. 493.

<sup>117</sup> Vgl. Wong/Cheung (2004), S. 438.



unterschieden werden. Während Kompetenzvertrauen das Vertrauen beinhaltet, dass der Partner in der Lage ist, die im Rahmen der Zusammenarbeit erforderlichen Leistungen zu erbringen, zielt emotionales Vertrauen auf den persönlichen Eindruck der beteiligten Personen ab.<sup>118</sup> Nur bei einer von Vertrauen geprägten Zusammenarbeit werden die Partner bereit sein, die für eine gemeinsame Planung erforderlichen Daten zugänglich zu machen. Andernfalls besteht die Gefahr, dass der vermeintliche Partner sich opportunistisch verhält und die fremden Daten nutzt, um eigene Wettbewerbsvorteile zu realisieren. So kann das Wissen, dass hohe Lagerbestände existieren, die Forderung nach Preisreduktionen verursachen.<sup>119</sup> Eng mit dem Vertrauen verknüpft ist die innere Verpflichtung, die ausdrückt, dass im Rahmen einer längerfristigen Kooperation nicht nur die vertraglichen Verpflichtungen erfüllt werden, sondern ebenfalls eine aktive beiderseitige Sicherung der Zusammenarbeit, die über die vertraglich fixierten verpflichtenden Maßnahmen hinausgeht, angestrebt wird.<sup>120</sup> Während vertragliche Regelungen einerseits so gesehen werden, dass diese lediglich dann erforderlich sind, wenn kein Vertrauen vorhanden ist, können Verträge andererseits ebenfalls als Kommunikationsmittel verstanden werden, die Erwartungen und Rituale kommunizieren und darüber hinaus Regelungen für unvorhergesehene Ereignisse beinhalten.<sup>121</sup> Kommunikation vor Beginn der Zusammenarbeit, jedoch insbesondere während der Zusammenarbeit, die vertraglich geregelt sein kann, wird als wesentlich für eine längerfristige Kooperation erachtet, da Kommunikation zum Aufbau und zur Aufrechterhaltung von Vertrauen und innerer Verpflichtung entscheidend beitragen kann.<sup>122</sup>

### *Integrierte Planung*

Das Collaborative Planning betrifft im Rahmen der integrierten Planung verschiedene Bereiche. Dazu zählen eine gemeinsame Nachfrageplanung (Forecast bzw. Demand Collaboration), eine gemeinsame Lagerbestandsplanung (Inventory Collaboration), eine gemeinsame Kapazitätsplanung (Capacity Collaboration) sowie eine gemeinsame Transportplanung (Transportation Collaboration).<sup>123</sup> Ein wichtiger Aspekt der gemeinsamen Planung umfasst die Planung bzw. Vorhersage der Nachfrage und kann entscheidend zur Vermeidung des Bullwhip-Effektes beitragen.<sup>124</sup> Dabei werden nicht nur Planungen der kundenseitigen Nachfrage nach den verschiedenen Produkten,

<sup>118</sup> Vgl. Wong/Cheung (2004), S. 438f.

<sup>119</sup> Vgl. Knolmayer/Mertens/Zeier (2000), S. 13.

<sup>120</sup> Vgl. Kuhn/Hellingrath (2002), S. 63ff.; Stölzle (1999), S. 231.

<sup>121</sup> Vgl. Batt/Purchase (2004), S. 173 und die dort angegebene Literatur.

<sup>122</sup> Vgl. zu diesen und weiteren Einflussfaktoren zur Vertrauensbildung Stölzle (1999), S. 233ff.

<sup>123</sup> Vgl. Langemann (2004), S. 445ff. Kilger/Reuter (2002), S. 228ff. unterscheiden darüber hinaus „Purchase Order Collaboration“, das auf die gemeinsame Auftragsbearbeitung abzielt und auch bei Auftragsmodifikationen unterstützt.

<sup>124</sup> Vgl. Langemann (2004), S. 445; Kilger/Reuter (2002), S. 228.

sondern ebenfalls hinsichtlich des lieferantenseitigen Angebots ausgetauscht.<sup>125</sup> Zur Vermeidung des Bullwhip-Effektes, der etwa durch antizipierte Lieferkürzungen verursacht wird, ist beispielsweise die Nachfrage der Partner des Collaborative Planning und damit des Supply Chain Management bevorzugt zu erfüllen.<sup>126</sup> Das Ziel der gemeinsamen Lagerbestandsplanung ist die Vermeidung unnötiger Sicherheitsbestände hinsichtlich des mittelfristigen Planungshorizonts sowie die Vermeidung kurzfristiger Bestandsunter- bzw. Überdeckungen.<sup>127</sup> Der Austausch der Lagerdaten kann so weit gehen, dass die Lager von dem jeweiligen Zulieferer geführt werden. Dieses als Vendor Managed Inventory bekannte Konzept setzt einen intensiven Informationsaustausch von Nachfragedaten und Verkaufszahlen voraus.<sup>128</sup> Das Auftreten von Kapazitätsengpässen kann zu erhöhten Sicherheitsbeständen oder zu erhöhten Lieferzeiten führen. Ziel der Capacity Collaboration ist daher, Kapazitätsengpässe oder -überangebote frühzeitig zu erkennen und zu vermeiden oder zu nutzen.<sup>129</sup> Neben der geplanten bereitgehaltenen Kapazität, die dann ggf. für verschiedene Produkte genutzt werden kann, werden zwischen den Partnern häufig maximale und minimale bereitgehaltene Kapazitäten vereinbart.<sup>130</sup> Im Rahmen der Transportation Collaboration kann die gemeinsame Planung auf eine Transportunternehmung ausgedehnt werden, was durch angepasste Informationssysteme zu einer vereinfachten Abwicklung der durchzuführenden Transporte und zu einem verbesserten Materialfluss führen kann.<sup>131</sup>

### *Datenaustausch*

Die Grundlage des Collaborative Planning ist eine Verknüpfung der verschiedenen Unternehmungen, um einen Austausch der für die Realisierung der gemeinsamen Ziele erforderlichen Daten und damit eine integrierte Planung zu gestatten.<sup>132</sup> In Anlehnung an die im vorherigen Abschnitt mit Hilfe der Supply Chain Planning-Matrix vorgestellten Planungsaufgaben des Supply Chain Management kann der auf den verschiedenen Planungsebenen erforderliche Datenaustausch, wie in Abbildung 2.6 dargestellt, verdeutlicht werden.<sup>133</sup>

<sup>125</sup> Vgl. Busch et al. (2003), S. 46. Kilger/Reuter (2002), S. 228f. unterscheiden zwischen „Demand Collaboration“ und „Procurement Collaboration“.

<sup>126</sup> Vgl. Kilger/Reuter (2002), S. 228.

<sup>127</sup> Vgl. Busch et al. (2003), S. 47.

<sup>128</sup> Vgl. Chopra/Meindl (2004), S. 371; Werners/Thorn (2002), S. 701.

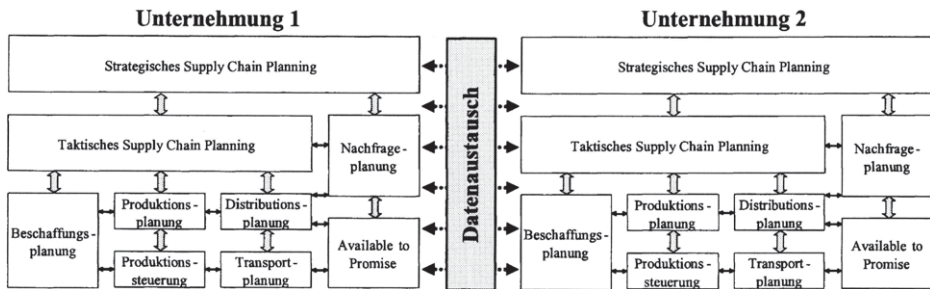
<sup>129</sup> Vgl. Langemann (2004), S. 446.

<sup>130</sup> Vgl. Kilger/Reuter (2002), S. 229.

<sup>131</sup> Vgl. Busch et al. (2003), S. 48; Kilger/Reuter (2002), S. 230.

<sup>132</sup> Vgl. Kilger/Reuter (2002), S. 223.

<sup>133</sup> Vgl. Kilger/Reuter (2002), S. 233; Werners/Thorn (2003), S. 592f.



**Abbildung 2.6: Collaborative Planning anhand der Supply Chain Planning-Matrizen**  
(Quelle: In Anlehnung an Werners/Thorn (2003), S. 592; Kilger/Reuter (2002), S. 223.)

Für die gemeinsame Planung aller beteiligten Partner stehen computergestützte Informations- und Entscheidungsunterstützungssysteme, so genannte Advanced Planning Systems, zur Verfügung.<sup>134</sup> Diese ergänzen die ERP-Systeme und ermöglichen eine standortübergreifende Planung und Optimierung der Supply Chain.<sup>135</sup> Während des Prozesses des Supply Chain Design werden in den meisten Fällen jedoch keine vernetzten Informations- und Entscheidungsunterstützungssysteme bereitstehen, da das Supply Chain Design die Grundlage des Supply Chain Management und damit auch des Collaborative Supply Chain Planning bildet. Der in Abbildung 2.6 dargestellte Datenaustausch wird folglich eher für die auf dem Supply Chain Design basierenden Planungsprozesse des taktischen und operativen Supply Chain Planning relevant sein. Die im Rahmen der Auswahl der Partner erforderlichen Informationen müssen dementsprechend tendenziell zunächst extern eingeholt werden, um darauf basierend eine gemeinsame Gestaltung der Supply Chain hinsichtlich der Standorte, der Kapazitäten sowie der Materialflüsse und der weiteren im vorherigen Abschnitt erläuterten relevanten Aspekte vorzunehmen.

Das Collaborative Supply Chain Design wird bei gleichberechtigten Partnern, die im Collaborative Planning vorausgesetzt werden, auf Grund der eher geringen Planungshäufigkeit in der Regel von unternehmensübergreifenden Teams erfolgen.<sup>136</sup> Um darauf aufbauend die gemeinsame Planung der taktischen und operativen Aufgaben des Supply Chain Management durchführen zu können, ist während des Prozesses des Supply Chain Design ebenfalls die Planung der Informationstechnologie vorzunehmen.<sup>137</sup> Im Rahmen der Planung der Informationstechnologie ist darauf zu achten, dass

<sup>134</sup> Vgl. Krüger/Steven (2002), S. 591.

<sup>135</sup> Vgl. Fleischmann/Meyr (2003), S. 480.

<sup>136</sup> Vgl. Werners/Thorn (2003), S. 593.

<sup>137</sup> Vgl. zu den verschiedenen Aspekten der Planung eines IT-Systems im Supply Chain Management Gunasekaran/Ngai (2004) und die dort angegebene Literatur.

sensitive Daten, wie beispielsweise Kostendaten, gegen den Zugriff von Dritten geschützt werden.<sup>138</sup>

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es einen Prozess des Collaborative Supply Chain Design lediglich dann geben kann, wenn die an der Supply Chain beteiligten Partner bereits feststehen. Da die Auswahl geeigneter Partner jedoch ebenfalls ein Bestandteil der Konfiguration der Supply Chain sein kann und darüber hinaus fehlende gemeinsame Informations- und Entscheidungsunterstützungssysteme eine integrierte Planung erschweren, bildet das Supply Chain Design die Basis für die nachfolgenden eher taktischen oder operativen Prozesse des Collaborative Supply Chain Planning. Die Beziehungen der produzierenden Unternehmungen zu Zulieferern und Kunden sind ein wichtiger Bestandteil des Supply Chain Management. Im Folgenden werden daher die Konzepte des Supplier und Customer Relationship Management vorgestellt und auf die Förderung von Zulieferern im Rahmen des Supplier Development eingegangen.

### 2.3.2 Supplier und Customer Relationship Management

Das Supplier Relationship Management umfasst die Beziehungen zu Zulieferern und die Maßnahmen zur Planung, Durchführung und Kontrolle der Beziehungen mit diesen.<sup>139</sup> Das Supplier Relationship Management kann als wichtiger Teil des Supply Chain Management gesehen werden, da durch eine umfassende Kooperation mit ausgesuchten Zulieferern Kosten-, Qualitäts- und Serviceverbesserungen erreicht werden können.<sup>140</sup>

Diese Beziehungen zu den Zulieferern können, wie in Tabelle 2.4 dargestellt, anhand verschiedener Merkmale als partnerschaftliche oder marktliche Beziehungen charakterisiert werden.<sup>141</sup> Es zeigt sich jedoch, dass die Abgrenzung einer partnerschaftlichen von einer rein marktlichen Beziehung nicht zwingend eindeutig ist.<sup>142</sup> Tendenziell kann jedoch festgehalten werden, dass eine partnerschaftliche Beziehung durch eine ausgeprägte Mitwirkung des Zulieferers, regelmäßige Treffen und einen umfangreichen Datenaustausch charakterisiert ist, wohingegen rein marktliche Beziehungen auf eine eher kurzfristige Zusammenarbeit ausgerichtet sind, die nahezu keine Mitwirkung des Zulieferers und keinen umfassenden Datenaustausch beinhaltet. Diese in Tabelle

<sup>138</sup> Vgl. Knolmayer/Mertens/Zeier (2000), S. 13.

<sup>139</sup> Vgl. Riemer/Klein (2002), S. 7. Boutellier/Wagner (2000), S. 27 nennen in diesem Zusammenhang die Gestaltung, Lenkung und Entwicklung der Beziehungen.

<sup>140</sup> Vgl. Corsten/Hofstetter (2001), S. 131; Riemer/Klein (2002), S. 10.

<sup>141</sup> Cox et al. (2003), S. 137 unterscheiden in diesem Zusammenhang „arm’s-length“ und „collaborative“ Beziehungen mit Zulieferern.

<sup>142</sup> Vgl. Stölzle/Heusler (2003), S. 172.

2.4 als partnerschaftlich gekennzeichneten Beziehungen sind ein wichtiger Gegenstand des Supplier Relationship Management.<sup>143</sup> Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass eine intensive Zusammenarbeit mit einem Zulieferer durch die gestiegene Abhängigkeit ein höheres Risiko im Falle eines Scheiterns der Zusammenarbeit beinhaltet. Insbesondere um dieses erhöhte Risiko zu vermindern, ist eine sorgfältige Auswahl derjenigen Zulieferer geboten, mit denen eine intensive Zusammenarbeit angestrebt wird.<sup>144</sup>

Merkmal	Partnerschaftliche Beziehung	Rein marktliche Beziehung
Dauer der Geschäftsbeziehung	Langfristig	Kurzfristig
Grundlage von Preisänderungen	Kostensparungspotenziale für beide Partner	keine Angabe
Lieferantenstamm für ein bestimmtes Gut	Ein oder zwei Zulieferer	Viele Zulieferer
Wareneingangskontrolle	Nein	Ja
Erhebung der Zulieferer- und Kundenleistungen und Vereinbarungen über regelmäßige Rückmeldungen	Ja	Nein
Weiterbildungsprogramme und technische Unterstützung des Zulieferers	Umfassend oder zumindest im Ansatz	Keine
Einrichten von Teams für Verbesserungsmaßnahmen	Umfassend oder zumindest im Ansatz	Gewöhnlich keine, allenfalls begrenzt
Mitwirkung bei der Produktgestaltung	Umfassend oder zumindest im Ansatz	Gewöhnlich keine, allenfalls begrenzt
Mitwirkung bei der Gestaltung logistischer Prozesse	Umfassend oder zumindest im Ansatz	Gewöhnlich keine, allenfalls begrenzt
Regelmäßige Treffen auf leitender Managementebene	Umfassend oder zumindest im Ansatz	Gewöhnlich keine, allenfalls begrenzt
Austausch strategischer Informationen und Kostendaten	Umfassend oder zumindest im Ansatz	Gewöhnlich keine, allenfalls begrenzt
Gemeinsame Investitionsplanung	Umfassend oder zumindest im Ansatz	Gewöhnlich keine, allenfalls begrenzt
Austausch der Daten über Bedarfsvorhersagen, Umsatzentwicklungen, Lagerbestandshöhen, Produktions- und Lieferpläne und deren Aktualisierung	Umfassend oder zumindest im Ansatz	Gewöhnlich keine, allenfalls begrenzt

**Tabelle 2.4: Merkmale zur Abgrenzung von Zuliefererbeziehungen**  
(Quelle: Stölzle/Heusler (2003), S. 173.)

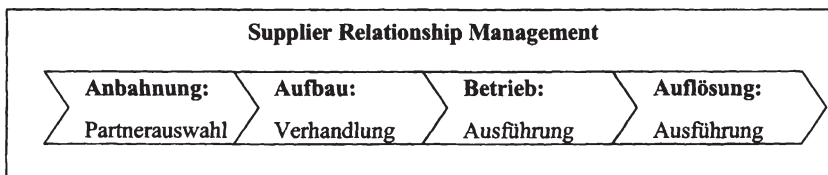
Die Anbahnung neuer Beziehungen mit Zulieferern beginnt mit der Partnerauswahl, die auf Grund der tendenziell langfristig anzustrebenden Beziehungen mit den Zulieferern sorgfältig durchgeführt werden sollte.<sup>145</sup> Die zweite Phase des Supplier Relationship Management umfasst das Design der Beziehung und damit die Verhand-

<sup>143</sup> Vgl. Kumar/Brugg (2003), S. 24; Stölzle/Heusler (2003), S. 184.

<sup>144</sup> Vgl. zu den verschiedenen Aspekten einer sorgfältigen Auswahl von Zulieferern ausführlich Kapitel 4.

<sup>145</sup> Vgl. Riemer/Klein (2002), S. 16.

lungen. In dieser Phase werden die Ziele und Inhalte der Kooperation festgelegt und die wechselseitigen Interessen an der Kooperation verglichen. Rimer und Klein definieren dann die dritte Phase als Phase zur Stabilisierung der Beziehungen, die das Kennenlernen der Kooperationspartner, die Bildung unternehmungsübergreifender Teams und der Bildung sozialer Beziehungen umfasst.<sup>146</sup> Die vierte Phase des Supplier Relationship Management dient der Ausführung der Kooperation und beinhaltet die Konfliktbehandlung und ggf. erforderliche Anpassungsmaßnahmen.<sup>147</sup> In Anlehnung an den Kooperations-Lebenszyklus kann die dritte Phase der Stabilisierung übergreifend der Aufbau- oder Betriebsphase zugeordnet werden, so dass nach der Ausführung der Kooperation die Auflösung den Kooperations-Lebenszyklus abschließt.<sup>148</sup>



**Abbildung 2.7: Phasen des Supplier Relationship Management**

Falls ein Zulieferer nicht über die für eine erfolgreiche Zusammenarbeit erforderlichen Fähigkeiten verfügt, gibt es für den Abnehmer drei Möglichkeiten zu reagieren: Eigenfertigung der zu beschaffenden Produkte, Wechsel zu einem anderen Zulieferer oder Förderung des Zulieferers, so dass dieser die erforderlichen Fähigkeiten entwickelt.<sup>149</sup> Diese Förderung der Fähigkeiten eines Zulieferers wird als Supplier Development bezeichnet.<sup>150</sup> Supplier Development beinhaltet alle Aktivitäten, die ein Abnehmer durchführt, um die Performance oder Fähigkeiten eines Zulieferers zu verbessern, so dass diese den Anforderungen des Abnehmers genügen.<sup>151</sup> Diese Definition des Supplier Development kann mit der Lieferantenförderung bzw. der Lieferantenentwicklung gleichgesetzt werden, wenn der Zulieferer soweit gefördert wird, dass eine völlig neue Beschaffungsquelle hinsichtlich des betrachteten Produktes entsteht.<sup>152</sup> Die Förderung der Zulieferer kann technische, wirtschaftliche, personenbezogene oder kommunikationsfördernde Maßnahmen beinhalten.<sup>153</sup>

<sup>146</sup> Vgl. Riemer/Klein (2002), S. 16.

<sup>147</sup> Vgl. Riemer/Klein (2002), S. 17.

<sup>148</sup> Vgl. Kuhn/Hellingrath (2002), S. 60ff.

<sup>149</sup> Vgl. Handfield et al. (2000), S. 37.

<sup>150</sup> Vgl. Stölzle/Heusler (2003), S. 189. Humphreys/Li/Chan (2004) weisen in einer Studie den Einfluss des Supplier Development auf die Performance von Herstellern von elektronischen Geräten nach.

<sup>151</sup> Vgl. Handfield et al. (2000), S. 37f.; Sako (2004), S. 282.

<sup>152</sup> Vgl. Arnold (1997), S. 191ff.

<sup>153</sup> Vgl. Arnold (1997), S. 191ff.; Stölzle/Heusler (2003), S. 189.

Der Prozess des Supplier Development setzt zunächst voraus, dass Produkte identifiziert werden, bei denen Handlungsbedarf besteht. Darauf aufbauend müssen Zulieferer der Bestandteile dieser Produkte ausgewählt werden, die den Fördermaßnahmen aufgeschlossen gegenüberstehen und Weiterentwicklungspotenzial beinhalten. Ein auf Seiten des Abnehmers gebildetes interdisziplinäres Team sollte im Rahmen eines Treffens mit dem Management des Zulieferers Verbesserungspotenziale diskutieren und Ziele vereinbaren. Während der Durchführung dieser Verbesserungsprojekte sind ein kontinuierlicher Informationsaustausch und eine Beobachtung der Projektfortschritte erforderlich.<sup>154</sup> Projekte zur Zuliefererentwicklung und damit die Förderung einer partnerschaftlichen Beziehung können auf Grund des hohen Ressourcenbedarfs nur mit einer geringen Anzahl an Zulieferern durchgeführt werden.<sup>155</sup> Dies betont erneut die Bedeutung der Auswahl der Zulieferer, die in Kapitel 4 detailliert analysiert wird.

Neben dem Supplier Relationship Management sind im Rahmen des Supply Chain Management insbesondere die Beziehungen zu den Kunden von großer Bedeutung. Das Customer Relationship Management beinhaltet eine kundenorientierte Unternehmensphilosophie, die mit Hilfe moderner Informations- und Kommunikationstechnologien versucht, langfristige Kundenbeziehungen aufzubauen und zu festigen.<sup>156</sup> Das Customer Relationship Management dient folglich der Verbesserung des Kontakts zu den Kunden und dem besseren Verständnis der Kundenbedürfnisse.<sup>157</sup> Ein zweiter Aspekt, der neben der Unternehmungsausrichtung auf die Kundenbedürfnisse mit dem Customer Relationship Management gleichgesetzt wird, betrifft die Automatisierung der Geschäftsprozesse mit Hilfe geeigneter Softwareunterstützung.<sup>158</sup> Insbesondere im Rahmen des Supply Chain Management dominiert diese Sicht des Customer Relationship Management als IT-System.<sup>159</sup> Dabei sind die Hauptanliegen, die Kundenbeziehungen vom Marketing bis zum Service nach dem Kauf durch ein einheitliches IT-System zu unterstützen, gerade in großen Unternehmungen dem Kunden gegenüber einheitlich aufzutreten („One face to the Customer“) und allen Wertschöpfungspartnern die Informationen über die Kunden zugänglich zu machen.<sup>160</sup>

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass ein sorgfältiges Beziehungsmanagement als Bestandteil des Supply Chain Management die fundierte Auswahl von Zulieferern im Rahmen des Supply Chain Design voraussetzt. Das Customer Relationship Manage-

<sup>154</sup> Vgl. zu diesem Vorgehen des Supplier Development Handfield et al. (2000).

<sup>155</sup> Vgl. Boutellier/Wagner (2001), S. 42.

<sup>156</sup> Vgl. Hippner/Wilde (2001), S. 6.

<sup>157</sup> Vgl. Simchi-Levi/Kaminsky/Simchi-Levi (2003), S. 270.

<sup>158</sup> Vgl. Stölzle/Heusler (2003), S. 178.

<sup>159</sup> Vgl. Bruhn (2002), S. 133; Knolmayer/Mertens/Zeier (2000), S. 50; Simchi-Levi/Kaminsky/Simchi-Levi (2003), S. 282.

<sup>160</sup> Vgl. Hippner/Wilde (2001), S. 12; Knolmayer/Mertens/Zeier (2000), S. 50.

ment als IT-gestützte Umsetzung der Kundenorientierung der Supply Chain ist zunächst kein direkter Bestandteil des Supply Chain Design. Jedoch kann das Konzept des Customer Relationship Management durch die Auswahl und Umsetzung eines ganzheitlichen Informations- und Entscheidungsunterstützungssystems in der gesamten Supply Chain berücksichtigt werden.

In diesem Kapitel ist neben der Erläuterung der Begriffe Supply Chain, Supply Chain Management und Supply Chain Design eine Einordnung des Prozesses des Supply Chain Design in das Konzept des Supply Chain Management vorgenommen worden. Neben der Planung der räumlichen Struktur der Supply Chain umfasst das Supply Chain Design die Auswahl der Wertschöpfungspartner, beispielsweise der Zulieferer. Die Planung der räumlichen Struktur einer Supply Chain kann auf Grund der vielfältigen Materialflussbeziehungen mit Hilfe mathematischer Modelle unterstützt werden. Im folgenden Kapitel werden daher in der Literatur vorhandene Modelle zum Supply Chain Design vorgestellt und darauf aufbauend ein umfassendes Modell zur Planung der Struktur einer Supply Chain entwickelt. Die Kriterien und Methoden zur Auswahl geeigneter Zulieferer sind daran anschließend Gegenstand des vierten Kapitels.



## 3 Quantitative Planungsunterstützung im Supply Chain Design

### 3.1 Grundlagen quantitativer Planungsunterstützung

#### 3.1.1 Mathematische Modelle zur Planungsunterstützung

Sind vielfältige Interdependenzen zu erfassen, kann ein Entscheidungsträger bei der Auswahl einer seinen Präferenzen entsprechenden Handlungsalternative maßgeblich durch mathematische Modelle unterstützt werden. Ausgehend von einem Modellbegriff, der unter einem Modell ein zweckorientiertes, vereinfachtes Abbild eines realen Systems versteht, welches hinsichtlich der relevanten Zusammenhänge strukturähnlich ist,<sup>1</sup> hat die Gestaltung eines mathematischen Modells zum Supply Chain Design derart zu erfolgen, dass es sich einerseits um ein vereinfachtes Abbild der Realität handelt und folglich die Ermittlung einer optimalen und damit exakten Lösung erleichtert werden kann. Andererseits sind alle relevanten Zusammenhänge zu erfassen, um die Übertragbarkeit einer Lösung des Modells auf die reale Problemstellung zu gewährleisten.

Im Folgenden werden zunächst verschiedene Arten von Modellen kurz erläutert und nachfolgend typische Charakteristika mathematischer Optimierungsmodelle vorgestellt. Ein Überblick über inhaltliche Merkmale der Modelle zum Supply Chain Design bildet den zweiten Schwerpunkt des Abschnitts 3.1. Eine Analyse der in der Literatur vorhandenen deterministischen und stochastischen Modelle erfolgt in den Abschnitten 3.2 und 3.3. Die Grundlage für die Robustheitsbetrachtungen im Supply Chain Design bildet das in 3.4 entwickelte Modell mit den vielfältigen beschriebenen anwendungsspezifischen Erweiterungsmöglichkeiten.

#### *Beschreibungs-, Erklärungs- und Entscheidungsmodelle*

Nach dem Einsatzzweck der Modelle lassen sich Beschreibungs-, Erklärungs- und Entscheidungsmodelle unterscheiden.<sup>2</sup> Dabei liefern Beschreibungsmodelle, so genannte deskriptive Modelle, Beschreibungen von Elementen und deren Beziehungen im realen System.<sup>3</sup> Ein Beispiel für ein Beschreibungsmodell ist etwa die Finanzbuchhaltung oder die Kostenrechnung. Erklärungsmodelle leisten einen Beitrag zum Verständnis eines Problems und formulieren Aussagen über Gesetzmäßigkeiten in realen Systemen.<sup>4</sup> Ein Erklärungsmodell ist beispielsweise die Produktionsfunktion von Gutenberg.<sup>5</sup> Entscheidungsmodelle zielen drauf ab, Handlungsempfehlungen zu ermit-

<sup>1</sup> Vgl. zu verschiedenen Aspekten des Modellbegriffs Adam (1996), S. 60f.; Bamberg/Coenenberg (2002), S. 13; Berens/Delfmann (2002), S. 22; Domschke/Scholl (2003), S. 30; Homburg (2000), S. 30ff.

<sup>2</sup> Vgl. etwa Bamberg/Coenenberg (2002), S. 15; Berens/Delfmann (2002), S. 25.

<sup>3</sup> Vgl. etwa Domschke/Drexel (2005), S. 3; Homburg (2000), S. 34.

<sup>4</sup> Vgl. etwa Berens/Delfmann (2002), S. 25; Homburg (2000), S. 34.

<sup>5</sup> Vgl. zur Produktionsfunktion von Gutenberg etwa Steven (1998), S. 126ff.

teln.<sup>6</sup> Dafür beinhalten diese zusätzlich zu Erklärungsmodellen Zielpräferenzen zur Bewertung und Auswahl von Handlungsalternativen.<sup>7</sup>

### *Qualitative und quantitative Modelle*

Neben der Unterscheidung nach dem Einsatzzweck der Modelle lassen sich Modelle hinsichtlich der Art der verarbeiteten Informationen in quantitative und qualitative Modelle unterteilen.<sup>8</sup> Qualitative Modelle beinhalten gegebenenfalls neben quantitativen Zusammenhängen verbale, nicht metrische Informationen, wohingegen quantitative Modelle ausschließlich metrische Informationen beinhalten.<sup>9</sup> Bei den quantitativen Modellen wird eine kardinale Messbarkeit der Informationen gefordert, während bei qualitativen Modellen meist eine ordinale oder nominale Messung vorliegt.<sup>10</sup>

### *Statische und dynamische Modelle*

Nach dem Zeitbezug kann zwischen statischen und dynamischen Modellen unterschieden werden.<sup>11</sup> Statische Modelle beinhalten eine Zeitperiode und Entscheidungen, die unabhängig von späteren Entscheidungen getroffen werden. Dynamische Modelle berücksichtigen mehrere Zeitperioden mit Interdependenzen zwischen diesen und ermitteln somit eine Folge optimaler Entscheidungen.<sup>12</sup> Werden zwar mehrere Perioden betrachtet, jedoch keine Interdependenzen zwischen diesen, so wird auch die Bezeichnung komparativ-statisches Modell verwendet.<sup>13</sup>

### *Deterministische und stochastische Modelle*

Hinsichtlich des Informationsgrades lassen sich Modelle in deterministische und stochastische Modelle unterteilen.<sup>14</sup> Wird Unsicherheit im Modell explizit in Form von Wahrscheinlichkeiten bzw. Wahrscheinlichkeitsverteilungen angegeben, so handelt es sich um stochastische Modelle, die Entscheidungssituationen unter Risiko widerspiegeln.<sup>15</sup> Bleibt im Gegensatz dazu die Unsicherheit unberücksichtigt, so handelt es sich um deterministische Modelle, die Entscheidungssituationen unter Sicherheit abbilden.<sup>16</sup>

<sup>6</sup> Vgl. Homburg (2000), S. 35.

<sup>7</sup> Vgl. Bamberg/Coenenberg (2002), S. 15; Domschke/Scholl (2003), S. 31.

<sup>8</sup> Vgl. Adam (1996), S. 81.

<sup>9</sup> Vgl. Domschke/Scholl (2003), S. 31f.

<sup>10</sup> Vgl. Domschke/Scholl (2003), S. 32 und zu den Begriffen nominal, ordinal und kardinal etwa Bamberg/Baur (2002), S. 6f. oder Zimmermann (2000), S. 194.

<sup>11</sup> Vgl. Domschke/Scholl (2003), S. 32f.; Homburg (2000), S. 33.

<sup>12</sup> Vgl. Adam (1996), S. 88ff.; Bamberg/Coenenberg (2002), S. 41f.

<sup>13</sup> Vgl. Schneeweiß (1992), S. 98.

<sup>14</sup> Vgl. Domschke/Drexel (2005), S. 6.

<sup>15</sup> Vgl. Domschke/Drexel (2005), S. 6; Homburg (2000), S. 33; Scholl (2001), S. 19.

<sup>16</sup> Vgl. Domschke/Drexel (2005), S. 6; Scholl (2001), S. 19.

Bei den in den folgenden Abschnitten vorgestellten mathematischen Modellen zum Supply Chain Design handelt es sich um Entscheidungsmodelle, da Handlungsempfehlungen bezüglich der Konfiguration einer Supply Chain gegeben werden sollen. Hinsichtlich der Unterscheidung in qualitative und quantitative Modelle sind mathematische Modelle den quantitativen Modellen zuzuordnen, da alle Informationen in messbarer Form berücksichtigt werden. Es kann sich bei mathematischen Modellen sowohl um statische als auch um dynamische Modelle handeln. Darüber hinaus werden sowohl deterministische als auch stochastische Modelle aus der Literatur analysiert und weiterentwickelt. Mathematische Modelle im Sinne des Operations Research<sup>17</sup> lassen sich des Weiteren in Simulationsmodelle und Optimierungsmodelle untergliedern.<sup>18</sup>

Simulationsmodelle erlauben die Analyse der Konsequenzen einzelner Handlungsalternativen und sind somit im eigentlichen Sinne keine Entscheidungsmodelle.<sup>19</sup> Es können lediglich einzelne Handlungsalternativen hinsichtlich verschiedener Ziele mit einander verglichen werden. Der Aufwand, nach guten bzw. optimalen Alternativen zu suchen, steigt jedoch mit wachsender Anzahl möglicher Alternativen.<sup>20</sup>

Charakteristisch für Optimierungsmodelle sind Zielfunktionen, Restriktionen und Entscheidungsvariablen.<sup>21</sup> Dabei wird die optimale Ausprägung der Entscheidungsvariablen durch das Modell bestimmt.<sup>22</sup> Die Restriktionen legen in Form von Gleichungen und/oder Ungleichungen den Wertebereich der Entscheidungsvariablen fest.<sup>23</sup> In Abhängigkeit von der zu minimierenden oder maximierenden Zielfunktion werden dann die optimalen Werte der Entscheidungsvariablen bestimmt.

Wie in Abbildung 3.1 dargestellt, können die Optimierungsmodelle weiter klassifiziert werden nach der Art der Zielfunktion und Restriktionen in lineare und nichtlineare Modelle. Sind alle Restriktionen und die Zielfunktion linear, so handelt es sich um ein lineares Optimierungsmodell. Es reicht jedoch aus, wenn eine der Restriktionen oder die Zielfunktion nichtlinear ist, damit es sich um ein nichtlineares Optimierungsmodell handelt.<sup>24</sup> In Abhängigkeit von der Ausgestaltung der Entscheidungsvariablen können

---

<sup>17</sup> Zum Begriff und zur Entstehungsgeschichte des Operations Research vgl. etwa Bowen (2004), S. 618ff.; Ellinger/Beuermann/Leisten (2003), S. 1f.; Hillier/Liebermann (1997), S. 1ff. oder Zimmermann (1992), S. 1ff. und die jeweilige dort angegebene Literatur.

<sup>18</sup> Vgl. Domschke/Drexel (2005), S. 3.

<sup>19</sup> Vgl. Domschke/Scholl (2003), S. 31.

<sup>20</sup> Vgl. Adam (1996), S. 488.

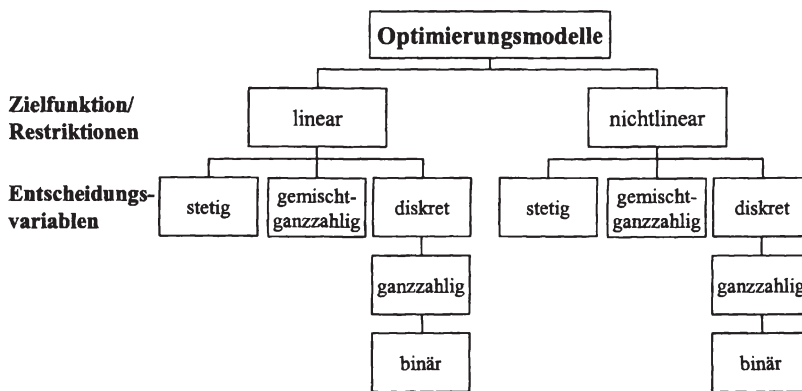
<sup>21</sup> Vgl. Hillier/Liebermann (2001), S. 11; Runzheimer (1999), S. 17f.

<sup>22</sup> Vgl. Runzheimer (1999), S. 18.

<sup>23</sup> Vgl. Domschke/Drexel (2005), S. 4.

<sup>24</sup> Vgl. Ellinger/Beuermann/Leisten (2003), S. 11.

Optimierungsmodelle unterteilt werden in stetige und diskrete Modelle.<sup>25</sup> Dabei sind stetige Optimierungsmodelle dadurch charakterisiert, dass alle Entscheidungsvariablen reelle Zahlen sind.<sup>26</sup> Diskrete Optimierungsmodelle beinhalten im Gegensatz dazu lediglich diskrete Variablen, die nur bestimmte diskrete Werte annehmen können, die jedoch nicht ganzzahlig sein müssen.<sup>27</sup> Nehmen alle Entscheidungsvariablen nur ganzzahlige Werte an, so handelt es sich um ganzzahlige Optimierungsmodelle, darf hingegen ein Teil der Variablen ganzzahlig und ein Teil reelle Werte annehmen, so handelt es sich um gemischt-ganzzahlige Optimierungsmodelle.<sup>28</sup> Ein Spezialfall der ganzzahligen Optimierungsmodelle sind die binären Optimierungsmodelle, bei denen alle Entscheidungsvariablen binär, d. h. entweder null oder eins sind.<sup>29</sup>



**Abbildung 3.1: Charakterisierung von Optimierungsmodellen**

Im folgenden Abschnitt werden die verschiedenen möglichen inhaltlichen Merkmale von Optimierungsmodellen zum Supply Chain Design kurz erläutert, so dass anschließend eine Einordnung der in der Literatur vorhandenen Modelle zur Konfiguration einer Supply Chain anhand dieser Merkmale und der Charakteristika von Optimierungsmodellen erfolgen kann.

<sup>25</sup> Vgl. Kistner (2003), S. 4ff.

<sup>26</sup> Vgl. Kistner (2003), S. 4.

<sup>27</sup> Vgl. Kallrath (2002), S. 10.

<sup>28</sup> Vgl. Kallrath (2002), S. 14; Williams (1999), S. 144. Zu der englischsprachigen Bezeichnung dieser Modelle als „all-integer“ oder „integer“ und „mixed-integer“ vgl. Anderson/Sweeney/Williams (2003), S. 369f.; Hillier/Liebermann (2001), S. 576f.

<sup>29</sup> Vgl. Kistner (2003), S. 6.

### 3.1.2 Charakteristika mathematischer Modelle zum Supply Chain Design

Entsprechend den vielfältigen Aufgaben des Supply Chain Design<sup>30</sup> umfassen Optimierungsmodelle, die das Supply Chain Design unterstützen, eine Vielzahl unterschiedlicher Aspekte. Diese lassen sich zunächst hinsichtlich der Zielsetzung, der Entscheidungsvariablen und der Einflussfaktoren charakterisieren. Darüber hinaus ist eine Differenzierung nach der Anzahl der Produkte, dem Planungshorizont und der Art des Netzwerks möglich. In diesem Zusammenhang ist des Weiteren interessant, ob das Modell bereits auf eine Problemstellung aus der Praxis angewandt wurde und wenn dies der Fall ist, welcher Branche die Anwendung zuzuordnen ist. Im Folgenden werden zunächst die möglichen unterschiedlichen Ausprägungen der Charakteristika der vorgestellten Modelle diskutiert, bevor die relevanten mathematischen Modelle vorgestellt und anhand dieser Charakteristika eingeordnet werden.

#### *Zielsetzung*

Im Hinblick auf das Design einer Supply Chain können vielfältige Zielsetzungen, wie Minimierung der Kosten, der Bestände oder der Durchlaufzeiten sowie Maximierung des Gewinns, der Liefertermintreue oder der Kapazitätsauslastung relevant sein.<sup>31</sup> Die vorgestellten Optimierungsmodelle zum Supply Chain Design sind deshalb in einem ersten Schritt hinsichtlich der verwendeten Zielfunktion zu untersuchen.

#### *Entscheidungsvariablen*

Strategisches Supply Chain Management oder Supply Chain Design beinhaltet zahlreiche Entscheidungen, wie die Planung der Anzahl der Standorte sowie der Kapazitäten der Produktionsstätten und Lager oder die Festlegung der Materialflüsse innerhalb der Supply Chain.<sup>32</sup> Die Modelle zum Supply Chain Design werden folglich hinsichtlich der Berücksichtigung der Standorte der Produktionsstätten und Lager als Entscheidungsvariablen analysiert. Des Weiteren wird untersucht, ob die Kapazitäten der verschiedenen Standorte im Rahmen des Modells festgelegt werden und ob die zu beschaffenden, produzierenden und transportierenden Mengen geplant werden. Da in dieser Arbeit insbesondere die Zulieferer berücksichtigt werden, wird des Weiteren geprüft, ob die Auswahl der Zulieferer explizit im Modell Beachtung findet. Durch die Analyse der Entscheidungsvariablen der verschiedenen Modelle zum Supply Chain Design kann untersucht werden, ob die relevanten Bestandteile der Planung einer Supply Chain in den Modellen beachtet wird.<sup>33</sup>

<sup>30</sup> Vgl. zu den verschiedenen Aufgaben des Supply Chain Design Abschnitt 2.2.2.

<sup>31</sup> Vgl. zu den verschiedenen Zielsetzungen des Supply Chain Design etwa Werners/Thorn/Freiwald (2003), S. 10ff. und ausführlich Abschnitt 2.2.2.

<sup>32</sup> Vgl. etwa Chopra/Meindl (2004), S. 99f.; Simchi-Levi/Kaminski/Simchi-Levi (2003), S. 8.

<sup>33</sup> Vgl. Abschnitt 2.2.2 zu den Aufgaben des Supply Chain Design.

### *Einflussfaktoren*

Einflussfaktoren sind Faktoren, die durch den Entscheider im Rahmen des vorgestellten Ansatzes nicht beeinflusst werden, jedoch für die zu untersuchende Fragestellung relevant sind. Dazu gehört insbesondere die Kundennachfrage, jedoch auch die Kapazitäten der Produktionsstandorte und Lager, falls diese nicht im Rahmen des Modells festgelegt werden. Darüber hinaus können die Kapazitäten der Zulieferer oder auch internationale Aspekte wie Local Content-Bedingungen oder maximale Einfuhrmengen die Entscheidungen beeinflussen. Bei den stochastischen Modellen ist es sinnvoll, hinsichtlich der Einflussfaktoren zusätzlich zwischen sicheren und unsicheren Einflussfaktoren zu unterscheiden. Dabei können beispielsweise die Kundennachfrage, die Verkaufspreise oder die verschiedenen Kosten unsicher sein. Insbesondere hinsichtlich des Ziels Liefertermintreue können unsichere Lieferzeiten der Zulieferer oder im Rahmen internationaler Fragestellungen unsichere Wechselkurse relevant sein.

### *Anzahl der Produkte*

Hinsichtlich der Anzahl der Produkte ist zu analysieren, ob die vorgestellten Optimierungsmodelle lediglich ein zu fertigendes Produkt oder mehrere Produkte erfassen.

### *Planungshorizont*

Der Planungshorizont beinhaltet die Unterscheidung zwischen statischen bzw. dynamischen Modellen. In diesem Zusammenhang wird zwischen einperiodigen und damit statischen und mehrperiodigen und damit dynamischen bzw. komparativ-statischen Modellen unterschieden.

### *Netzwerk*

Im Rahmen der Konfiguration einer Supply Chain sind verschiedene Ebenen, wie die Ebene der Zulieferer, der Produktionsstätten, der Lager und der Kunden sowie die Transporte zwischen diesen Ebenen zu berücksichtigen. Werden insgesamt drei Ebenen erfasst, so finden die Transporte in zwei Stufen statt und es handelt sich somit um ein zweistufiges Netzwerk.<sup>34</sup> Bei der folgenden Analyse der Modelle zum Supply Chain Design wird zwischen zwei- und mehrstufigen Modellen unterschieden.

### *Anwendung*

Neben der inhaltlichen und entscheidungstheoretischen Analyse der Modelle zum Supply Chain Design ist die praktische Anwendbarkeit von besonderem Interesse. So weisen Anwendungen aus dem Nahrungsmittelbereich etwa auf Grund der Haltbarkeit und damit der Lagerfähigkeit der Produkte andere Charakteristika auf als Anwendungen aus der chemischen Industrie mit kontinuierlichen Gütern oder Anwendungen aus

<sup>34</sup> Vgl. die Ausführungen in Abschnitt 2.1.1.

dem Bereich der Computerherstellung mit konvergierenden, modularen Produktionsstrukturen.

In den folgenden Unterkapiteln werden deterministische und stochastische Modelle zur Unterstützung der Konfiguration einer Supply Chain kurz vorgestellt und mit Hilfe der erläuterten Charakteristika analysiert.

## 3.2 Supply Chain Design unter Sicherheit

### 3.2.1 Supply Chain Design mit deterministischen Modellen

In diesem Abschnitt werden mathematische Modelle zur Unterstützung des Supply Chain Design vorgestellt. In einem ersten Schritt wird von einer Entscheidungssituation unter Sicherheit ausgegangen, d. h. der Entscheider kennt im Vorhinein die für das Entscheidungsproblem relevanten Bestandteile des Umweltzustandes, wie etwa die zukünftige Nachfrage nach verschiedenen Produkten in den verschiedenen Perioden.<sup>35</sup> Für die entsprechenden mathematischen Modelle bedeutet dies, dass alle Parameter der Zielfunktion und der Restriktionen als bekannt vorausgesetzt werden. Es handelt sich infolgedessen um deterministische Modelle.<sup>36</sup>

Wie in Abschnitt 2.2.1 dargestellt, enthält das Supply Chain Design Elemente des Production-Distribution System Design, so dass im Folgenden auch einige grundlegende Modelle zur Festlegung der Konfiguration von Produktions- und Distributionsnetzwerken vorgestellt werden. Dem Supply Chain Design werden jedoch im Hinblick auf die im Folgenden zu analysierenden Modelle lediglich Ansätze zugeordnet, die mindestens zweistufig sind, d. h. beispielsweise die drei Ebenen Zulieferer, Produktionsstätten und Kunden betrachten. Da das Supply Chain Design auf Grund des langfristigen Planungshorizonts einen strategischen Charakter hat, wird des Weiteren gefordert, dass die Standortplanung Bestandteil des Supply Chain Design ist, um diese als strategische Modelle von den Modellen zum taktischen Supply Chain Planning abzugrenzen.<sup>37</sup>

Einen Ansatz zum Produktions- und Distributionsdesign in Form eines gemischt-ganzzahligen linearen Modells stellen Kaufman, Vanden Eede und Hansen bereits 1977 vor.<sup>38</sup> Bei diesem auf dem Simple Plant Location-Modell<sup>39</sup> beruhenden Ansatz werden

<sup>35</sup> Vgl. zu verschiedenen Entscheidungssituationen etwa Bamberg/Coenenberg (2002), S. 15ff.

<sup>36</sup> Vgl. etwa Domschke/Drexel (2005), S. 6.

<sup>37</sup> Vgl. etwa Fleischmann/Meyr/Wagner (2002), S. 77ff. sowie Abschnitt 2.1.2.

<sup>38</sup> Vgl. Kaufman/Vanden Eede/Hansen (1977).

<sup>39</sup> Zum Simple Plant Location-Modell und weiteren Standortplanungsmodellen vgl. etwa Domschke/Drexel (1996), S. 51ff. sowie Hale/Moberg (2003) und die dort angegebene Literatur.

die Standorte der Produktionsstätten und der Lager sowie die Transporte zwischen diesen und den Kunden geplant. Interessant ist an diesem Ansatz, dass die Entscheidungsvariable  $x_{ijc}$  den Anteil an der gesamten Nachfrage des Kunden  $c$  angibt, der von Produktionsstandort  $i$  über Lager  $j$  zu dem Kunden  $c$  transportiert wird. Für die Standortentscheidungen der Produktionsstätten und Lager werden die Binärvariablen  $yp_i$  bzw.  $yl_j$  verwendet. Die Zielsetzung umfasst die Minimierung der gesamten fixen Kosten für die Produktionsstandorte  $FEKP_i$  und Lager  $FEKL_j$  und die variablen Kosten des Materialflusses  $VK_{ijc}$ , die anfallen, wenn die gesamte Nachfrage des Kunden  $c$  an Standort  $i$  produziert und über Lager  $j$  zu Kunde  $c$  transportiert wird. Bei den Restriktionen wird die vollständige Erfüllung der Nachfrage (3.2) gefordert, die Kapazitäten der Produktionsstandorte und Lager bleiben jedoch unberücksichtigt. In der nachfolgend dargestellten Modellierung zeigt sich, dass die absolute Höhe der Nachfrage der Kunden nicht in das Modell eingeht. Dies ist jedoch ausschließlich dann möglich, sofern eine Berücksichtigung von Kapazitäten nicht erforderlich ist.

$$\text{Min } \sum_{i=1}^I FEKP_i \cdot yp_i + \sum_{j=1}^J FEKL_j \cdot yl_j + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{c=1}^C VK_{ijc} \cdot x_{ijc} \quad (3.1)$$

$$\text{s. d. } \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ijc} = 1 \quad \forall c \quad (3.2)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{ijc} \leq yp_i \quad \forall i, c \quad (3.3)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ijc} \leq yl_j \quad \forall j, c \quad (3.4)$$

$$yp_i \leq yl_i \quad \forall i \quad (3.5)$$

$$yp_i, yl_j \in \{0, 1\}, x_{ijc} \geq 0 \quad \forall i, j, c \quad (3.6)$$

Die Restriktionen (3.3) und (3.4) stellen sicher, dass der Materialfluss lediglich die Standorte betrifft, die auch errichtet werden, d. h. bei denen die Binärvariablen  $yp_i$  bzw.  $yl_j$  den Wert eins annehmen. Darüber hinaus wird mit Restriktion (3.5) erfasst, dass an jedem Produktionsstandort ebenfalls ein Lager errichtet wird. Der Definitionsbereich der Entscheidungsvariablen wird in (3.6) festgelegt.

Ein weiteres gemischt-ganzzahliges lineares Modell zur Produktions- und Distributionsplanung, bei welchem der Materialfluss ebenfalls als Anteil an der Gesamtnach-



frage modelliert wird, stellen Hinojosa, Puerto und Fernández vor.<sup>40</sup> Die Variable  $x_{pj}^t$  gibt den Anteil der Gesamtnachfrage des Kunden  $c$  nach Produkt  $p$  an, der von Lager  $j$  in Periode  $t$  erfüllt wird. Im Gegensatz zu dem Modell von Kaufman, Vanden Eede und Hansen werden hier der Mehrproduktfall, ein mehrperiodiger Planungshorizont sowie die Kapazitäten der Produktionsstätten und Lager erfasst. Jede Betrachtung des Materialflusses führt zu einer Multiplikation der Entscheidungsvariablen  $x_{pj}^t$  mit der Nachfrage des Kunden  $c$  nach Produkt  $p$   $D_{pc}^t$ , beispielsweise veranschaulicht an der folgenden Kapazitätsrestriktion.

$$\sum_{p=1}^P \sum_{c=1}^C D_{pc}^t \cdot x_{pj}^t \leq \text{KAPL}_j^{t,\max} \cdot y_j^t \quad \forall j, t \quad (3.7)$$

So wird der in Periode  $t$  von Lager  $j$  an den Kunden  $c$  gelieferte Anteil an der Gesamtnachfrage  $x_{pj}^t$  multipliziert mit der Gesamtnachfrage dieses Kunden nach diesem Produkt in dieser Periode, um sicherzustellen, dass die Kapazität  $\text{KAPL}_j^{t,\max}$  des Lagers  $j$  in der Periode  $t$  nicht überschritten wird. Gleichzeitig wird mit dieser Restriktion gewährleistet, dass eine Lagerung in einem Lager nur dann möglich ist, sofern das Lager in dieser Periode betrieben wird und dementsprechend die Binärvariable  $y_j^t$  den Wert eins annimmt.

Als Zielsetzung wird bei diesem Modell von Hinojosa, Puerto und Fernández die Summe der gesamten Transportkosten sowie der Fixkosten aus dem Betrieb der Standorte minimiert.<sup>41</sup> Die Kosten für die Eröffnung oder Schließung der Standorte sowie standortspezifische Produktionskosten bleiben unberücksichtigt. Bei den Restriktionen werden die vollständige Befriedigung der Nachfrage, die Einhaltung der Kapazitäten der verschiedenen Standorte sowie Mindestanforderungen an die Anzahl der Standorte erfasst. Bei diesem Ansatz ist insbesondere die Berücksichtigung der Mehrperiodigkeit hervorzuheben. Dabei wird aus Gründen der Planungsstabilität festgelegt, dass neu eröffnete Standorte während des Planungshorizonts nicht wieder geschlossen werden können. Falls zu Beginn der Planung existierende Standorte geschlossen werden, dürfen diese im Verlauf der Planung nicht wieder eröffnet werden.<sup>42</sup>

Die weitaus meisten Ansätze, die dem Supply Chain Design zuzuordnen sind, basieren jedoch nicht auf einer Modellierung des Materialflusses als Anteil an der Gesamtnachfrage, sondern auf einer Definition der Entscheidungsvariablen für den Materialfluss  $x_{pij}$ , die direkt die Menge des Produktes  $p$  angibt, die am Standort  $i$  produziert und zu Lager  $j$  transportiert wird. Des Weiteren kann eine Binärvariable  $z_{jc}$  verwendet wer-

<sup>40</sup> Vgl. Hinojosa/Puerto/Fernández (2000).

<sup>41</sup> Vgl. Hinojosa/Puerto/Fernández (2000).

<sup>42</sup> Die Modellierung dieser Besonderheiten mehrperiodiger Modelle wird in Abschnitt 3.4.3 vorgestellt.

den, die den Wert eins annimmt, wenn Kunde  $c$  von Lager  $j$  beliefert wird. Ein Modell, welches auf einer solchen Definition der Materialflussvariablen beruht, wird von Pooley bei einem Nahrungsmittelhersteller angewandt und kann wie folgt dargestellt werden:<sup>43</sup>

$$\text{Min } \sum_{i=1}^I \text{FEKP}_i \cdot y_{p_i} + \sum_{j=1}^J \text{FEKL}_j \cdot y_{l_j} + \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \text{VPK}_{pij} \cdot x_{p_{ij}} + \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J \sum_{c=1}^C \text{VLK}_{pjc} \cdot z_{s_{jc}} \cdot D_{pc} \quad (3.8)$$

$$\text{s. d. } \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J x_{p_{ij}} \leq \text{KAPP}_i^{\max} \cdot y_{p_i} \quad \forall i \quad (3.9)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{c=1}^C z_{s_{jc}} \cdot D_{pc} \leq \text{KAPL}_j^{\max} \cdot y_{l_j} \quad \forall j \quad (3.10)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{p_{ij}} = \sum_{j=1}^J \sum_{c=1}^C z_{s_{jc}} \cdot D_{pc} \quad \forall p \quad (3.11)$$

$$\sum_{j=1}^J z_{s_{jc}} = 1 \quad \forall c \quad (3.12)$$

$$y_{p_i}, y_{l_j}, z_{s_{jc}} \in \{0,1\}, x_{p_{ij}} \geq 0 \quad \forall p, i, j, c \quad (3.13)$$

Die Zielfunktion des Modells (3.8) minimiert die Summe aus variablen und fixen Kosten der Standorte, Produkte und Transporte. Als Restriktionen werden die Kapazitäten der Produktionsstandorte  $\text{KAPP}_i^{\max}$  (3.9) und Lager  $\text{KAPL}_j^{\max}$  (3.10) sowie die vollständige Erfüllung der Nachfrage (3.11) und eine Single-Sourcing Bedingung (3.12) für die Zuordnung Kunde zu Lager berücksichtigt. Für diese Single-Sourcing Bedingung ist die Binärvariable  $z_{s_{jc}}$  erforderlich, die den Wert eins annimmt, wenn Kunde  $c$  von Lager  $j$  beliefert wird. Die Multiplikation dieser Binärvariablen mit der Nachfrage  $D_{pc}$  des Kunden  $c$  nach Produkt  $p$  erlaubt die Erfassung von Lager- und Transportkosten je Einheit des Produktes  $p$  mit  $\text{VLK}_{pjc}$  in der Zielfunktion. Entgegen der ursprünglichen Modellierung von Pooley<sup>44</sup> ist bei mehr als einem festzulegenden Lagerstandort die Restriktion (3.11) wie in (3.11)' zu modellieren, um zu gewährleisten, dass die von einem Produktionsstandort  $i$  zu einem Lager  $j$  transportierten Mengen tatsächlich den von Lager  $j$  zu Kunde  $c$  transportierten Mengen entsprechen.

<sup>43</sup> Vgl. Pooley (1994).

<sup>44</sup> Vgl. Pooley (1994), S. 121, Restriktion (4).

$$\sum_{i=1}^I x_{p_{ij}} = \sum_{c=1}^C z_{s_{jc}} \cdot D_{pc} \quad \forall j, p \quad (3.11)'$$

Die Restriktion (3.11) erfasst die zu betrachtenden Produktionsmengen durch die Summation über alle Lagerstandorte  $j$  im Gegensatz zu Restriktion (3.11)' auf einer aggregierten Ebene. Dies stellt zwar sicher, dass die gesamte zur Nachfragebefriedigung erforderliche Menge produziert wird, nicht jedoch, dass diese Menge der Zuordnung  $z_{s_{jc}}$  entsprechend auf die Lager  $j$  verteilt wird.

Ein zu dem von Pooley ähnliches Modell stellen Pirkul und Jayaraman vor.<sup>45</sup> Es werden ebenfalls die Produktions- und Lagerstandorte geplant, wobei im Gegensatz zu dem Modell von Pooley die Anzahl der zu errichtenden Produktions- und Lagerstandorte exogen mit ANZP bzw. ANZL vorgegeben durch die folgenden Restriktionen festgelegt ist:

$$\sum_{i=1}^I y_{p_i} = \text{ANZP} \quad \text{bzw.} \quad \sum_{j=1}^J y_{l_j} = \text{ANZL} \quad (3.14)$$

In der Zielfunktion werden ebenfalls die Produktions-, Transport- und Errichtungskosten der Produktions- und Lagerstandorte minimiert. Ferner wird bei Pooley gefordert, jeden Kunden für alle Produkte nur von einem Lager beliefern zu lassen, wohingegen bei Pirkul und Jayaraman für verschiedene Produkte die Belieferung aus unterschiedlichen Lagern erlaubt ist. Dafür ist die Binärvariable  $z_{s_{jc}}$  durch  $z_{s_{pjc}}$  zu ersetzen, die den Wert eins annimmt, sofern Kunde  $c$  für Produkt  $p$  von Lager  $j$  beliefert wird. Des Weiteren ist Restriktion (3.12) durch die folgende Restriktion auszutauschen:

$$\sum_{j=1}^J z_{s_{pjc}} = 1 \quad \forall p, c \quad (3.15)$$

Die Restriktion (3.12) von Pooley hat zur Folge, dass die Lager viele verschiedene Produkte ggf. sogar alle Produkte führen, wohingegen bei Pirkul und Jayaraman produktspezifische Spezialisierungen der Lager ermöglicht werden.

Eine Vielzahl ähnlicher Modelle, die jedoch weitere Spezifikationen beinhalten, können auf diese Grundstruktur zurückgeführt werden. So haben etwa Jayaraman und Pirkul das bestehende Modell um eine weitere Ebene, die Ebene der Zulieferer erweitert.<sup>46</sup> Brown, Graves und Honczarenko berücksichtigen darüber hinaus die Zuordnung von Anlagen zu Produktionsstandorten und damit eine differenziertere Kapazitätspla-

<sup>45</sup> Vgl. Pirkul/Jayaraman (1996).

<sup>46</sup> Vgl. Jayaraman/Pirkul (2001).

nung.<sup>47</sup> Cohen und Lee setzen einen Schwerpunkt auf die Erfassung internationaler Aspekte, wie etwa Wechselkurse, länderspezifische Gewinnsteuersätze und Local Content-Bedingungen.<sup>48</sup> Die Forderung der vollständigen Erfüllung der Nachfrage wird bei Yan, Yu und Cheng durch einen Servicelevel  $\alpha$  ersetzt, der die mindestens zu erfüllende Nachfrage der Kunden angibt.<sup>49</sup> Eine weitere Zielsetzung wird bei Sabri und Beamon in Form einer Satisfizierungsfunktion für die Flexibilität berücksichtigt.<sup>50</sup> Dabei wird gefordert, dass die Gesamtflexibilität der Produktionsstätten und Warenverteilzentren, gemessen als Summe der Differenzen aus den vorhandenen Kapazitäten der Standorte und den tatsächlich genutzten Kapazitäten, mindestens einem Wert  $\epsilon$  entsprechen muss. Bei dem in der Literatur viel beachteten Modell von Arntzen et al.<sup>51</sup> wird ein mehrperiodiges Modell mit periodenübergreifender Lagerhaltung vorgestellt, bei welchem die Zielfunktion als gewichtete Summe aus Kosten und Zeit auf Grund der Interpretation des Zielfunktionswertes und die Kompensationsmöglichkeit höherer Kosten durch geringere Durchlaufzeiten kritisch zu sehen ist.<sup>52</sup> Eine sehr umfassende Erweiterung dieses vorgestellten Grundmodells ((3.8) - (3.13)) ist bei Fandel und Stammen zu finden, die den Planungshorizont in mehrere Perioden unterteilen, internationale Aspekte berücksichtigen und das Recycling der Produkte erfassen.<sup>53</sup>

Die Modellierung dieser und weiterer Aspekte wird im Rahmen des in Abschnitt 3.4 entwickelten Modells sowie der anwendungsspezifischen Detaillierungen und Erweiterungen aufgegriffen. Zunächst werden jedoch diese und einige weitere Modelle hinsichtlich struktureller und inhaltlicher Charakteristika analysiert.

### 3.2.2 Analyse und Bewertung der vorgestellten Modelle

Wie Tabelle 3.1 zeigt, weisen die vorgestellten Optimierungsmodelle zum Supply Chain Design hinsichtlich der Zielfunktion und der Restriktionen im Wesentlichen lineare Formulierungen auf. Lediglich der Ansatz von Cohen und Lee beinhaltet nichtlineare Restriktionen in Form von Local Content-Bedingungen.<sup>54</sup> Die Entscheidungsvariablen, die den Materialfluss abbilden, sind, sofern es sich um flüssige Produkte handelt oder der Materialfluss als Anteil an der Gesamtnachfrage modelliert wird, stetig. Werden hingegen beispielsweise modular zu fertigende Produkte betrach-

<sup>47</sup> Vgl. Brown/Graves/Honczarenko (1987).

<sup>48</sup> Vgl. Cohen/Lee (1989).

<sup>49</sup> Vgl. Yan/Yu/Cheng (2003).

<sup>50</sup> Vgl. Sabri/Beamon (2000).

<sup>51</sup> Vgl. Arntzen et al. (1995). In „ISI web of Science“ werden am 10.01.2005 97 Artikel genannt, in denen dieser Artikel zitiert wird.

<sup>52</sup> Vgl. Thorn (2002), S. 115.

<sup>53</sup> Vgl. Fandel/Stammen (2004).

<sup>54</sup> Vgl. Cohen/Lee (1989).

tet, wie diese etwa in der Computerherstellung zu finden sind, so ist zu erwarten, dass die Entscheidungsvariablen für den Materialfluss ganzzahlig sind. Auf Grund der zu erfassenden Standortentscheidungen und der Zuordnungen von Kunden oder Warenverteilzentren zu Produktionsstätten sind binäre bzw. bei einer Planung der Anzahl der Standorte weitere ganzzahlige Variablen erforderlich. Da die Standortplanung als Teil des Supply Chain Design als zwingender Bestandteil der Modelle gefordert ist, sind bei allen Modellen Binärvariablen vorhanden, so dass keines der Modelle ein stetiges Modell ist. Obwohl zwei der Modelle eine Anwendung aus der Computerherstellung nennen, sind bei allen Modellen die Materialflussvariablen nicht als ganzzahlig definiert, so dass es sich bei allen Modellen um gemischt-ganzzahlige Modelle handelt.

	Arntzen et al. (1995)	Brown et al. (1987)	Cohen/Lee (1989)	Dogan/Goetschalckx (1999) <sup>55</sup>	Fandel/Stammen (2004)	Hinojosa/Puerto/Fernández (2000)	Jang et al. (2002) <sup>56</sup>	Jayaraman/Pirkul (2001)	Jayaraman (1998)	Kaufman/Vanden Eede/Hansen (1977)	Pirkul/Jayaraman (1996)	Pooley (1994)	Sabri/Beamon (2000)	Schmidt/Wilhelm (2000)	van Roy (1989)	Wouda et al. (2002)	Yan/Yu/Cheng (2003)
<b>Zielfunktion/Restriktionen</b>																	
linear	x	x		(x)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
nichtlinear			x														
<b>Entscheidungsvariablen</b>																	
stetig																	
diskret																	
gemischt-ganzzahlig	x	x	x	(x)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

**Tabelle 3.1: Charakteristika deterministischer Optimierungsmodelle zum Supply Chain Design**

Die verschiedenen Modelle zum Supply Chain Design aus der Literatur werden im Folgenden anhand der Zielsetzung, der Entscheidungsvariablen, der Einflussfaktoren, der Anzahl der Produkte, des Planungshorizonts, des Netzwerks und der Anwendung charakterisiert. Einen Überblick über die Unterschiede und Gemeinsamkeiten der verschiedenen Modelle gibt Tabelle 3.2.

<sup>55</sup> Eine mathematische Darstellung des Modells fehlt, die verbale Erläuterung des Modells lässt jedoch eine solche Einordnung der entsprechenden mathematischen Formulierung vermuten.

<sup>56</sup> Darstellung des Modells zur Planung des Distributionsnetzwerks.

	Amutzen et al. (1995)	Brown et al. (1987)	Cohen/Lee (1989)	Dogan/Goetschalckx (1999)	Fandel/Stammen (2004)	Hinojosa/Puerto/Fernández (2000)	Jang et al. (2002) <sup>57</sup>	Jayaraman/Pirkul (2001)	Jayaraman (1998)	Kaufman/Vanden Eede/Hansen (1977)	Pirkul/Jayaraman (1996)	Pooley (1994)	Sabri/Beamon (2000)	Schmidt/Wilhelm (2000)	Van Roy (1989)	Wouda et al. (2002)	Yan/Yu/Cheng (2003)
<b>Zielsetzung</b>																	
Minimierung der Kosten	x	x		x		x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x
Maximierung des Gewinns			x		x									x			
Minimierung der Zeit	x																
<b>Entscheidungsvariablen</b>																	
Auswahl der Zulieferer			x		x												x
Produktionsstandortplanung	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Kapazitäten der Produktionsstandorte		x		x										x			
Lagerstandortplanung <sup>58</sup>			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x
Kapazitäten der Lager				x										x			
Beschaffungsmenge			x	x	x			x					x			x	x
Produktionsmenge	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Distributionsmenge	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<b>Einflussfaktoren</b>																	
Kundennachfrage	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Kapazitäten der Produktionsstandorte	x		x		x	x	x	x			x	x	x		x		x
Kapazitäten der Lager	x				x	x	x	x			x	x	x		x		x
Kapazitäten der Zulieferer			x	x	x			x					x			x	x
internationale Aspekte	x		x		x												
<b>Anzahl der Produkte</b>																	
ein Produkt										x							
mehrere Produkte	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x
<b>Planungshorizont</b>																	
einperiodig		x	x				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
mehriperiodig	x			x	x	x											
<b>Netzwerk</b>																	
zweistufig						x	x		x	x	x	x					x
mehrstufig	x		x	x	x			x					x	x	x		x
<b>Anwendung</b>																	
Nahrungsmittelindustrie		x										x					x
Computerhersteller	x		x														
chemische Industrie															x		

**Tabelle 3.2: Inhaltliche Charakteristika deterministischer Modelle zum Supply Chain Design**

<sup>57</sup> Darstellung des Modells zur Planung des Distributionsnetzwerks.

<sup>58</sup> Der Begriff Lager beinhaltet hier auch die Warenverteilzentren.

### *Zielsetzung*

Der überwiegende Teil der vorgestellten Ansätze verfolgt in der Zielsetzung die Kostenminimierung. Lediglich drei der betrachteten Ansätze berücksichtigen als Ziel die Gewinnmaximierung.<sup>59</sup> Bei fixen Preisen und der Forderung nach vollständiger Befriedigung der Nachfrage, wie in dem Ansatz von Schmidt und Wilhelm, entspricht eine Maximierung des Gewinns jedoch faktisch der Minimierung der Kosten.<sup>60</sup> Der einzige Ansatz, der zusätzlich zu den Kosten auch die Durchlaufzeit in einer gewichteten, additiven Verknüpfung berücksichtigt, ist der Ansatz von Arntzen et al.<sup>61</sup> Dies ist jedoch, wie bereits erwähnt, insbesondere im Rahmen der dafür erforderlichen Substituierbarkeit kritisch zu betrachten. Hervorzuheben ist darüber hinaus der Ansatz von Sabri und Beamon, der neben der Kostenminimierung die Flexibilität als Satisfizierungsziel, gemessen als Differenz aus verfügbarer und zur Produktion erforderlicher Kapazität, berücksichtigt.<sup>62</sup>

### *Auswahl der Zulieferer*

Wie sich in der zusammenfassenden Tabelle zeigt, wird in einigen Ansätzen die Auswahl der Zulieferer im Supply Chain Design zwar explizit mit Hilfe einer Binärvariable berücksichtigt, erfolgt jedoch ausschließlich auf Basis der Kosten<sup>63</sup> bzw. auf Basis des Gewinns<sup>64</sup> und damit über die Preise der zu beschaffenden Rohstoffe. Dies ist insbesondere bei Zulieferern, die Rohstoffe oder Teile liefern, die das Endprodukt im Hinblick auf die Qualität beeinflussen, oder auch bei Rohstoffen und Gütern, die Just-in-Time angeliefert werden sollen, kritisch zu hinterfragen.<sup>65</sup> Neben der Auswahl der Zulieferer über Binärvariablen kann die Auswahl der Zulieferer implizit über die zu beschaffenden Mengen erfolgen, d. h., wird einem Zulieferer eine Beschaffungsmenge von null hinsichtlich aller Produkte zugewiesen, so ist er nicht ausgewählt.<sup>66</sup> Dieses Vorgehen ist insbesondere anwendbar, wenn mit der Auswahl der Zulieferer keine fixen Kosten verbunden sind.

### *Kapazitätsplanung*

Die Kapazitäten der Produktionsstätten und Lager werden zwar in den meisten Ansätzen berücksichtigt, jedoch lediglich als exogen vorgegebene Obergrenze, die in den Restriktionen beachtet wird.<sup>67</sup> Da bei der Festlegung der Struktur einer Supply Chain

<sup>59</sup> Vgl. Cohen/Lee (1989); Fandel/Stammen (2004); Schmidt/Wilhelm (2000).

<sup>60</sup> Vgl. Schmidt/Wilhelm (2000).

<sup>61</sup> Vgl. Arntzen et al. (1995).

<sup>62</sup> Vgl. Sabri/Beamon (2000).

<sup>63</sup> Vgl. Yan/Yu/Cheng (2003).

<sup>64</sup> Vgl. Cohen/Lee (1989); Fandel/Stammen (2004).

<sup>65</sup> Für eine ausführliche Betrachtung der Zulieferer im Supply Chain Design vgl. Kapitel 4.

<sup>66</sup> Für Ansätze, die zwar die Beschaffungsmenge berücksichtigen, jedoch nicht die explizite Auswahl der Zulieferer vgl. Dogan/Goetschalckx (1999); Jayaraman/Pirkul (2001); Sabri/Beamon (2000); Wouda et al. (2002).

<sup>67</sup> Vgl. Tabelle 3.2 unter Einflussfaktoren „Kapazitäten Produktionsstandorte“ und „Kapazitäten Lager“.

die Planung der Kapazitäten als ein wesentlicher Bestandteil betrachtet wird,<sup>68</sup> sollte die Kapazität ein Bestandteil der Handlungsalternativen sein. Implizit kann die Festlegung der Kapazität etwa durch die Planung der Anlagen in den verschiedenen Produktionsstandorten erfolgen.<sup>69</sup> Je nach Art und Anzahl der Anlagen resultieren aus diesen Festlegungen unterschiedliche Kapazitäten der Produktionsstandorte.

### *Struktur der Supply Chain*

Hinsichtlich der Struktur der geplanten Supply Chain betrachten alle Ansätze mit Ausnahme des sehr frühen Ansatzes von Kaufman, Vanden Eede und Hansen den Mehrproduktfall.<sup>70</sup> Hinsichtlich der Stufigkeit wurden lediglich Ansätze betrachtet, die mindestens zwei Stufen berücksichtigen.<sup>71</sup> Dabei kann zwischen Ansätzen unterschieden werden, die die Anzahl der Stufen vorgeben und damit einen Teil der Struktur bereits im Vorhinein festlegen, sowie denen, die diese im Rahmen des vorgestellten Ansatzes festlegen. Die Festlegung der Anzahl der Stufen erfolgt insbesondere bei netzwerkorientierten Modellierungen, die in Form von Knoten und Kanten eher allgemein gehalten sind.<sup>72</sup> Hinsichtlich des Planungshorizonts lässt sich feststellen, dass die meisten Ansätze lediglich eine Periode berücksichtigen und es sich folglich um statische Modelle handelt. Wenige Autoren erfassen mehrere Perioden und ermöglichen auf diese Weise etwa saisonal schwankende Nachfragen oder periodenübergreifende Lagerhaltung einzubeziehen.<sup>73</sup>

### *Anwendung*

Ein Teil der vorgestellten Ansätze wurde bereits auf reale Problemstellungen angewandt. Die meisten beschriebenen Anwendungen sind im Bereich der Nahrungsmittelindustrie, etwa bei der Herstellung von Milchprodukten,<sup>74</sup> zu finden. Weitere Anwendungsbereiche sind die Computerherstellung<sup>75</sup> oder die chemische Industrie<sup>76</sup>. Die meisten Ansätze sind jedoch eher allgemein ausgerichtet und weisen keine branchenspezifischen Charakteristika auf.<sup>77</sup>

Die Planung der Struktur einer Supply Chain hat weit reichende Auswirkungen auf den Erfolg der beteiligten Unternehmungen und ist insbesondere auf Grund der Lang-

<sup>68</sup> Vgl. dazu die Ausführungen in Abschnitt 2.2.2.

<sup>69</sup> Vgl. Dogan/Goetschalckx (1999); Schmidt/Wilhelm (2000).

<sup>70</sup> Vgl. Kaufman/Vanden Eede/Hansen (1977).

<sup>71</sup> Eine Ausnahme bildet der Ansatz von Brown et al. (1987), der zwar einstufig ist, jedoch wegen der Planung der Kapazitäten aufgenommen wurde.

<sup>72</sup> Vgl. van Roy (1989).

<sup>73</sup> Vgl. Arntzen et al. (1995); Fandel/Stammen (2004); Hinojosa/Puerto/Fernández (2000).

<sup>74</sup> Vgl. Pooley (1994); Wouda et al. (2002).

<sup>75</sup> Vgl. Arntzen et al. (1995); Cohen/Lee (1989).

<sup>76</sup> Vgl. van Roy (1989).

<sup>77</sup> Vgl. etwa Hinojosa/Puerto/Fernández (2000); Jang et al. (2002).



fristigkeit des Planungshorizonts mit Unsicherheit verschiedener Einflussfaktoren verbunden. Im Folgenden werden daher die in der Literatur vorhandenen Modelle zum Supply Chain Design unter Unsicherheit vorgestellt.

### 3.3 Supply Chain Design unter Unsicherheit

#### 3.3.1 Supply Chain Design mit stochastischen Modellen

Da in der Literatur vorgestellte Modelle zum Supply Chain Design unter Unsicherheit nicht alle relevanten Aspekte der Berücksichtigung von Unsicherheit beinhalten, werden im Folgenden auch einige weitere Modelle vorgestellt, die interessante Formen der Unsicherheit berücksichtigen und zumindest einzelne Fragestellungen des Supply Chain Design umfassen, wie Modelle zur Kapazitätsplanung oder Planung der Distributionsstruktur unter Unsicherheit. Es wird sich zeigen, dass es sich bei den vorgestellten Modellen unter Unsicherheit um Modelle unter Risiko handelt und somit in diesem Unterkapitel von stochastischen Modellen zum Supply Chain Design gesprochen werden kann.

Einer der ersten Ansätze, der im weitesten Sinne dem Supply Chain Design unter Unsicherheit zugerechnet werden kann, ist der Ansatz von Cohen, Fisher und Jaikumar.<sup>78</sup> In dem gemischt-ganzzahligen Modell erfolgt die Auswahl der Zulieferer sowie die Auswahl der Vertragsart mit den verschiedenen Zulieferern und die Planung der Beschaffungs-, Produktions- und Distributionsmengen. Durch die verschiedenen Arten der Verträge mit den Zulieferern in Kombination mit von der Vertragsart abhängigen Mindest- und Maximalbestellmengen wird etwa die Erfassung mengenabhängiger Rabatte oder Lieferkosten ermöglicht. Eine Standort- oder Kapazitätsplanung der Produktionsstätten bzw. Lager als ein wesentlicher Bestandteil des Supply Chain Design erfolgt nicht explizit. Dennoch kann eine Planung implizit über die Produktions- und Transportmengen erfolgen, wobei eine Erfassung der fixen Kosten in Verbindung mit der Standortplanung dann jedoch nicht möglich ist. In der Zielfunktion wird in dem zunächst deterministischen Modell der Gewinn maximiert, wobei die Preise als prozentualer Anteil an den variablen Stückkosten erfasst werden. Die Restriktionen beinhalten die Kapazitäten der Produktionsstätten und Transportmittel, die Nachfrage nach den Produkten, die Stücklisten der verschiedenen herzustellenden Produkte sowie Local Content-Bedingungen. Die Unsicherheit wird bei diesem Ansatz bei den Verkaufspreisen und den Wechselkursen berücksichtigt, wobei dann die Differenz aus erwartetem Gewinn und der Varianz dieses Gewinns maximiert wird, was auf Grund der Varianz zu einer nichtlinearen Zielfunktion führt. Durch die Berücksichti-

<sup>78</sup> Vgl. Cohen/Fisher/Jaikumar (1989).

gung der Varianz zusätzlich zu dem erwarteten Gewinn wird versucht, das mit einer Handlungsalternative verbundene Risiko zu erfassen.<sup>79</sup>

Eine weitere Form der Unsicherheit, Unsicherheit hinsichtlich der nachgefragten Menge der Produkte, beachtet der Ansatz von Tsiakis, Shah und Pantelides.<sup>80</sup> Mit Hilfe eines gemischt-ganzzahligen linearen Modells werden die Standorte und Kapazitäten der Lager und Warenverteilzentren sowie die Produktions- und Distributionsmengen geplant. Im Gegensatz zum Supply Chain Design sind hier die Standorte der Produktionsstätten bekannt und sind nicht während der Planung festzulegen. Folglich handelt es sich eher um einen Ansatz zur Planung der Distributionsstruktur, der neben der bereits festgelegten Ebene der Produktionsstandorte eine Ebene der Lager und eine Ebene der Warenverteilzentren erfasst. Als Zielsetzung wird die Minimierung der gesamten Kosten, bestehend aus den Errichtungskosten der Lager und Warenverteilzentren, den Produktions- und Transportkosten sowie den variablen Betriebskosten der Lager und Warenverteilzentren, verfolgt. Die Restriktionen umfassen die Kapazitäten der Produktionsstandorte sowie die vollständige Erfüllung der Nachfrage. Die Autoren berücksichtigen die Unsicherheit bei der Nachfrage in Form verschiedener Nachfrage-szenarien. Diese Szenarien werden hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit des Eintreffens bewertet, so dass in der Zielfunktion die erwarteten Kosten zu minimieren sind. Unbefriedigte Nachfrage ist nicht vorgesehen, so dass es sich damit um ein Fat Solution-Modell handelt.<sup>81</sup>

MirHassani et al. stellen einen Ansatz vor, der ebenfalls die Unsicherheit hinsichtlich der Nachfrage nach den verschiedenen Produkten berücksichtigt.<sup>82</sup> Im Gegensatz zu dem Ansatz von Tsiakis, Shah und Pantelides<sup>83</sup> werden hier sowohl die Standorte als auch die Kapazitäten der Produktionsstätten festgelegt. Zwar erwähnen die Autoren darüber hinaus die Planung der Standorte und Kapazitäten der Warenverteilzentren in der Beschreibung des mathematischen Modells,<sup>84</sup> bei der formalen Darstellung des gemischt-ganzzahligen linearen Modells findet sich jedoch kein Hinweis auf die Modellierung dieser Planung in Form von Entscheidungsvariablen.<sup>85</sup> Es ist denkbar, dass die Standortplanung der Warenverteilzentren implizit über die Festlegung der transportierten Mengen erfolgt, d. h. bei einer Menge von null transportierten Einheiten wird kein Standort eröffnet. Dieses Vorgehen ermöglicht jedoch nicht ohne weiteres die Berücksichtigung von fixen Kosten im Zusammenhang mit der Errichtung und

<sup>79</sup> Vgl. für eine ausführliche Darstellung der Zielfunktion auch Hodder/Dincer (1986), S. 602f.

<sup>80</sup> Vgl. Tsiakis/Shah/Pantelides (2001).

<sup>81</sup> Der Begriff des Fat Solution-Modells wird in Abschnitt 5.2 erläutert.

<sup>82</sup> Vgl. MirHassani et al. (2000). Das Modell wird ausführlich dargestellt in Lucas/Messina/Mitra (1997).

<sup>83</sup> Vgl. Tsiakis/Shah/Pantelides (2001).

<sup>84</sup> Vgl. MirHassani et al. (2000), S. 516.

<sup>85</sup> Vgl. Lucas/Messina/Mitra (1997), S. 83.

dem Betrieb der Warenverteilzentren in der Zielfunktion. Ist eine Erfassung von Fixkosten erwünscht, so ist eine Modellierung analog zu der der Produktionsstätten erforderlich. In der Zielfunktion werden neben den fixen und variablen Kosten Strafkosten für die unbefriedigte Nachfrage in den verschiedenen Perioden berücksichtigt. Der Unsicherheit der Nachfrage wird mittels unterschiedlicher Szenarien Rechnung getragen, die in Form der Gewinnerwartungswertmaximierung aggregiert werden, so dass es sich dann in Kombination mit den Strafkosten für die unerfüllte Nachfrage um ein stochastisches Kompensationsmodell handelt.<sup>86</sup>

Eine Erweiterung des zuvor erläuterten Ansatzes findet sich bei Lucas et al.<sup>87</sup> Neben der Planung der Standorte der Produktionsstätten und Warenverteilzentren erfolgt in dem gemischt-ganzzahligen linearen Modell die Planung der Anlagen an den verschiedenen Standorten. An den Produktionsstandorten wird dabei zwischen Produktions- und Verpackungsanlagen unterschieden. Da die Anlagen über verschiedene Kapazitäten verfügen, werden auf diese Weise die Kapazitäten der verschiedenen Standorte determiniert. In der Zielfunktion wird die Differenz aus Erlösen und Kosten maximiert. Die Restriktionen gewährleisten, dass an einem Standort nur Anlagen errichtet werden können, wenn der Standort auch eröffnet wird. Darüber hinaus werden Restriktionen, die den Materialfluss oder die Kapazitäten betreffen sowie eine exogen vorgegebene Anzahl maximal zu errichtender Anlagen beachtet. Die Unsicherheit wird bei diesem Ansatz in Form von Nachfrageszenarien und einem zweistufigen Kompensationsmodell erfasst.

Vidal und Goetschalckx stellen ein gemischt-ganzzahliges lineares Modell vor, welches die Zulieferer und die Produktionsstandorte festlegt und die zu beschaffenden Mengen der Rohstoffe und die Produktions- und Distributionsmengen der verschiedenen Produkte sowie den Transportmodus plant.<sup>88</sup> In der Zielfunktion wird die Minimierung der Summe der Beschaffungs-, Produktions-, Transport- und Lagerhaltungskosten sowie der fixen Kosten der Produktionsstandorte verfolgt. Die Restriktionen berücksichtigen die Kapazitäten der Zulieferer und Produktionsstätten sowie die vollständige Befriedigung der Kundennachfrage. Die Unsicherheit wird in diesem Ansatz in Form der Lieferzeit produktionskritischer Rohstoffe berücksichtigt. Ausgehend von Daten der Vergangenheit wird zunächst für jeden Zulieferer die Wahrscheinlichkeit ermittelt, dass dieser rechtzeitig liefert. Für jeden Standort und jedes Produkt, das kritische Rohstoffe erfordert, wird anschließend in einer Restriktion gefordert, dass eine Zielwahrscheinlichkeit der rechtzeitigen Lieferung nicht unterschritten wird. Ausgehend von erwarteten Lieferzeiten der verschiedenen Zulieferer und den zugehö-

<sup>86</sup> Vgl. zu verschiedenen stochastischen Optimierungsmodellen Abschnitt 5.2.

<sup>87</sup> Vgl. Lucas et al. (2001).

<sup>88</sup> Vgl. Vidal/Goetschalckx (2000).

rigen Varianzen werden die gewünschten Sicherheitsbestände ermittelt und in der Zielfunktion in Form von Lagerhaltungskosten berücksichtigt.

Alonso-Ayuso et al. stellen ein gemischt-ganzzahliges lineares Modell vor, welches neben der Produktionsstandortplanung und Auswahl der Zulieferer sowie der Planung der Beschaffungs-, Produktions-, Distributions- und Lagerhaltungsmengen die Planung der Kapazitäten der Produktionsstätten erfasst.<sup>89</sup> In der Zielfunktion wird die Maximierung der Erlöse abzüglich der Beschaffungs-, Produktions- und Transportkosten sowie der periodisierten Abschreibungen der Investitionen verfolgt. Bei den Restriktionen werden eine Obergrenze für die Anzahl zu eröffnender Produktionsstandorte sowie Ober- und Untergrenzen für die Anzahl dort produzierbarer Endprodukte berücksichtigt. Darüber hinaus wird beachtet, dass einmal eröffnete Standorte in den nachfolgenden Perioden nicht wieder geschlossen werden, dass Kapazitätserweiterungen der Produktionsstandorte nur in bestimmten Perioden erfolgen können, und dass das für Kapazitätserweiterungen vorgesehene Budget nicht überschritten wird. Weitere Restriktionen stellen sicher, dass die Stücklisten für die verschiedenen Produkte abgebildet und die dafür erforderlichen Rohstoffe in ausreichender Menge in den verschiedenen Perioden vorhanden sind. Die Unsicherheit wird in diesem Ansatz einerseits bei den Zielfunktionskoeffizienten in Form der Verkaufspreise, der Beschaffungskosten der Rohstoffe und der Produktionskosten sowie andererseits bei den Restriktionen in Form der Nachfrage nach den Produkten berücksichtigt. Ausgehend von verschiedenen Ausprägungen der unsicheren Faktoren werden diese zu Szenarien zusammengefasst, für die Wahrscheinlichkeiten angegeben werden können, wobei die Aggregation der Szenarien über den erwarteten Gewinn erfolgt und unbefriedigte Nachfrage mit Strafkosten in der Zielfunktion erfasst wird, so dass es sich um ein zweistufiges stochastisches Kompensationsmodell zur Berücksichtigung der Unsicherheit handelt.<sup>90</sup>

### 3.3.2 Analyse und Bewertung der vorgestellten Modelle

Die Charakteristika der vorgestellten stochastischen Optimierungsmodelle zum Supply Chain Design sind zusammenfassend in Tabelle 3.3 dargestellt. Ebenso wie bei den deterministischen Modellen sind die Modelle bis auf eine Ausnahme linear. Lediglich das mathematische Modell von Cohen, Fisher und Jaikumar weist bei Berücksichtigung unsicherer Daten eine nichtlineare Zielfunktion auf, da in dieser die Differenz aus erwartetem Gewinn und Varianz des Gewinns minimiert wird.<sup>91</sup> Auf Grund der Standortplanung mit Hilfe von Binärvariablen und der Planung der Beschaffungs-

<sup>89</sup> Vgl. Alonso-Ayuso et al. (2003).

<sup>90</sup> Vgl. zu verschiedenen stochastischen Optimierungsmodellen Abschnitt 5.2.

<sup>91</sup> Vgl. Cohen/Fisher/Jaikumar (1989).

Produktions- und Transportmengen mit Hilfe stetiger Variablen beinhalten alle vorgestellten Modelle sowohl stetige als auch binäre Entscheidungsvariablen, so dass es sich bei allen Modellen um gemischt-ganzzahlige Modelle handelt.

	Alonso-Ayuso et al. (2003)	Cohen/Fisher/Jaikumar (1989)	Lucas/Messina/Mitra (1997)	Lucas et al. (2001)	Tsiakis/Shah/Pantelides (2001)	Vidal/Goetschalckx (2000)
<b>Zielfunktion/Restriktionen</b>						
linear	x		x	x	x	x
nichtlinear		x				
<b>Entscheidungsvariablen</b>						
stetig						
diskret						
gemischt-ganzzahlig	x	x	x	x	x	x

**Tabelle 3.3: Charakteristika stochastischer Optimierungsmodelle zum Supply Chain Design**

Nachfolgend werden die in den vorgestellten stochastischen Optimierungsmodellen behandelten inhaltlichen Merkmale des Supply Chain Design zusammenfassend in Tabelle 3.4 dargestellt. Die Charakterisierung der Modelle erfolgt wie bei den deterministischen Modellen anhand der Zielsetzung, der Entscheidungsvariablen, der Anzahl der Produkte, des Planungshorizonts und des Netzwerks. Die Einflussfaktoren werden im Gegensatz zu den deterministischen Modellen in sichere und unsichere Einflussfaktoren unterteilt.

	Alonso-Ayuso et al. (2003)	Cohen/Fisher/Jaikumar (1989)	Lucas/Messina/Mitra (1997) <sup>92</sup>	Lucas et al. (2001)	Tsiakis/Shah/Pantelides (2001)	Vidal/Goetschalckx (2000)
<b>Zielsetzung</b>						
Minimierung der Kosten					x	x
Maximierung des Gewinns	x	x	x	x		
Minimierung der Zeit						
<b>Entscheidungsvariablen</b>						
Auswahl der Zulieferer	x	x				x
Produktionsstandortplanung	x		x	x		x
Kapazitäten der Produktionsstandorte	x		x	x		
Lagerstandortplanung			(x)	x	x	
Kapazitäten der Lager				x	x	
Beschaffungsmenge	x	x				x
Produktionsmenge	x	x	x	x	x	x
Distributionsmenge	x	x	x	x	x	x
<b>Sichere Einflussfaktoren</b>						
Kundennachfrage		x				x
Kapazitäten der Produktionsstandorte	x	x			x	x
Kapazitäten der Lager						
Kapazitäten der Zulieferer	x					x
internationale Aspekte		x				
<b>Unsichere Einflussfaktoren</b>						
Kundennachfrage	x		x	x	x	
Verkaufspreise	x	x				
Beschaffungskosten	x					
Produktionskosten	x					
Lieferzeit						x
Wechselkurs		x				
<b>Anzahl der Produkte</b>						
ein Produkt						
mehrere Produkte	x	x	x	x	x	x
<b>Planungshorizont</b>						
einperiodig					x	x
mehrperiodig	x	x	x	x		
<b>Netzwerk</b>						
zweistufig	x	x	x	x		x
mehrstufig					x	

**Tabelle 3.4: Inhaltliche Charakteristika stochastischer Modelle zum Supply Chain Design**

<sup>92</sup> Die Standortplanung der Lager wird zwar im Text erwähnt, jedoch im Modell nicht berücksichtigt.

### *Zielsetzungen*

Hinsichtlich der Zielsetzung werden in den vorgestellten Ansätzen ausschließlich die Ziele Kostenminimierung und Gewinnmaximierung verwendet. Dabei betrachten die Ansätze mit Gewinnmaximierung teilweise Unsicherheit hinsichtlich der Verkaufspreise,<sup>93</sup> der Nachfrage<sup>94</sup> oder sogar hinsichtlich der Verkaufspreise und der Nachfrage,<sup>95</sup> so dass die Zielsetzung Gewinnmaximierung nicht zwangsläufig zur gleichen Lösung führt wie die Zielsetzung einer Kostenminimierung.

### *Auswahl der Zulieferer*

Drei der vorgestellten Modelle zum Supply Chain Design unter Unsicherheit berücksichtigen die Auswahl der Zulieferer, wobei die Auswahl wie bei den Modellen unter Sicherheit ebenfalls häufig auf den Kosten basiert. Dies ist insbesondere kritisch, wenn wie bei Cohen, Fisher und Jaikumar<sup>96</sup> im Rahmen des Modells keine Lagerhaltung berücksichtigt wird und es auf diese Weise bei einer Umsetzung der ermittelten Lösung in der Realität zu Engpässen und damit zum Stillstand der Produktion kommen kann. Werden abweichend von den Ergebnissen des Modells in der Realität Lagerbestände gehalten, so sind die Ergebnisse des Modells nicht mehr zwingend optimal, da die Kosten dieser Lagerbestände unberücksichtigt bleiben. Selbst bei einer Berücksichtigung der Lagerhaltung in einem Modell<sup>97</sup> ist es sinnvoll, neben den Kosten beispielsweise die Liefertermintreue der Zulieferer einzubeziehen, da aus der Auswahl eines Zulieferers mit starken Lieferterminabweichungen höhere Sicherheitsbestände resultieren müssen, um einen unterbrechungsfreien Produktionsablauf zu gewährleisten. Eine Auswahl der Zulieferer, die nur auf der Grundlage des Preises der Rohstoffe bzw. der Kosten basiert, ist deshalb kritisch zu sehen.<sup>98</sup> Vidal und Goetschalckx überwinden diese Schwachstelle, indem vorgegeben wird, dass die Wahrscheinlichkeit, dass ein Produktionsstandort mit den für ein Produkt erforderlichen Rohstoffen liefertermintreu beliefert wird, mindestens  $\alpha$  betragen muss.<sup>99</sup>

### *Standortplanung*

Um besonders interessante Ansätze unter Unsicherheit, die dennoch Teilaspekte des Supply Chain Design beinhalten, vorzustellen, enthalten nicht alle der betrachteten Ansätze, wie bereits erläutert, die Standortplanung der Produktionsstätten.<sup>100</sup> Die Festlegung der Lagerstandorte erfolgt lediglich bei dem Ansatz von Tsiakis, Shah und

<sup>93</sup> Vgl. Cohen/Fisher/Jaikumar (1989).

<sup>94</sup> Vgl. Lucas/Messina/Mitra (1997); Lucas et al. (2001).

<sup>95</sup> Vgl. Alonso-Ayuso et al. (2003).

<sup>96</sup> Vgl. Cohen/Fisher/Jaikumar (1989).

<sup>97</sup> Vgl. Alonso-Ayuso et al. (2003).

<sup>98</sup> Vgl. dazu ausführlich die Darstellung in Kapitel 4.

<sup>99</sup> Vgl. Vidal/Goetschalckx (2000), S. 105ff.

<sup>100</sup> Vgl. Cohen/Fisher/Jaikumar (1989); Tsiakis/Shah/Pantelides (2001).

Pantelides, die darüber hinaus in einer weiteren Ebene die Standorte von Warenverteilzentren planen sowie bei dem Ansatz von Lucas et al.<sup>101</sup> Bei dem Ansatz von Lucas, Messina und Mitra bzw. bei der entsprechenden verbalen Formulierung von MirHassani et al. wird zwar im Text die Planung der Lagerstandorte<sup>102</sup> in Form von Warenverteilzentren erwähnt, in dem vorgestellten Modell findet sich jedoch kein Hinweis darauf.<sup>103</sup>

### *Kapazitätsplanung*

Die Kapazitätsplanung der Produktionsstandorte wird bei drei der vorgestellten Ansätze berücksichtigt.<sup>104</sup> Dabei findet sich bei dem Ansatz von Alonso-Ayuso et al. die Berücksichtigung der Kapazität der Produktionsstandorte sowohl bei den Entscheidungsvariablen als auch bei den Einflussfaktoren. Dies liegt daran, dass bei den Restriktionen eine Mindestauslastung der festgelegten Kapazitätsstufen der Produktionsstätten gefordert wird. Alle anderen vorgestellten Ansätze berücksichtigen die Kapazitäten der Produktionsstätten zumindest in Form von Restriktionen und damit als Einflussfaktoren. Im Gegensatz dazu bleiben die Kapazitäten der Lager bei den meisten Ansätzen sowohl bei den Entscheidungsvariablen als auch bei den Restriktionen unberücksichtigt. Dies resultiert daraus, dass der überwiegende Teil der Ansätze bereits die Standortplanung der Lager außer Acht lässt. Lediglich die Ansätze von Tsiakis, Shah und Pantelides und von Lucas et al. berücksichtigen somit die Kapazitätsplanung von Lagerstandorten und Warenverteilzentren.<sup>105</sup>

### *Unsicherheit*

Die Berücksichtigung der meisten unsicheren Einflussfaktoren weist der Ansatz von Alonso-Ayuso auf.<sup>106</sup> Neben der Unsicherheit hinsichtlich der Nachfrage nach den Produkten wird in diesem Ansatz auch die Unsicherheit der Beschaffungskosten, der Produktionskosten und der Verkaufspreise berücksichtigt. Die Unsicherheit bei den Verkaufspreisen bedingt, dass die Zielfunktion der Gewinnmaximierung nicht der Zielfunktion der Kostenminimierung entspricht.<sup>107</sup> Als häufigste Form der Unsicherheit wird die Nachfrageunsicherheit beachtet.<sup>108</sup> Der Ansatz von Vidal und Goetschalckx erfasst jedoch stattdessen die Unsicherheit hinsichtlich der Lieferzeit der Zulieferer, um insbesondere bei produktionskritischen Rohstoffen eine Verzögerung

<sup>101</sup> Vgl. Lucas et al. (2001); Tsiakis/Shah/Pantelides (2001).

<sup>102</sup> Vgl. MirHassani (2000), S. 516f.

<sup>103</sup> Vgl. Lucas/Messina/Mitra (1997), S. 83ff.

<sup>104</sup> Vgl. Alonso-Ayuso et al. (2003); Lucas/Messina/Mitra (1997); Lucas et al. (2001).

<sup>105</sup> Vgl. Lucas et al. (2001); Tsiakis/Shah/Pantelides (2001).

<sup>106</sup> Vgl. Alonso/Ayuso et al. (2003).

<sup>107</sup> Vgl. für ein Modell zur Gewinnmaximierung in Verbindung mit unsicheren Verkaufspreisen etwa Cohen/Fisher/Jaikumar (1989).

<sup>108</sup> Vgl. Alonso-Ayuso et al. (2003); Lucas/Messina/Mitra (1997); Tsiakis/Shah/Pantelides (2001).



der Produktion oder hohe Lagerbestände zu vermeiden.<sup>109</sup> Der Ansatz von Cohen, Fisher und Jaikumar beinhaltet als einziger Ansatz internationale Aspekte in Form von unsicheren Wechselkursen.<sup>110</sup> In den vorgestellten Modellen wird die Unsicherheit bei den meisten Ansätzen in Form eines Erwartungswertes gegebenenfalls mit Kompensation der Unzulässigkeit berücksichtigt.<sup>111</sup> Lediglich der Ansatz von Vidal und Goetschalckx basiert auf einer Wahrscheinlichkeit, mit der eine Restriktion eingehalten werden soll, und kann damit den Chance-Constrained-Modellen<sup>112</sup> zugeordnet werden.<sup>113</sup> Der Ansatz von Cohen, Fisher und Jaikumar berücksichtigt neben dem Erwartungswert in der Zielfunktion ein Maß für die Streuung, um neben dem erwarteten Gewinn einer Handlungsalternative das mit dieser verbundene Risiko zu erfassen.<sup>114</sup>

### *Struktur der Supply Chain*

Alle vorgestellten Ansätze betrachten den Mehrproduktfall. Hinsichtlich des Planungshorizonts ist die Berücksichtigung mehrerer Perioden insbesondere in Verbindung mit unsicherer Nachfrage sinnvoll, sofern eine Abbildung saisonal bedingter Nachfrageschwankungen erforderlich ist. Dies wird bei vier der betrachteten Ansätze berücksichtigt. Lediglich die Ansätze von Tsiakis, Shah und Pantelides sowie von Vidal und Goetschalckx betrachten einen einperiodigen Planungshorizont.<sup>115</sup>

### *Anwendung*

Die Modelle unter Unsicherheit umfassen teilweise bereits zahlreiche Aspekte, die im Rahmen des Supply Chain Design relevant sind,<sup>116</sup> eine praktische Anwendung wird jedoch im Gegensatz zu den vorgestellten deterministischen Modellen in keinem der vorgestellten Ansätze erläutert.

## **3.4 Entwicklung eines umfassenden Modells zum Supply Chain Design**

### **3.4.1 Modellierung der Grundstruktur**

Ausgehend von den in den vorhergehenden Abschnitten erläuterten Modellen zum Supply Chain Design wird in diesem Abschnitt ein grundlegendes Optimierungsmodell vorgestellt, welches auf den verschiedenen Modellen der Literatur basiert. Hinsichtlich der Variablen wird eine einheitliche Deklaration verwendet. In einem

<sup>109</sup> Vgl. Vidal/Goetschalckx (2000).

<sup>110</sup> Vgl. Cohen/Fisher/Jaikumar (1989).

<sup>111</sup> Vgl. Alonso-Ayuso et al. (2003); Cohen/Fisher/Jaikumar (1989); Lucas et al. (2001); Lucas/Messina/Mitra (1997); Tsiakis/Shah/Pantelides (2001).

<sup>112</sup> Vgl. für eine Erläuterung von Chance-Constrained-Modellen Abschnitt 5.2.1.

<sup>113</sup> Vgl. Vidal/Goetschalckx (2000).

<sup>114</sup> Vgl. Cohen/Fisher/Jaikumar (1989). Zur Eignung dieser Zielfunktionen zur Erzeugung robuster Lösungen vgl. Abschnitt 5.3.

<sup>115</sup> Vgl. Tsiakis/Shah/Pantelides (2001); Vidal/Goetschalckx (2000).

<sup>116</sup> Vgl. etwa Alonso-Ayuso et al. (2003).

ersten Schritt werden die eingesetzten Indizes, Daten und Entscheidungsvariablen erläutert:<sup>117</sup>

### Indizes und Indexmengen

$c = 1, \dots, C$	zu beliefernde Kunden
$i = 1, \dots, I$	potenzielle Produktionsstandorte
$j = 1, \dots, J$	potenzielle Lagerstandorte <sup>118</sup>
$p = 1, \dots, P$	Produkte
$r = 1, \dots, R$	Rohstoffe
$z = 1, \dots, Z$	Zulieferer

### Daten

$A_{rp}$	Bedarfskoeffizient, Menge des Rohstoffs $r$ , die erforderlich ist, um eine Einheit des Produktes $p$ herzustellen
$B_{pi}$	Kapazitätsinanspruchnahme des Produktionsstandortes $i$ für die Produktion einer Einheit des Produktes $p$
$C_{pj}$	Kapazitätsinanspruchnahme des Lagers $j$ für eine Einheit des Produktes $p$
$D_{pc}$	Nachfrage von Kunde $c$ nach Produkt $p$
$FBKP_i$	Fixe Kosten für den Betrieb des Produktionsstandortes $i$
$FBKL_j$	Fixe Kosten für den Betrieb des Lagers $j$
$FEKP_i$	Fixe Kosten, die anfallen, wenn am Standort $i$ ein Produktionsstandort errichtet wird
$FEKL_j$	Fixe Kosten, die anfallen, wenn am Standort $j$ ein Lager errichtet wird
$KAPL_j^{\max}$	Kapazitätsobergrenze des Lagers $j$
$KAPP_i^{\max}$	Kapazitätsobergrenze des Produktionsstandortes $i$
$KAPZ_{rz}^{\min}$	Mindestbestellmenge des Rohstoffs $r$ bei Zulieferer $z$
$KAPZ_{rz}^{\max}$	Maximale Bestellmenge des Rohstoffs $r$ bei Zulieferer $z$
$VBK_{rzi}$	Variable Beschaffungskosten für eine Einheit des Rohstoffs $r$ von Zulieferer $z$ und Lieferung bis zum Produktionsstandort $i$
$VLK_{pj}$	Variable Lagerhaltungs- bzw. Kommissionierkosten für eine Einheit des Produktes $p$ in Lager $j$

<sup>117</sup> Daten sind durch Großbuchstaben gekennzeichnet, Variablen durch Kleinbuchstaben.

<sup>118</sup> Diese Ebene kann an Stelle der Lager auch Warenverteilzentren beinhalten.

$VPK_{pi}$	Variable Produktionskosten für eine Einheit des Produktes $p$ am Standort $i$
$VTKP_{ij}$	Variable Transportkosten von Produktionsstandort $i$ zu Lager $j$
$VTKL_{jc}$	Variable Transportkosten von Lager $j$ zu Kunde $c$

### Entscheidungsvariablen

$xb_{rzi}$	Menge des Rohstoffs $r$ , die von Zulieferer $z$ an Produktionsstandort $i$ geliefert wird
$xp_{pij}$	Menge des Produktes $p$ , die in Produktionsstandort $i$ produziert und zu Lager $j$ transportiert wird
$xl_{pjc}$	Menge des Produktes $p$ , die von Lager $j$ zu Kunde $c$ transportiert wird

$$yp_i = \begin{cases} 1, & \text{falls an Standort } i \text{ ein Produktionsstandort errichtet wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$yl_j = \begin{cases} 1, & \text{falls an Standort } j \text{ ein Lager errichtet wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$yz_{rz} = \begin{cases} 1, & \text{falls Rohstoff } r \text{ von Zulieferer } z \text{ beschafft wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Mit Hilfe dieser Indizes, Daten und Entscheidungsvariablen lautet die mathematische Formulierung eines Grundmodells wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{Min } & \sum_{i=1}^I (FEKP_i + FBKP_i) \cdot yp_i + \sum_{j=1}^J (FEKL_j + FBKL_j) \cdot yl_j + \\ & \sum_{r=1}^R \sum_{z=1}^Z \sum_{i=1}^I VBK_{rzi} \cdot xb_{rzi} + \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (VPK_{pi} + VTKP_{ij}) \cdot xp_{pij} + \\ & \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J \sum_{c=1}^C (VLK_{pj} + VTKL_{jc}) \cdot xl_{pjc} \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\text{s. d. } \sum_{z=1}^Z xb_{rzi} \geq \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J A_{rp} \cdot xp_{pij} \quad \forall i, r \quad (3.17)$$

$$\sum_{i=1}^I xp_{pij} \geq \sum_{c=1}^C xl_{pjc} \quad \forall p, j \quad (3.18)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{1pj} = D_{pc} \quad \forall p, c \quad (3.19)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P B_{pi} \cdot x_{pji} \leq KAPP_i^{\max} \cdot y_{pi} \quad \forall i \quad (3.20)$$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P C_{pj} \cdot x_{1pj} \leq KAPL_j^{\max} \cdot y_{lj} \quad \forall j \quad (3.21)$$

$$KAPZ_{rz}^{\min} \cdot y_{zrz} \leq \sum_{i=1}^I x_{b_{rzi}} \leq KAPZ_{rz}^{\max} \cdot y_{zrz} \quad \forall r, z \quad (3.22)$$

$$x_{b_{rzi}}, x_{pji}, x_{1pj} \geq 0 \quad \forall r, z, p, i, j, c \quad (3.23)$$

$$y_{pi}, y_{lj}, y_{zrz} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, z \quad (3.24)$$

In dem vorgestellten Modell werden in der Zielfunktion (3.16) die fixen Kosten für die Errichtung und den Betrieb der Produktionsstätten und Lager sowie die variablen Beschaffungs-, Produktions-, Lagerhaltungs- und Transportkosten minimiert.<sup>119</sup> Falls darüber hinaus fixe Kosten in Verbindung mit der Belieferung durch einen Zulieferer berücksichtigt werden sollen, sind diese mit Hilfe der Binärvariablen  $y_{zrz}$  in die Zielfunktion aufzunehmen.<sup>120</sup> Ist eine Erfassung fixer Kosten sowie die Berücksichtigung von Mindestbestimmungen nicht erforderlich, sondern lediglich die Beachtung maximaler Bestellmengen für verschiedene Rohstoffe der Zulieferer, so ist die Verwendung der Binärvariablen  $y_{zrz}$  nicht erforderlich.

Hinsichtlich der Restriktionen können eine Vielzahl unterschiedlicher Anforderungen erfasst werden. In einem ersten Schritt muss sichergestellt werden, dass die Materialflüsse zwischen den verschiedenen Ebenen adäquat durch das Modell abgebildet werden. Restriktion (3.17) gewährleistet, dass ausreichend Rohstoffe von den Zulieferern beschafft werden, um die geforderte Menge der Produkte zu produzieren. Darüber hinaus wird in Restriktion (3.18) sichergestellt, dass von jedem Lager nur soviel zu den Kunden transportiert wird, wie vorher von den Produktionsstätten zu jedem Lager transportiert wurde. Restriktion (3.19) garantiert, dass zu jedem Kunden genau die nachgefragte Menge geliefert wird. Wird eine vollständige Befriedigung der Nachfrage nicht gefordert, so muss diese Gleichung in eine  $\leq$ -Restriktion umgewandelt werden. Dies ist jedoch nur sinnvoll, wenn etwa der Deckungsbeitrag maximiert wird,

<sup>119</sup> Eine ähnliche Zielfunktion findet sich etwa bei Sabri/Beamon (2000), S. 586.

<sup>120</sup> Vgl. für einen Ansatz, der eine Binärvariable  $y_z$  berücksichtigt, etwa Yan/Yu/Cheng (2003).

da in Kombination mit einer Kostenminimierung sonst eine Lösung ermittelt wird, bei der alle Entscheidungsvariablen den Wert null annehmen.

Restriktionen (3.20) und (3.21) sind weitere typische Nebenbedingungen für Modelle zum Supply Chain Design. Sie betreffen die logischen Zusammenhänge zwischen Standorten und Materialflüssen, d. h., es darf nur von oder zu einem Standort transportiert werden, sofern dieser auch eröffnet wurde. Diese logischen Abhängigkeiten werden im vorliegenden Modell mit Hilfe der Kapazitätsnutzung und den Kapazitätsobergrenzen erfasst.<sup>121</sup> Falls Kapazitäten außer Acht gelassen werden sollen, so sind die Kapazitätsobergrenzen durch eine sehr große Zahl  $M$  zu ersetzen.<sup>122</sup> Mindestbestellmengen bzw. Maximalbestimmungen eines Rohstoffs  $r$  bei jedem Zulieferer  $z$  werden in Restriktion (3.22) erfasst. Es muss eine Binärvariable  $yz_{rz}$  im Gegensatz zu einer Binärvariablen  $yz_z$  verwendet werden,<sup>123</sup> um die Mindestbestellmenge eines Rohstoffs  $r$  nur dann zu erfüllen, wenn dieser Rohstoff auch von diesem Zulieferer beschafft werden soll. Eine Binärvariable  $yz_z$  hat hingegen zur Folge, dass hinsichtlich aller Rohstoffe die Mindestbestimmungen erfüllt werden müssen, sobald auch nur ein Rohstoff von diesem Zulieferer beschafft werden soll. In einem letzten Schritt muss der Definitionsbereich der Entscheidungsvariablen mit (3.23) und (3.24) festgelegt werden.

Im folgenden Abschnitt werden weitere Restriktionen zur Detaillierung des Grundmodells sowie alternative Zielfunktionen vorgestellt.

### 3.4.2 Anwendungsspezifische Detaillierungen und Erweiterungen

#### Zusätzliche Indizes und Indexmengen

$a = 1, \dots, A$	Anlagentypen
$k = 1, \dots, K$	Modus, in dem ein Standort betrieben wird

#### Zusätzliche Daten

$\gamma$	Servicelevel
$ANZL^{\min}$	Minimale Anzahl Lager
$ANZL^{\max}$	Maximale Anzahl Lager
$ANZP^{\min}$	Minimale Anzahl Produktionsstandorte
$ANZP^{\max}$	Maximale Anzahl Produktionsstandorte

<sup>121</sup> Vgl. etwa Jayaraman/Pirkul (2001), S. 397.

<sup>122</sup> Vgl. zu diesem Vorgehen etwa Wouda et al. (2002).

<sup>123</sup> Vgl. Jayaraman/Pirkul (2001), S. 397f.; Sabri/Beamon (2000), S. 586.

$FBKA_{ai}$	Fixe Kosten des Betriebs einer Anlage des Typs a am Standort i
$FEKA_{ai}$	Fixe Kosten der Errichtung einer Anlage des Typs a am Standort i
$KAPA_a^{\max}$	Maximale Kapazität der Anlage a
$KL_k^{\min}$	Mindestauslastung des Lagermodus k
$KL_k^{\max}$	Maximalauslastung des Lagermodus k
$KP_k^{\min}$	Mindestauslastung des Produktionsmodus k
$KP_k^{\max}$	Maximalauslastung des Produktionsmodus k
$PR_{pc}$	Preis, den Kunde c für eine Einheit des Produktes p bezahlt
$R_{pr}$	Recyclingkoeffizient, Menge des Rohstoffs r, die aus einer zurückgegebenen Einheit des Produktes p resultiert
$RET_{pc}$	Menge des Produktes p, die von Kunde c zum Recycling zurückgegeben wird
SK	Strafkosten je Einheit unbefriedigter Kundennachfrage

### Zusätzliche Entscheidungsvariablen

$kap_j$	Kapazität des Lagerstandortes j
$kap_p$	Kapazität des Produktionsstandortes i
$xR_{pci}$	Menge des Produktes p, die von Kunde c zu Produktionsstandort i transportiert wird, um dort recycelt zu werden

$$y_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{falls an Standort j ein Lager der Kapazität k errichtet wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$y_{pik} = \begin{cases} 1, & \text{falls an Standort i eine Produktionsstätte der Kapazität k errichtet wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$z_{ai} = \begin{cases} 1, & \text{falls am Standort i eine Anlage des Typs a installiert wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$zS_{jc} = \begin{cases} 1, & \text{falls Kunde c für alle Produkte von Lager j beliefert wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$zS_{pjc} = \begin{cases} 1, & \text{falls Kunde c für Produkt p von Lager j beliefert wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

### Weitere Zielfunktionen

Wird an Stelle der Kostenminimierung eine Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags angestrebt, so können diese Modelle lediglich dann zu unterschiedlichen Ergebnissen führen, wenn die Preise als Entscheidungsvariablen im Modell festgelegt werden oder eine vollständige Befriedigung der Nachfrage nicht gefordert wird. Wird mit

$PR_{pc}$  der Preis, den Kunde  $c$  für eine Einheit des Produktes  $p$  zahlt, als Entscheidungsvariable in das Modell aufgenommen, so führt dies zu einer nichtlinearen Zielfunktion. Falls der Preis nicht durch Faktoren wie etwa die Dauer der Lieferzeit oder andere Faktoren beeinflusst wird und somit mit weiteren Entscheidungsvariablen und Restriktionen verknüpft ist, ist eine Berücksichtigung der Preise als Entscheidungsvariable nicht sinnvoll. Dies liegt daran, dass das Modell ohne geeignete Schranken für die Preise unbeschränkt ist und mit geeigneten Schranken für die Preise auf Grund der Maximierungszielfunktion die Werte der oberen Schranke als Ergebnis ermittelt. Eine Deckungsbeitragsmaximierung an Stelle einer Kostenminimierung ist dennoch sinnvoll, wenn bei unsicheren Nachfragemengen nicht für jedes Szenario eine vollständige Befriedigung der Nachfrage gefordert wird. Eine Zielfunktion, die die Kosten minimiert, kann beispielsweise bei Erfassung der Unzulässigkeiten durch Chance-Constraints<sup>124</sup> zu einer höheren unbefriedigten Nachfrage führen als die Zielfunktion der Deckungsbeitragsmaximierung. Die mathematische Formulierung der Zielfunktion, die den Gesamtdeckungsbeitrag maximiert, lautet wie folgt:<sup>125</sup>

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J \sum_{c=1}^C PR_{pc} \cdot x_{1pj} - \left[ \sum_{i=1}^I (FEKP_i + FBKP_i) \cdot y_{p_i} + \sum_{j=1}^J (FEKL_j + FBKL_j) \cdot y_{l_j} + \right. \\ & \sum_{r=1}^R \sum_{z=1}^Z \sum_{i=1}^I VBK_{rzi} \cdot x_{b_{rzi}} + \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (VPK_{pi} + VTKP_{ij}) \cdot x_{p_{pij}} + \\ & \left. \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J \sum_{c=1}^C (VLK_{pj} + VTKL_{jc}) \cdot x_{1pj} \right] \end{aligned} \quad (3.25)$$

Die an die Kunden gelieferte Menge  $x_{1pj}$  wird mit den kundenspezifischen Preisen der Produkte  $PR_{pc}$  multipliziert, um die Erlöse zu erfassen. Von den Erlösen werden die entscheidungsrelevanten Kosten subtrahiert, die denen der Zielfunktion (3.16) entsprechen.

### *Befriedigung der Nachfrage*

Neben der vollständigen Befriedigung der Nachfrage ist es denkbar, dass die Nachfrage des Kunden  $c$  nach Produkt  $p$  mindestens zu einem Prozentsatz  $\gamma$ , der auch als Servicelevel bezeichnet wird, erfüllt werden soll. Dann ist die Restriktion (3.19) wie folgt zu modifizieren.<sup>126</sup>

<sup>124</sup> Vgl. zu Chance-Constraints Abschnitt 5.2.1. Bei einer Zulässigkeitswahrscheinlichkeit von 0,75 wird gefordert, dass beispielsweise bei vier gleichwahrscheinlichen Nachfrageszenarien lediglich die Nachfrage eines Szenarios nicht vollständig zu erfüllen ist. Die Zielsetzung der Kostenminimierung kann bei diesem Szenario dazu führen, dass möglichst wenig produziert wird, um die Kosten zu verringern, wohingegen bei der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags dennoch soviel produziert wird, bis die variablen Kosten sowie ggf. entstehende zusätzliche Fixkosten nicht mehr durch die Erlöse gedeckt sind.

<sup>125</sup> Vgl. ähnlich Schmidt/Wilhelm (2000), S. 1508.

<sup>126</sup> Vgl. etwa Yan/Yu/Cheng (2003), S. 2140.

$$\sum_{j=1}^J x_{l_{pjc}} \geq \frac{\gamma}{100} \cdot D_{pc} \quad \forall p, c \quad (3.19)'$$

### Anzahl Lager und Produktionsstätten

Soll die Anzahl der zu eröffnenden Produktionsstätten und Lager nach unten oder oben begrenzt werden, so sind die folgenden Restriktionen in das Modell zu integrieren:

$$ANZP^{\min} \leq \sum_{i=1}^I y_{p_i} \leq ANZP^{\max} \quad (3.26)$$

$$ANZL^{\min} \leq \sum_{j=1}^J y_{l_j} \leq ANZL^{\max} \quad (3.27)$$

### Single Sourcing

Um Single-Sourcing-Restriktionen aus Sicht der Kunden in das Modell integrieren zu können, ist eine weitere Binärvariable  $z_{jc}$  erforderlich, die angibt, ob das Lager  $j$  einem Kunden zugeordnet wird. Die Restriktion (3.28) stellt dann sicher, dass jeder Kunde für alle Produkte lediglich von einem Lager beliefert wird.<sup>127</sup>

$$\sum_{j=1}^J z_{jc} = 1 \quad \forall c \quad (3.28)$$

Darüber hinaus kann die Variable  $x_{l_{pjc}}$ , die die transportierten Mengen der verschiedenen Produkte von Lager  $j$  zu Kunde  $c$  festlegt, dann durch  $z_{jc} \cdot D_{pc}$  ersetzt werden. Die Zielfunktion und die Restriktionen, in denen  $x_{l_{pjc}}$  verwendet wird, sind dementsprechend zu modifizieren. Soll die Variable jedoch beibehalten werden, so ist Restriktion (3.29) einzufügen, die sicherstellt, dass nur von Lager  $j$  zu Kunde  $c$  transportiert wird, wenn die Belieferung des Kunden  $c$  auch aus diesem Lager vorgenommen wird.  $M$  stellt dabei eine hinreichend große Zahl dar.

$$\sum_{p=1}^P x_{l_{pjc}} \leq M \cdot z_{jc} \quad \forall j, c \quad (3.29)$$

Soll hingegen jeder Kunde für ein Produkt ausschließlich von einem Lager beliefert werden, so ist eine Binärvariable  $z_{spjc}$  erforderlich, die angibt, ob die Nachfrage nach Produkt  $p$  des Kunden  $c$  von Lager  $j$  beliefert wird.<sup>128</sup> Die erlaubt im Gegensatz zu Restriktion (3.28) eine Spezialisierung der Lager auf verschiedene Produkte. Eine

<sup>127</sup> Vgl. für einen Ansatz, der diese Modellierung verwendet etwa Sabri/Beamon (2000), S. 586.

<sup>128</sup> Vgl. zu dieser Art der Modellierung Pirkul/Jayaraman (1996), S. 294.



entsprechende Restriktion (3.28)', die gewährleistet, dass jedem Kunden für jedes Produkt lediglich ein Lager zugewiesen wird, ist dann einzufügen:

$$\sum_{j=1}^J z_{sjc} = 1 \quad \forall p, c \quad (3.28)'$$

Auch in diesem Fall kann  $x_{l_{pj}c}$  durch  $z_{sjc} \cdot D_{pc}$  ersetzt und die Zielfunktion sowie die jeweiligen Restriktionen geeignet modifiziert werden. Soll die Variable  $x_{l_{pj}c}$  nicht substituiert werden, gewährleistet Restriktion (3.29)', dass für jedes Produkt ein Transport von Lager  $j$  zu Kunde  $c$  nur erfolgt, wenn eine Zuordnung von Kunde und Lager existiert.

$$x_{l_{pj}c} \leq M \cdot z_{sjc} \quad \forall p, j, c \quad (3.29)'$$

### *Kapazitätsplanung*

Um eine Planung der Kapazitäten der Produktionsstandorte und Lager im Modell vorzunehmen, können zwei weitere Variablen  $kapp_i$  und  $kapl_j$  eingeführt werden, welche die Kapazität der Produktionsstätte  $i$  bzw. des Lagers  $j$  festlegen.<sup>129</sup> Dann muss eine Restriktion (3.30) bzw. (3.31) zur Beschränkung der Kapazitäten nach oben und unten eingeführt werden, falls der Produktionsstandort bzw. das Lager errichtet wird. Darüber hinaus sind bei den Restriktionen (3.20) und (3.21) die rechte Seite durch die Variable  $kapp_i$  bzw.  $kapl_j$  zu ersetzen.

$$KAPP_i^{\min} \cdot yp_i \leq kapp_i \leq KAPP_i^{\max} \cdot yp_i \quad \forall i \quad (3.30)$$

$$KAPL_j^{\min} \cdot yl_j \leq kapl_j \leq KAPL_j^{\max} \cdot yl_j \quad \forall j \quad (3.31)$$

Bei dieser Art der Modellierung der Kapazitäten der Produktionsstätten und Lager wird eine kontinuierliche Festlegung der Kapazitäten erlaubt. Die Kosten der unterschiedlichen Kapazitäten werden in der Zielfunktion allerdings nicht berücksichtigt.<sup>130</sup> Da unterschiedliche Kapazitäten jedoch häufig mit der Art der Anlagen bzw. der Anzahl der Anlagen verbunden sind und für die verschiedenen Anlagen ggf. je nach Automatisierungsgrad unterschiedliche Kosten anfallen, wird im Folgenden die Planung der Anlagen in Verbindung mit der Planung der Kapazitäten vorgestellt. Dafür ist eine binäre Entscheidungsvariable  $za_{ai}$  erforderlich, die angibt, ob eine Anlage des

<sup>129</sup> Vgl. zu dieser Art der Kapazitätsplanung Tsiakis/Shah/Pantelides (2001), S. 3590.

<sup>130</sup> Vgl. Tsiakis/Shah/Pantelides (2001), S. 3591f.

Typs  $a$  am Produktionsstandort  $i$  errichtet wird.<sup>131</sup> Mit Hilfe von Restriktion (3.32) muss sichergestellt werden, dass nur dann Anlagen errichtet werden dürfen, wenn der Produktionsstandort eröffnet wird.

$$z_{a_i} \leq y_{p_i} \quad \forall a, i \quad (3.32)$$

Beinhaltet die Entscheidungsvariable  $z_{a_i}$  an Stelle der Binärvariablen eine ganzzahlige Variable, die die Anzahl der Anlagen des Typs  $a$ , die am Standort  $i$  installiert werden, angibt, so muss statt der Restriktion (3.32) die Restriktion (3.33) eingefügt werden, die um eine hinreichend große Zahl  $M$  erweitert ist.

$$z_{a_i} \leq M \cdot y_{p_i} \quad \forall a, i \quad (3.33)$$

Des Weiteren müssen die Kosten für die Errichtung und den Betrieb der verschiedenen Anlagen etwa mit  $(FEKA_{a_i} + FBKA_{a_i}) \cdot z_{a_i}$  in der Zielfunktion berücksichtigt werden. Darüber hinaus ist die Restriktion (3.20) geeignet zu modifizieren, da sich die neue Gesamtkapazität des Standortes  $i$  aus der Summe der Einzelkapazitäten  $KAPA_a^{\max}$  der installierten Anlagen zusammensetzt:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P B_{p_i} \cdot x_{p_{ij}} \leq \sum_{a=1}^A KAPA_a^{\max} \cdot z_{a_i} \quad \forall i \quad (3.20)'$$

Eine Planung der Kapazitäten der Warenverteilzentren bzw. der Lager  $j$  entspricht der Modellierung für die Produktionsstandorte.

Eine weitere Möglichkeit, die Planung der Kapazitäten in einem Optimierungsmodell vorzunehmen, ist die Modifikation der bereits vorhandenen Entscheidungsvariablen.<sup>132</sup> Die Variablen  $y_{p_{ik}}$  bzw.  $y_{j_{ik}}$  geben an, ob ein Standort mit der Kapazität  $k$  errichtet wird. Die verschiedenen Kapazitäten können die Anlagen hinsichtlich Art und Anzahl umfassen, jedoch auch die Anzahl der eingesetzten Mitarbeiter oder die Zeit, in welcher der Produktionsstandort in Betrieb ist, etwa in einer Schicht an sechs Tagen einer Woche oder in zwei Schichten an fünf Tagen einer Woche. Es kann dann an Stelle der Kapazität  $kap$  auch vom Modus  $k$ , in dem der Standort betrieben wird, gesprochen werden.<sup>133</sup> An weiteren Daten sind hierfür die Mindest- und Maximalauslastung je Modus  $k$  erforderlich. Hinsichtlich der Restriktionen muss dann wie in Restriktion

<sup>131</sup> Vgl. dazu etwa Brown et al. (1987), S. 1470f.; Lucas et al. (2001), S. 1258f.; Lucas/Messina/Mitra (1997), S. 83ff.; Schmidt/Wilhelm (2000), S. 1507ff.

<sup>132</sup> Vgl. etwa Alonso-Ayuso et al. (2003), S. 104.

<sup>133</sup> Vgl. für eine Produktionsplanung mit verschiedenen Produktionsmodi etwa Kallrath/Wilson (1997), S. 303ff. oder Timpe/Kallrath (2000), S. 422ff.

(3.34) bzw. (3.35) sichergestellt werden, dass jede Produktionsstätte bzw. jedes Lager lediglich in einem Modus betrieben werden kann, und dass innerhalb der verschiedenen Modi zwischen Mindest- und Maximalauslastung produziert wird, wie in Restriktion (3.36) und (3.37) dargestellt.

$$\sum_{k=1}^K y_{pik} \leq 1 \quad \forall i \quad (3.34)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{1jk} \leq 1 \quad \forall j \quad (3.35)$$

$$\sum_{k=1}^K KP_k^{\min} \cdot y_{pik} \leq \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P B_{pi} \cdot x_{p_{ij}} \leq \sum_{k=1}^K KP_k^{\max} \cdot y_{pik} \quad \forall i \quad (3.36)$$

$$\sum_{k=1}^K KL_k^{\min} \cdot y_{1jk} \leq \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P C_{pj} \cdot x_{1_{pj}} \leq \sum_{k=1}^K KL_k^{\max} \cdot y_{1jk} \quad \forall j \quad (3.37)$$

In der Zielfunktion sind die fixen Kosten und ggf. auch die variablen Kosten, falls diese sich in den verschiedenen Modi  $k$  unterscheiden, mit einem weiteren Index  $k$  zu versehen und auch über diesen zu summieren.

### Recycling

Um die erneute Verwendung der Rohstoffe bei der Rückführung der Produkte von den Kunden an den Hersteller zu modellieren, ist eine Angabe der Mengen der von einem Kunden  $c$  zu entsorgenden Produkte  $p$   $RET_{pc}$  erforderlich. Des Weiteren ist eine zusätzliche Entscheidungsvariable  $x_{r_{pci}}$  notwendig, welche die Menge des Produktes  $p$  erfasst, die von Kunde  $c$  am Standort  $i$  recycelt wird. Die Menge des Rohstoffs  $r$ , die aus einer recycelten Einheit des Produktes  $p$  wiedergewonnen wird, gibt der Recyclingkoeffizient  $R_{pr}$  an.

$$\sum_{i=1}^I x_{r_{pci}} = RET_{pc} \quad \forall p, c \quad (3.38)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{c=1}^C x_{r_{pci}} \leq M \cdot y_i \quad \forall i \quad (3.39)$$

Restriktion (3.38) gewährleistet, dass die an den Standorten  $i$  recycelte Menge der insgesamt zu entsorgenden Menge der verschiedenen Produkte der jeweiligen Kunden entspricht. Darüber hinaus ist mit Bedingung (3.39) sicherzustellen, dass ein Recycling

der Produkte lediglich an eröffneten Produktionsstandorten stattfindet. Die von den Zulieferern zu beschaffende Menge ist des Weiteren um die aus dem Recycling-Prozess resultierenden Mengen der Rohstoffe zu reduzieren. Die Restriktion (3.17) des Grundmodells ist dementsprechend durch die folgende Restriktion zu ersetzen:

$$\sum_{p=1}^P \sum_{c=1}^C R_{pr} \cdot x_{r_{pci}} + \sum_{z=1}^Z x b_{rzi} \geq \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J A_{rp} \cdot x p_{pij} \quad \forall i, r \quad (3.40)$$

Die mit einer Mengeneinheit des zu recycelnden Produktes  $p$  verbundenen Kosten sowie die ggf. anfallenden Transportkosten von den Kunden zu den Produktionsstandorten müssen in der Zielfunktion erfasst werden. Die aus dem Recycling-Prozess resultierenden Erlöse sind durch die eingesparten Beschaffungskosten bereits implizit in der Zielfunktion erfasst. Fixe Kosten, die mit dem Recycling-Prozess an einem Produktionsstandort, etwa durch zusätzliche Anlagen entstehen, können mit einer weiteren Binärvariablen, die mit der Variable  $x_{r_{pci}}$  verknüpft werden muss, in der Zielfunktion erfasst werden.<sup>134</sup>

### 3.4.3 Besonderheiten mehrperiodiger Modelle

Bei mehrperiodigen Betrachtungen ist zu unterscheiden, ob es zwischen den verschiedenen Perioden Interdependenzen gibt.<sup>135</sup> Dabei kann etwa periodenübergreifende Lagerhaltung die Verbindung zwischen den verschiedenen Perioden darstellen,<sup>136</sup> oder es ist möglich, die Anpassung der Kapazitäten der verschiedenen Standorte in verschiedenen Perioden zu erlauben.<sup>137</sup> Des Weiteren ist im Rahmen der Planungsstabilität zu prüfen, ob einmal eröffnete oder geschlossene Standorte zu einem späteren Zeitpunkt wieder geschlossen bzw. eröffnet werden dürfen.<sup>138</sup> Besteht keine Verbindung zwischen den verschiedenen Zeitperioden, so handelt es sich um komparativ-statische Modelle.<sup>139</sup> Im Folgenden wird ein weiteres Modell vorgestellt, welches einen Planungshorizont umfasst, der in  $T$  Perioden unterteilt ist und simultan die Planung der Kapazitäten der verschiedenen Standorte durch verschiedene Kapazitätsmodi  $k$  beinhaltet. Für die relevanten Zeitabschnitte wird zunächst ein weiterer Index  $t$  eingeführt und das im vorherigen Abschnitt entwickelte Modell um die Mehrperiodigkeit erweitert sowie verschiedene Möglichkeiten der Interdependenzen zwischen den Perioden diskutiert.

<sup>134</sup> Vgl. für eine ähnliche Darstellung der Recycling-Prozesse Fandel/Stammen (2004).

<sup>135</sup> Vgl. Abschnitt 3.1.1.

<sup>136</sup> Vgl. Arntzen et al. (1995); Fandel/Stammen (2004).

<sup>137</sup> Vgl. Alonso-Ayuso et al. (2003); Lucas/Messina/Mitra (1997).

<sup>138</sup> Vgl. hierzu Hinojosa/Puerto/Fernández (2000).

<sup>139</sup> Vgl. für ein komparativ-statisches Modell zum Supply Chain Design etwa Lucas et al. (2001).

**Zusätzliche Indizes und Indexmengen**

$t = 1, \dots, T$                       Zeitperioden

**Zusätzliche Entscheidungsvariablen**

$$yP_{ikt}^E = \begin{cases} 1, & \text{falls in Periode } t \text{ an Standort } i \text{ eine Produktionsstätte der} \\ & \text{Kapazität } k \text{ errichtet wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$yP_{ikt}^B = \begin{cases} 1, & \text{falls in Periode } t \text{ an Standort } i \text{ im Kapazitätsmodus } k \text{ produziert wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$yI_{jkt}^E = \begin{cases} 1, & \text{falls in Periode } t \text{ an Standort } j \text{ ein Lager der Kapazität } k \text{ errichtet wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$yI_{jkt}^B = \begin{cases} 1, & \text{falls in Periode } t \text{ ein Lager } j \text{ im Kapazitätsmodus } k \text{ betrieben wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$\text{hilf}_{ik_1k_2t} = \begin{cases} 1, & \text{falls an Standort } i \text{ in Periode } t \text{ der Kapazitätsmodus von } k_1 \text{ zu } k_2 \\ & \text{geändert wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$\text{best}_{pjt}$                       Lagerbestand des Produktes  $p$  in Lager  $j$  am Ende von Periode  $t$

**Zusätzliche Daten**

$\text{KAPWK}_{ik_1k_2t}$                       Kapazitätswechselkosten an Standort  $i$  von Kapazitätsmodus  $k_1$  zu  $k_2$  in Periode  $t$

Die weiteren Entscheidungsvariablen und Daten werden, sofern diese sich im Zeitablauf ändern, mit diesem Index  $t$  versehen. Ein daraus resultierendes Modell lautet wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{Max } & \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J \sum_{c=1}^C \text{PR}_{pc} \cdot xI_{pjct} - \left[ \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I (\text{FEKP}_{ikt} \cdot yP_{ikt}^E + \text{FBKP}_{ikt} \cdot yP_{ikt}^B) \right. \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J (\text{FEKL}_{jkt} \cdot yI_{jkt}^E + \text{FBKL}_{jkt} \cdot yI_{jkt}^B) + \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^R \sum_{z=1}^Z \sum_{i=1}^I \text{VBK}_{rzt} \cdot xB_{rzt} \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\text{VPK}_{pit} + \text{VTKP}_{ijt}) \cdot xP_{pijt} \\ & \left. + \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J \sum_{c=1}^C (\text{VLK}_{pjt} + \text{VTKL}_{jct}) \cdot xI_{pjct} \right] \end{aligned} \quad (3.41)$$

$$\text{s. d. } \sum_{z=1}^Z x b_{rzt} \geq \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J A_{rp} \cdot x p_{pj t} \quad \forall i, r, t \quad (3.42)$$

$$\sum_{i=1}^I x p_{pij t} \geq \sum_{c=1}^C x l_{pjct} \quad \forall p, j, t \quad (3.43)$$

$$\sum_{j=1}^J x l_{pjct} \geq D_{pct} \quad \forall p, c, t \quad (3.44)$$

$$\sum_{k=1}^K y p_{ikt}^B \leq 1 \quad \forall i, t \quad (3.45)$$

$$\sum_{k=1}^K y l_{jkt}^B \leq 1 \quad \forall j, t \quad (3.46)$$

$$\sum_{k=1}^K K P_k^{\min} \cdot y p_{ikt}^B \leq \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P B_{pj} \cdot x p_{pj t} \leq \sum_{k=1}^K K P_k^{\max} \cdot y p_{ikt}^B \quad \forall i, t \quad (3.47)$$

$$\sum_{k=1}^K K L_k^{\min} \cdot y l_{jkt}^B \leq \sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P C_{pj} \cdot x l_{pjct} \leq \sum_{k=1}^K K L_k^{\max} \cdot y l_{jkt}^B \quad \forall j, t \quad (3.48)$$

$$K A P Z_{rz}^{\min} \cdot y z_{rz}^t \leq \sum_{i=1}^I x b_{rzt} \leq K A P Z_{rz}^{\max} \cdot y z_{rz}^t \quad \forall r, z, t \quad (3.49)$$

$$y p_{ikt}^E \geq y p_{ikt}^B - \sum_{k=1}^K y p_{ikt-1}^B \quad \forall i, k, t = 2, \dots, T \quad (3.50)$$

$$y l_{jkt}^E \geq y l_{jkt}^B - \sum_{k=1}^K y l_{jkt-1}^B \quad \forall i, k, t = 2, \dots, T \quad (3.51)$$

$$x b_{rzt}, x p_{pj t}, x l_{pjct} \geq 0 \quad \forall r, z, p, i, j, c, t \quad (3.52)$$

$$y p_{ikt}^B, y p_{ikt}^E, y l_{jkt}^B, y l_{jkt}^E \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, k, t \quad (3.53)$$

Die Restriktionen (3.45) und (3.46) gewährleisten, dass jeder Standort in jeder Periode  $t$  maximal in einem Produktionsmodus  $k$  betrieben werden kann. Darüber hinaus wird in den Restriktionen (3.47) und (3.48) sicher gestellt, dass die mit einem Modus  $k$  verknüpften Mindest- bzw. Maximalkapazitätsauslastungen in jeder Periode  $t$  eingehalten

werden. Mit Hilfe der Restriktionen (3.50) und (3.51) wird der Zusammenhang zwischen den Entscheidungsvariablen für die erstmalige Errichtung eines Standortes und dem Betrieb eines Standortes erfasst. Wenn in Periode  $t$  ein Standort  $i$  in Betrieb ist, der in Periode  $t-1$  auch nicht in einem anderen Kapazitätsmodus in Betrieb war, so nimmt die entsprechende Binärvariable für die Errichtung dieses Standortes den Wert 1 an und die zugehörigen Errichtungskosten werden in der Zielfunktion erfasst. Andernfalls können durch verschiedene Kapazitätsmodi die rechten Seiten der Ungleichungen  $-1$  oder  $0$  werden, so dass die Entscheidungsvariablen für die Eröffnung der Standorte durch die Definition als Binärvariablen den Wert 0 annehmen. Die verbleibenden Restriktionen entsprechen der Darstellung des Grundmodells aus Unterkapitel 3.4.1. Eine Anpassung etwa durch im Zeitablauf schwankende maximale und minimale Liefermengen der Zulieferer ist analog möglich. Im Folgenden werden weitere Möglichkeiten, Interdependenzen zwischen den Perioden im Modell zu erfassen, diskutiert.

#### *Stabilität der Standortplanung*

Im Rahmen der Stabilität des Supply Chain Design kann es sinnvoll sein, insbesondere bei der Standortplanung der Produktionsstätten, das Schließen eines einmal eröffneten Standortes in den nachfolgenden Perioden nicht zu erlauben. Die Restriktionen (3.54) und (3.55) setzen dies im Modell um:

$$\sum_{k=1}^K y_{ikt-1}^B \leq \sum_{k=1}^K y_{ikt}^B \quad \forall i, t = 2, \dots, T \quad (3.54)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{jkt-1}^B \leq \sum_{k=1}^K y_{jkt}^B \quad \forall j, t = 2, \dots, T \quad (3.55)$$

Falls es sich um ein Redesign handelt und es dementsprechend Standorte gibt, die bereits eröffnet sind, ist eine Unterscheidung der gesamten Produktionsstätten  $I$  in die Menge  $I_E$  mit Produktionsstandorten, an denen bereits produziert wird, und die Menge  $I_0$  mit Produktionsstandorten, an denen eine Produktionsstätte errichtet werden kann, möglich.<sup>140</sup> Falls für die Schließung bereits vorhandener Standorte gelten soll, dass diese in nachfolgenden Perioden nicht wieder eröffnet werden dürfen, sind die Ungleichheitszeichen der Restriktionen (3.54) für  $i \in I_E$  in  $\geq$  zu ändern. Entsprechend kann die Restriktion (3.50) modifiziert werden, so dass die Binärvariable für die Errichtung für  $i \in I_E$  zur Binärvariablen für die Schließung der Produktionsstandorte wird. Die fixen Kosten  $FEKP_{ikt}$  in der Zielfunktion geben dann für  $i \in I_E$  die Kosten an, die mit der Schließung des Standortes  $i$  im Modus  $k$  verbunden sind.<sup>141</sup>

<sup>140</sup> Vgl. zu diesem Vorgehen Hinojosa/Puerto/Fernández (2000), S. 275.

<sup>141</sup> Vgl. Hinojosa/Puerto/Fernández (2000), S. 275.

### Kapazitätsanpassungen

Die Kosten, die mit der Veränderung der Kapazitätsmodi am Standort  $i$  von Modus  $k_1$  zu Modus  $k_2$  von Periode  $t-1$  zu Periode  $t$  verbunden sind, können mit  $KAPWK_{ik_1k_2t}$  bezeichnet werden. In der Zielfunktion muss dann der folgende Term zusätzlich berücksichtigt werden:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{\substack{k_1=1 \\ k_2 \neq k_1}}^K \sum_{k_2=1}^K \sum_{t=2}^T KAPWK_{ik_1k_2t} \cdot \max \left\{ 0, yp_{ik_1t-1}^B + yp_{ik_2t}^B - 1 \right\} \quad (3.56)$$

Für den Fall, dass der Modus gewechselt wird, nehmen beide Binärvariablen den Wert 1 an und die Kosten des Moduswechsels werden beachtet. Nimmt nur eine der beiden Entscheidungsvariablen den Wert 1 an, so wird durch die Subtraktion von 1 der gesamte Term 0 und es werden keine Wechselkosten berücksichtigt. Als letzter Fall können beide Entscheidungsvariablen den Wert 0 haben, dann wird das Maximum aus  $\{0, -1\}$  mit 0 gewählt und ebenfalls keine Kapazitätswechselkosten addiert. Die Nicht-linearität dieser Formulierung kann durch eine binäre Hilfsvariable, die den Wert eins annimmt, wenn in Periode  $t$  an Standort  $i$  der Modus  $k_2$  an Stelle des Modus  $k_1$  festgelegt wird, vermieden werden. Die Restriktionen (3.57) und (3.58) definieren diese Hilfsvariable, so dass diese dem zu maximierenden Ausdruck in der zu ergänzenden Zielfunktion (3.56) entspricht. Die Hilfsvariable ersetzt folglich den zu maximierenden Ausdruck und führt somit zu einer linearen Zielfunktion.

$$\text{hilf}_{ik_1k_2t} \geq yp_{ik_1t-1}^B + yp_{ik_2t}^B - 1 \quad \forall i, k_1, k_2 \neq k_1, t = 2, \dots, T \quad (3.57)$$

$$\begin{aligned} \text{hilf}_{ik_1k_2t} &\in \{0, 1\} \quad \forall i, k_1, k_2 \neq k_1, t = 2, \dots, T \\ \text{hilf}_{ik_1k_2t} &= 0 \quad \forall i, k_1, k_2 = k_1, t = 2, \dots, T \end{aligned} \quad (3.58)$$

### Periodenübergreifende Lagerung

Um der Mehrperiodigkeit Rechnung zu tragen, kann periodenübergreifende Lagerung im Lager bzw. Warenverteilzentrum  $j$  im Modell berücksichtigt werden. Dies ist insbesondere dann sinnvoll, wenn eine stark schwankende, etwa saisonale Nachfrage starke Überkapazitäten hervorruft. In einem ersten Schritt ist dazu eine weitere Entscheidungsvariable  $best_{pj,t}$  erforderlich, die angibt, wie viele Einheiten des Produktes  $p$  am Ende der Periode  $t$  in Lager  $j$  sind.<sup>142</sup> Die Restriktion (3.59) beschreibt die Lagerbilanzgleichung, die beinhaltet, dass der Lagerbestand am Ende der Vorperiode zuzüglich der an das Lager gelieferten Mengen dieser Periode genauso groß sein muss wie

<sup>142</sup> Vgl. zu diesem Vorgehen etwa Arntzen et al. (1995), S. 88; Fandel/Stammen (2004), S. 302.



der Lagerbestand am Ende dieser Periode zuzüglich der aus dem Lager gelieferten Mengen der Produkte in dieser Periode.

$$\text{best}_{pjt-1} + \sum_{i=1}^I x_{ipjit} = \sum_{c=1}^C x_{pjct} + \text{best}_{pjt} \quad \forall p, j, t \quad (3.59)$$

Ein Anfangslagerbestand  $\text{best}_{pj0}$  ist zu definieren und die Kapazitäten der Lager  $j$  sind ebenfalls geeignet zu berücksichtigen, etwa in Anlehnung an die Restriktion (3.48). Sicherheitsbestände können in Form einer Mindestlagermenge erfasst werden. Die Kosten der Lagerhaltung können etwa mit einem zur Lagerhaltungsmenge am Ende der Periode  $t$  proportionalen durchschnittlichen Lagerhaltungskostensatz in der Zielfunktion berücksichtigt werden.<sup>143</sup>

Mehrperiodige Modelle zum Supply Chain Design sind insbesondere dann sinnvoll, wenn saisonal stark schwankende Nachfrage in den verschiedenen Perioden vorliegt und infolgedessen der Lagerhaltung eine große Bedeutung zukommt, um auf diese Weise der Planung großer Überkapazitäten entgegenzuwirken. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll diese Problemstellung nicht weiter betrachtet werden. Eine Erfassung ist auf die vorgestellte Weise, falls erforderlich, möglich. Im folgenden Kapitel wird die Berücksichtigung der Zulieferer im Rahmen des Supply Chain Design diskutiert und dabei insbesondere auf Verfahren und Kriterien zur Bewertung und Auswahl von Zulieferern eingegangen. Es werden beschaffungssituationsabhängige Auswahlkriterien für Zulieferer entwickelt und auf die Quantifizierung dieser Kriterien zur Berücksichtigung in mathematischen Modellen eingegangen. Der Schwerpunkt liegt im folgenden vierten Kapitel auf der Betrachtung der Zulieferer, da diese in der Regel im Gegensatz zu Kunden ausgewählt werden können. Im anschließenden fünften Kapitel erfolgt dann eine Erweiterung der hier entwickelten Modelle im Hinblick auf die Konfiguration einer Supply Chain unter Unsicherheit.

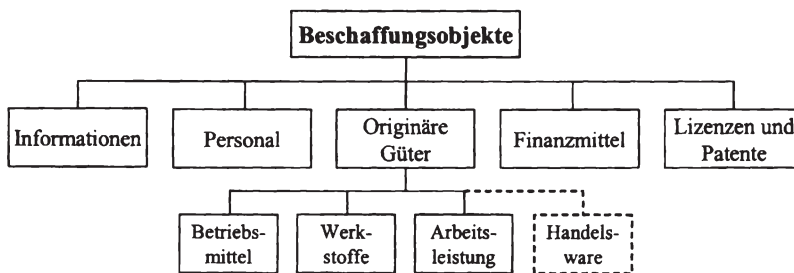
<sup>143</sup> Vgl. etwa Alonso-Ayuso et al. (2003), S. 106.



## 4 Die Berücksichtigung der Zulieferer im Supply Chain Design

### 4.1 Die Bedeutung der Beschaffung im Supply Chain Management

Sowohl in der Praxis als auch in der Literatur werden Einkauf, Versorgung oder Materialwirtschaft analog oder ergänzend zum Beschaffungsbegriff verwendet,<sup>1</sup> so dass eine Abgrenzung der verschiedenen Begriffe erforderlich ist. Unter Beschaffung werden in der Literatur alle Aktivitäten subsumiert, die der Unternehmung die Güter verfügbar machen, die nicht selbst hergestellt werden.<sup>2</sup> Dabei kann, je nach Art der zu beschaffenden Güter, d. h. des Beschaffungsobjektes, zwischen Beschaffung im engeren und im weiteren Sinne unterschieden werden.<sup>3</sup> Im weiteren Sinne werden dabei unter Beschaffungsobjekten, wie in Abbildung 4.1 dargestellt, Personal sowie sämtliche materiellen und immateriellen Güter, wie Lizenzen und Patente, Finanzmittel oder Informationen gefasst.<sup>4</sup> Der engere Beschaffungsbegriff umfasst im Gegensatz dazu lediglich die originären Güter.<sup>5</sup> Unter originären Gütern sind Input- bzw. Produktionsfaktoren zu verstehen. Diese können weiter untergliedert werden in Betriebsmittel, Werkstoffe und Arbeitsleistungen<sup>6</sup> und darüber hinaus ggf. noch in Handelsware.<sup>7</sup> Unter Arbeitsleistung wird dabei die im Produktionsprozess erforderliche, objektbezogene bzw. ausführende Arbeit erfasst,<sup>8</sup> wohingegen Personal alle Arbeitskräfte umfasst, auch die, die mit leitenden Tätigkeiten betraut sind und als dispositiver Faktor bezeichnet werden.<sup>9</sup>



**Abbildung 4.1: Beschaffungsobjekte bei verschiedenen Beschaffungsbegriffen**  
(Quelle: In Anlehnung an Schulte (2001), S. 7.)

<sup>1</sup> Vgl. etwa Hartmann (2002), S. 16. Für eine Übersicht über die historische Entwicklung vgl. etwa Bogalschewski (2003), S. 13ff.; Kaufmann (2002), S. 5ff.

<sup>2</sup> Vgl. Arnold (1997), S. 3; Corsten (2000b), S. 397; Tempelmeier (1993), Sp. 312f.; Theisen (1987), S. 423.

<sup>3</sup> Vgl. Schulte (2001), S. 5f.

<sup>4</sup> Vgl. Hartmann (2002), S. 16; Tempelmeier (1993), Sp. 312f.

<sup>5</sup> Vgl. Schulte (2001), S. 6f.

<sup>6</sup> Vgl. Nebl (2004), S. 8ff.; Steven (1998), S. 3f.

<sup>7</sup> Vgl. Schulte (2001), S. 7.

<sup>8</sup> Vgl. Steven (1998), S. 4.

<sup>9</sup> Vgl. Busse von Colbe/Laßmann (1991), S. 72f.

Der Begriff der Materialwirtschaft grenzt die Beschaffung im engeren Sinne hinsichtlich des Beschaffungsobjektes weiter ein, so dass zunächst der Begriff des Materials zu erläutern ist. Jedoch ist in der Literatur keine einheitliche Verwendung des Begriffs zu finden.<sup>10</sup> Im Folgenden werden zum Material die Verbrauchsfaktoren und damit die Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe sowie Handelsware und Zwischenprodukte gezählt.<sup>11</sup> Die Materialbeschaffung beinhaltet folglich alle Aktivitäten, die die Versorgung der Unternehmung mit Material sicherstellen.<sup>12</sup> Neben der Unterscheidung dieser Begriffe hinsichtlich des Beschaffungsobjektes auf der Objektebene ist eine Unterscheidung hinsichtlich der verschiedenen Tätigkeiten auf der Verrichtungsebene sinnvoll. Der Begriff des Einkaufs wird etwa mit vertragsmäßiger Beschaffung gleichgesetzt.<sup>13</sup> Die vertragsmäßige und die physische Beschaffung können dann zum Begriff der Materialwirtschaft zusammengefasst werden.<sup>14</sup> Eine weitere Unterscheidung der Materialwirtschaft hinsichtlich der berücksichtigten betrieblichen Funktionen ist möglich, soll hier jedoch nicht weiter ausgeführt werden.<sup>15</sup> Die Begriffe Beschaffung, Materialwirtschaft und Logistik können wegen der Überschneidung der Aufgabenbereiche, wie Lagerhaltung oder Materialbereitstellung, häufig nicht einzeln betrachtet werden und werden deshalb unter dem Begriff Versorgungsmanagement bzw. Supply Management zusammengefasst.<sup>16</sup>

In der englischsprachigen Literatur findet sich für die Beschaffung i. w. S. der Begriff Purchasing,<sup>17</sup> wobei auch hier die Begriffsdefinitionen nicht einheitlich sind.<sup>18</sup> Lysons und Gillingham fassen den Begriff des Purchasing weiter als die Beschaffung i. w. S. und subsumieren neben der Bereitstellung von Gütern die integrierende Sicht des Supply Chain Management etwa durch Zulieferermanagement.<sup>19</sup> Bei Chopra und Meindl hingegen wird der Begriff Purchasing synonym zu Procurement verwendet und als Beschaffung i. w. S. aufgefasst. Sourcing wird von diesen Autoren als weiter gefasster, umfassender Begriff verwendet, der darüber hinaus etwa die Auswahl, Bewertung und Kontrolle der Zulieferer, die Vertragsgestaltung mit Zulieferern und weitere Zusammenarbeiten mit Zulieferern etwa in Form der Produktentwicklung beinhaltet.<sup>20</sup> Diese Begriffsfestlegung des Sourcing entspricht nahezu der des Purchasing von Lysons und Gillingham.

<sup>10</sup> Vgl. Corsten (2000b), S. 397ff.

<sup>11</sup> Zu dieser Definition des Materialbegriffs vgl. etwa Corsten (2000b), S. 397; Tempelmeier (1993), Sp. 313.

<sup>12</sup> Vgl. Schulte (2001), S. 5; Tempelmeier (2003), S. 3.

<sup>13</sup> Vgl. Tempelmeier (2003), S. 6.

<sup>14</sup> Vgl. Tempelmeier (2003), S. 4f.

<sup>15</sup> Vgl. zu Formen der Materialwirtschaft etwa Schulte (2001), S. 12f. und die dort angegebene Literatur.

<sup>16</sup> Vgl. etwa Arnold (1997), S. 8.

<sup>17</sup> Vgl. etwa van Weele (2002), S. 14.

<sup>18</sup> Vgl. Kaufmann (2002), S. 11f.

<sup>19</sup> Vgl. Lysons/Gillingham (2003), S. 8.

<sup>20</sup> Vgl. Chopra/Meindl (2004), S. 387f.

Ausgehend von den obigen Überlegungen soll Beschaffung im Folgenden alle Aktivitäten innerhalb einer Unternehmung umfassen, die für die Bereitstellung von Verbrauchsfaktoren und Zwischenprodukten von rechtlich selbstständigen Unternehmungen erforderlich sind. Eine wesentliche Aktivität der Beschaffung ist die sorgfältige und angemessen umfassende Auswahl dieser rechtlich selbstständigen Unternehmungen, der Zulieferer.<sup>21</sup>

Die Bedeutung der sorgfältigen Auswahl der Zulieferer und die damit verbundenen Potenziale bei Unternehmungen sind um so größer, je höher der Anteil der Materialkosten an den Gesamtkosten ist oder je strikter die Umsetzung des Just-in-Time-Konzepts, wie etwa in der Automobilzuliefererindustrie, durchgeführt wird.<sup>22</sup> Neben der sorgfältigen Auswahl der Zulieferer kann ihre Einbeziehung in die Entwicklung von Produkten und in kontinuierliche Verbesserungsprozesse zur Realisierung von Wettbewerbsvorteilen führen.<sup>23</sup> Die für die Auswahl von Zulieferern verwendeten Verfahren sowie die zugrunde liegenden Auswahlkriterien sind vielfältig und reichen etwa von einfachen Punktbewertungsansätzen über Analytic Hierarchy Process und Data Envelopment Analysis bis hin zu mathematischen Optimierungsansätzen. In den nachfolgenden Abschnitten werden die Ansätze kurz hinsichtlich des allgemeinen Vorgehens sowie in der Anwendung für die Bewertung und Auswahl von Zulieferern erläutert. Die verwendeten Auswahlkriterien werden kritisch diskutiert sowie unterschiedliche Vorgehensweisen in Abhängigkeit von der Art der Beschaffungssituation entwickelt. Abschließend erfolgt eine Integration der Zuliefererauswahl in das Supply Chain Design.

## 4.2 Verfahren zur Auswahl von Zulieferern

### 4.2.1 Nutzwertanalyse und Multi-Attributive Nutzentheorie

Die Nutzwertanalyse, auch als Punktbewertungsverfahren oder Scoringmodell bezeichnet, bewertet Handlungsalternativen auf der Grundlage von Punkten, so genannten Scores.<sup>24</sup> Die Nutzwertanalyse existiert in verschiedenen Varianten, die sich hinsichtlich Punkt- und Gewichtsvergabearten sowie der Art der Aggregation zu einem Gesamtwert unterscheiden.<sup>25</sup> Sie wird häufig angewandt, wenn nicht quantifizierbare Kriterien zu berücksichtigen sind.<sup>26</sup> In der einfachsten Form werden die Handlungsalternativen bezüglich verschiedener Kriterien mit Punkten bewertet und diese anschlie-

<sup>21</sup> Vgl. Chopra/Meindl (2004), S. 388ff.; van Weele (2002), S. 15ff.

<sup>22</sup> Vgl. Bhutta/Huq (2002), S. 126; Karpak/Kumcu/Kasuganti (2001), S. 209.

<sup>23</sup> Vgl. Sarkis/Talluri (2002), S. 18; Vonderembse/Tracey (1999), S. 33.

<sup>24</sup> Vgl. etwa Adam (1996), S. 412ff.

<sup>25</sup> Vgl. Bamberg/Coenenberg (2002), S. 62f.; Schneeweiß (1990), S. 14.

<sup>26</sup> Vgl. etwa Hoffmeister (2000), S. 278f.

ßend mit den Gewichten der Kriterien multipliziert und additiv zu einem Gesamtwert für jede Handlungsalternative aggregiert.<sup>27</sup> Anhand der ermittelten Gesamtwerte kann die Entscheidung für eine Handlungsalternative getroffen bzw. eine Rangfolge der Handlungsalternativen aufgestellt werden.<sup>28</sup> Die Multi-Attributive Nutzentheorie weist formal große Ähnlichkeit mit der Nutzwertanalyse auf, verfügt jedoch über andere Anforderungen an die Anwendbarkeit.<sup>29</sup> So setzt die Multi-Attributive Nutzentheorie etwa eine kardinale Nutzenmessung und die Substituierbarkeit der Ziele untereinander voraus, wohingegen die Voraussetzungen der Nutzwertanalyse nicht klar umrissen sind.<sup>30</sup>

Verschiedene Ansätze zur Auswahl eines geeigneten Zulieferers, die den Punktbewertungsverfahren zugeordnet werden können, stellt Patton vor.<sup>31</sup> Dabei wird zwischen kompensatorischen und nicht kompensatorischen Verfahren unterschieden. Zu den kompensatorischen Verfahren, die den Ausgleich einer schlechten Bewertung bezüglich eines Kriteriums durch eine gute Bewertung bezüglich eines anderen Kriteriums erlauben, werden die einfache Addition der erreichten Punkte eines Zulieferers (simple linear compensatory model) und die gewichtete Addition der erreichten Punkte (weighted linear compensatory model) gezählt. Die nicht kompensatorischen Verfahren werden unterschieden in konjunktiv, disjunktiv und lexikographisch.<sup>32</sup> Das konjunktive Verfahren vergleicht alle Zulieferer hinsichtlich ihres jeweils schlechtesten Attributs. Der Zulieferer mit dem höchsten Wert wird ausgewählt. Beim disjunktiven Vorgehen werden die jeweils besten Bewertungen der einzelnen Zulieferer verglichen. Der Zulieferer mit der höchsten Bewertung wird ausgewählt. Beide Verfahren berücksichtigen die unterschiedliche Wichtigkeit der Beurteilungskriterien nicht. Im Gegensatz dazu werden bei dem lexikographischen Verfahren die Beurteilungskriterien gemäß ihrer Relevanz in eine Rangfolge gebracht. Der Zulieferer mit der höchsten Punktzahl bei dem wichtigsten Kriterium wird ausgewählt. Bei gleicher Punktzahl wird das nächste Kriterium herangezogen.

Gregory zeigt einen kompensatorischen Punktbewertungsansatz, der die Bewertung der Zulieferer anhand der übergeordneten Kriterien Angebot, Technik, Qualität, Kosten sowie Allgemeines vornimmt.<sup>33</sup> Diesen Kriterien werden unterschiedliche maximal erreichbare Punkte zwischen 10 und 25 zugeordnet, die dann weiter auf die unterge-

<sup>27</sup> Vgl. Adam (1996), S. 413.

<sup>28</sup> Vgl. Hartmann (1997), S. 88f.

<sup>29</sup> Vgl. Schneeweiß (1990), S. 13.

<sup>30</sup> Vgl. Schneeweiß (1990), S. 13. Für ausführliche Erläuterungen der Voraussetzungen für die Anwendbarkeit der Multi-Attributiven Nutzentheorie vgl. etwa Lillich (1992), S. 67ff.; Schneeweiß (1991), S. 125ff. Für einen Vergleich mit der Nutzwertanalyse vgl. etwa Schneeweiß (1990), S. 15ff.

<sup>31</sup> Vgl. Patton (1996).

<sup>32</sup> Vgl. hierzu auch Zimmermann/Gutsche (1991), S. 47ff.

<sup>33</sup> Vgl. Gregory (1986).

ordneten Kriterien aufgeteilt werden, wie etwa bei Angebot auf Problemverständnis, Vertragskonditionen und Einhalten der Ausschreibungsfrist. Die Zulieferer werden daraufhin bezüglich der untergeordneten Kriterien bewertet und der Anteil der erreichten Punkte je übergeordneter Kategorie in Prozent ermittelt. Der Zulieferer, der den höchsten prozentualen Anteil an der Gesamtpunktzahl erreicht, wird ausgewählt. Timmerman ergänzt, dass für jedes Bewertungskriterium ein Vorgehen festgelegt werden sollte, wie die Performance eines Zulieferers hinsichtlich dieses Kriteriums zu messen ist.<sup>34</sup> Ein solches Vorgehen soll die Vergleichbarkeit der Bewertungen verschiedener Zulieferer erhöhen und Manipulationen durch den Entscheider reduzieren.

Bei Humphreys, Wong und Chan steht die Bewertung und Auswahl von Zulieferern auf Basis ökologischer Kriterien im Vordergrund.<sup>35</sup> Dabei ist zunächst die Menge der möglichen Zulieferer zu reduzieren, indem die Zulieferer, die gesetzliche Richtlinien nicht erfüllen, aus der Menge aller potenziellen Zulieferer entfernt werden. In einem nächsten Schritt erfolgt die Bewertung der Zulieferer auf Basis quantitativer Kriterien, wie etwa den Investitionen in Umweltschutzmaßnahmen. Auch hier werden die Zulieferer, die die vorher zu definierenden Anforderungen nicht erfüllen, von den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen. In einem letzten Schritt werden Zulieferer hinsichtlich qualitativer Kriterien, wie ökologisches Image oder ökologische Kompetenz, mit Punkten bewertet. Diese Punkte werden mit den Gewichten der Kriterien multipliziert und der Zulieferer mit der höchsten Punktzahl wird gewählt. Die Berücksichtigung weiterer nicht ökologischer Kriterien ist bei diesem Vorgehen möglich, wird hier jedoch nicht explizit durchgeführt.

Einen Ansatz, der im weitesten Sinne als Punktbewertungsansatz bezeichnet werden kann, stellen Petroni und Braglia vor.<sup>36</sup> Dabei werden in einem ersten Schritt Output-Input-Quotienten zur Bewertung der Zulieferer definiert, wie beispielsweise der Preis des Produktes im Verhältnis zu den technologischen Fähigkeiten. In einem nächsten Schritt werden mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse<sup>37</sup> die Gewichte für diese Quotienten ermittelt. Durch Multiplikation dieser Gewichte mit den Bewertungen der Zulieferer kann die Bewertungspunktzahl der Zulieferer bestimmt werden. Der Zulieferer mit der höchsten Punktzahl wird gewählt. Die Autoren sehen den Vorteil dieses Vorgehens insbesondere darin, dass der Entscheider die Gewichte nicht vorgibt und so dieses Vorgehen weniger Beeinflussungsmöglichkeiten durch den Entscheider beinhaltet.

---

<sup>34</sup> Vgl. Timmerman (1986).

<sup>35</sup> Vgl. Humphreys/Wong/Chan (2003).

<sup>36</sup> Vgl. Petroni/Braglia (2000).

<sup>37</sup> Vgl. zur Hauptkomponentenanalyse etwa Khattree/Naik (2000), S. 25ff.

Die Auswahl von Zulieferern unter Berücksichtigung internationaler Aspekte, basierend auf der Multi-Attributiven Nutzentheorie, führt Min durch.<sup>38</sup> Das übergeordnete Ziel „wähle den besten Zulieferer“ wird in einer ersten Stufe in die Kriterien finanzielle Bedingungen, Qualität, Risiken, Service, Beziehung zwischen Käufer und Verkäufer, kulturelle und kommunikative Barrieren sowie Handelsbeschränkungen untergliedert. Diese werden in einer zweiten Stufe in weitere Attribute zerlegt, wie das Kriterium kulturelle und kommunikative Barrieren in die Attribute kulturelle Ähnlichkeit, ethische Standards sowie Kompatibilität hinsichtlich des elektronischen Datenaustauschs. Bei den berücksichtigten Kriterien zeigen sich die Besonderheiten bei der Auswahl internationaler Zulieferer, da diese über die häufig verwendeten Kriterien Preis, Qualität und Belieferung hinausgehen.<sup>39</sup> Mit Hilfe der Daten eines hypothetischen Beispiels eines Computerherstellers werden die auf Substitutionsraten basierenden Gewichte und die Nutzenfunktionen für die einzelnen Attribute ermittelt und darauf aufbauend der Gesamtnutzen für jeden der potenziellen Zulieferer berechnet. Der Zulieferer mit dem höchsten Gesamtnutzen wird gewählt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Punktbewertungsansätze über den Vorteil leichter Nachvollziehbarkeit und einer einfachen Erfassung qualitativer Kriterien verfügen. Als Nachteil sind insbesondere bei den kompensatorischen Ansätzen die vorausgesetzte Substituierbarkeit der Kriterien und die Aggregation zu einem dimensionslosen Gesamtwert zu sehen. Neben den Punktbewertungsansätzen erfolgt die Auswahl von Zulieferern mit Hilfe verschiedener mathematischer Optimierungsmodelle, die nachfolgend untersucht werden.

#### 4.2.2 Mathematische Optimierungsansätze

Bei den mathematischen Ansätzen im Zusammenhang mit der Auswahl und Bewertung von Zulieferern liegen häufig mehrere Bewertungskriterien vor. Sind alle Kriterien quantifizierbar, sind Zielgewichtung oder Goal-Programming als Form der gemischt-ganzzahligen linearen Optimierung mit mehreren Zielfunktionen denkbar. Bei der Zielgewichtung werden die verschiedenen Ziele mit Gewichtungsfaktoren versehen und zu einem Gesamtwert aggregiert. Die Gewichtungsfaktoren können je nach der Bedeutung des Ziels im Entscheidungsprozess variieren und spiegeln die Präferenzen des Entscheidungsträgers wider. Bei Zielgewichtungsansätzen wird die Substituierbarkeit der verschiedenen Ziele vorausgesetzt, da eine Verschlechterung bezüglich des einen Ziels durch eine Verbesserung eines anderen Ziels ausgeglichen

<sup>38</sup> Vgl. Min (1994).

<sup>39</sup> Vgl. Tabelle 4.3 für Autoren, die ausschließlich die Kriterien Preis, Qualität und Belieferung verwenden.



werden kann. In diesem Zusammenhang wird wie bei den Punktbewertungsansätzen von kompensatorischen Modellen gesprochen.<sup>40</sup>

Im Gegensatz dazu werden beim Goal-Programming<sup>41</sup> vom Entscheidungsträger Zielvorgaben bezüglich der einzelnen Ziele festgelegt. Diese idealen Ausprägungen der einzelnen Ziele sollen möglichst gut eingehalten werden. Die Abstände von diesen Zielen, die aus dem Zielfunktionswert einer zu bewertenden Handlungsalternative resultieren, werden berechnet und die ggf. gewichtete Summe der Abstände minimiert. Eine Handlungsalternative ist dementsprechend umso besser, je kleiner die Summe der ggf. gewichteten Abstände von den vorgegebenen Zielen (Goals) ist. Bei der Ermittlung der Abstände sind verschiedene Abstandsfunktionen wie absolute Abstände oder euklidische Abstände möglich.<sup>42</sup> Ähnlich wie bei der Zielgewichtung wird auch hier die Substituierbarkeit der Ziele vorausgesetzt. Neben der Festlegung der Gewichte ist bei diesem Ansatz insbesondere die Festlegung der idealen Ausprägungen der verschiedenen Ziele kritisch zu sehen. Es wird zunächst vorausgesetzt, dass der Entscheidungsträger Zielüberschreitungen und Zielunterschreitungen gleich wertet. Durch differenzierte Gewichte können jedoch die Präferenzen des Entscheidungsträgers in Bezug auf die verschiedenen Richtungen der Abweichungen berücksichtigt werden.<sup>43</sup> Darüber hinaus ist zu beachten, dass Goals, die bei zu extremierenden Zielen nicht der besten möglichen Ausprägung entsprechen, die Auswahl einer effizienten Alternative nicht garantieren.<sup>44</sup>

Sollen Ziele nicht kompensatorisch behandelt werden, so können diese in Form von Anspruchsniveaus als Restriktionen definiert werden. Wird etwa Liefertermintreue in mindestens 95% der Lieferungen gefordert, so bleiben alle potenziellen Zulieferer unberücksichtigt, die dieses Kriterium nicht erfüllen, unabhängig davon, wie gut ihre Ausprägungen hinsichtlich anderer Ziele sind. Eine Verletzung dieses Anspruchsniveaus kann infolgedessen nicht kompensiert werden. Eine zu strikte Festlegung der Anspruchsniveaus kann dazu führen, dass keine Handlungsalternative existiert, die das gewünschte Anspruchsniveau erfüllt. Bei einer zu großzügigen Festlegung erfolgt keine Einschränkung des Alternativenraums.<sup>45</sup> Darüber hinaus führen auch marginale Unterschreitungen des Anspruchsniveaus zur Missachtung dieser Handlungsalternative, auch wenn die Ausprägungen hinsichtlich anderer Ziele herausragend sind.<sup>46</sup> Die-

<sup>40</sup> Vgl. Roth (1998), S. 30.

<sup>41</sup> Goal-Programming geht zurück auf Charnes/Cooper (1961), S. 215ff.

<sup>42</sup> Vgl. etwa Romero (2004), S. 675ff.; Zimmermann/Gutsche (1991), S. 122ff.

<sup>43</sup> Vgl. Bamberg/Coenenberg (2002), S. 59f. Für eine ausführliche Erläuterung des Goal-Programming sowie eine Übersicht über Anwendungsgebiete vgl. etwa Schniederjans (1995).

<sup>44</sup> Vgl. Bamberg/Coenenberg (2002), S. 60.

<sup>45</sup> Vgl. Eisenführ/Weber (2003), S. 86f.

<sup>46</sup> Vgl. Eisenführ/Weber (2003), S. 86.

ses Problem kann jedoch durch Anwendung der Fuzzy-Set Theory, beispielsweise durch die Modellierung der unscharfen Menge aller Zulieferer mit hoher Liefertermintreue, gelöst werden. So wird ein „weicher“ Übergang von den Werten, die mit Sicherheit als Liefertermintreue angesehen werden, zu denen ermöglicht, die auszuschließen sind.<sup>47</sup> Nachfolgend werden verschiedene mathematische Optimierungsansätze zur Auswahl von Zulieferern vorgestellt.<sup>48</sup>

Einen Goal-Programming Ansatz zur Auswahl von Zulieferern verwenden Buffa und Jackson.<sup>49</sup> Die gewichtete Summe der absoluten Abweichung von den vom Hersteller geplanten Zielen hinsichtlich Preis, Qualität, Liefertermintreue sowie den Lagerhaltungskosten wird in der Zielfunktion minimiert. Die Beachtung der Lagerhaltungskosten erlaubt die Berücksichtigung von Zulieferern mit geringerer Liefertermintreue und die Kompensation dieser schlechten Lieferperformance durch geringere Preise. Das Resultat der Planung mit diesem vorgestellten Modell ist ein Beschaffungsplan, der angibt, welche Menge des Produktes in welcher Periode von welchem Zulieferer zu beschaffen ist. Alternativ kann lediglich die Überschreitung der vorgegebenen Kosten bzw. die Unterschreitung einer vorgegebenen Qualität erfasst werden.<sup>50</sup> Cakravastia, Toha und Nakamura bezeichnen diese Kostenüberschreitungen und Qualitätsunterschreitungen als Unzufriedenheit und minimieren folglich die Summe der Gesamtunzufriedenheit.<sup>51</sup>

Pan entwickelt ein lineares Modell zur Auswahl von Zulieferern und der Aufteilung der gesamten zu beschaffenden Menge auf diese, wobei weitere Ziele mittels Anspruchsniveaus erfasst werden.<sup>52</sup> Ein Zulieferer ist nicht ausgewählt, wenn sein Anteil an der Gesamtmenge null ist. Es werden die Ziele Kosten, Qualität, Lieferzeit und Service berücksichtigt. Exemplarisch werden die Kosten minimiert, wobei der Autor auf die Austauschbarkeit dieses Ziels, etwa durch ein Qualitätsziel, ausdrücklich hinweist. Auf die Quantifizierung der einzelnen Ziele, etwa wie sich Service und Lieferzeit unterscheiden, wird nicht eingegangen. Chaudhry, Forst und Zydiak erweitern dieses Modell, indem bestellmengenabhängige Preise in die Zielfunktion der Kostenminimierung integriert werden.<sup>53</sup> Während Pan festlegt, dass die Summe der mit der

---

<sup>47</sup> Vgl. Nauck/Kruse (1997), S. 6ff. Für eine Einführung in die Fuzzy Set Theorie vgl. Werners (1998); Zimmermann (2001).

<sup>48</sup> Auf die Beschreibung der Restriktionen, die keine zusätzlichen Ziele abbilden, wird bei den vorgestellten Ansätzen verzichtet, da diese im Wesentlichen den bereits in Kapitel 3 im Rahmen des Supply Chain Design erläuterten Restriktionen entsprechen.

<sup>49</sup> Vgl. Buffa/Jackson (1983).

<sup>50</sup> Vgl. Ghodsypour/O'Brain (2001), S. 23f.

<sup>51</sup> Vgl. Cakravastia/Toha/Nakamura (2002), S. 238ff.

<sup>52</sup> Vgl. Pan (1989).

<sup>53</sup> Vgl. Chaudhry/Forst/Zydiak (1993). Für weitere Ausführungen zur Modellierung bestellmengenabhängiger Preise vgl. ebenfalls Reith-Ahlemeier (2002).

Menge gewichteten Qualität aller Zulieferer einem Anspruchsniveau entsprechen soll, fordern Jayaraman, Srivista und Benton, dass jeder ausgewählte Zulieferer einen solchen Mindestanspruch erfüllen muss.<sup>54</sup> Im Unterschied zu Pan wird jedoch durch diese Formulierung der Restriktionen verhindert, dass die sehr schlechte Lieferzeit oder Qualität eines Zulieferers durch die sehr gute Lieferzeit oder Qualität eines anderen Zulieferers kompensiert werden kann.

Weber und Ellram wenden einen Mehrfachzielsetzungsansatz zur Auswahl von Zulieferern an, der die Kriterien Preis, Qualität und Lieferung berücksichtigt.<sup>55</sup> Auf Basis dieser Kriterien wird die Menge des zu beschaffenden Produktes auf die Zulieferer verteilt. Die Kriterien werden durch Zielgewichtung in der Zielfunktion berücksichtigt. Mit verschiedenen Gewichten für die einzelnen Ziele und einer variierenden Anzahl auszuwählender Zulieferer wird das Modell auf eine praktische Problemstellung aus der pharmazeutischen Industrie angewandt. Aus den unterschiedlichen generierten Lösungen kann der Entscheider die seinen Präferenzen entsprechende Lösung auswählen. Weber und Current betonen darüber hinaus, dass kein allgemeingültiges Modell für die Auswahl von Zulieferern existiert, da Zielfunktion und Restriktionen von der konkreten Anwendungssituation abhängig sind, und stellen verschiedene verbale Formulierungen möglicher Zielfunktionen und Restriktionen vor.<sup>56</sup> Gao und Tang verwenden einen Zielgewichtungsansatz zur Auswahl von Zulieferern für einen Anwendungsfall der Stahlindustrie.<sup>57</sup> Das Modell wird ebenfalls für verschiedene Kombinationen von Gewichten gelöst, so dass der Entscheidungsträger die Möglichkeit hat, die von ihm präferierte Lösung interaktiv auszuwählen.

Smytko und Clemens zeigen einen Gesamtkostenansatz zur Auswahl eines Zulieferers auf.<sup>58</sup> Dabei wird zunächst eine Vorauswahl der Zulieferer auf Basis qualitativer Faktoren wie finanzielle Stabilität oder geographische Nähe durchgeführt. Die aus der Vorauswahl für die weiteren Betrachtungen ausgewählten Zulieferer werden mit allen entstehenden Kosten bewertet. Diese Total Cost of Ownership umfassen etwa Kosten im Zusammenhang mit Auftragsvergabe, Transport und Kontrolle oder Kosten, die aus mangelhafter Qualität, verspäteter Lieferung des Produktes oder Auswahl des geeigneten Zulieferers resultieren.<sup>59</sup> Auf Basis dieser Gesamtkosten werden entweder die optimale Menge, d. h. die Menge mit den geringsten Stückkosten, oder die Stückkosten für eine vorgegebene Menge ermittelt. Der Zulieferer mit den geringsten Stückkosten wird ausgewählt. Im Gegensatz zu den bisherigen vorgestellten mathemati-

<sup>54</sup> Vgl. Jayaraman/Srivastava/Benton (1999).

<sup>55</sup> Vgl. Weber/Ellram (1993).

<sup>56</sup> Vgl. Weber/Current (1993).

<sup>57</sup> Vgl. Gao/Tang (2003).

<sup>58</sup> Vgl. Smytko/Clemens (1993).

<sup>59</sup> Vgl. Ellram (1995), S. 4ff.

schen Optimierungsmodellen wird hier eine Funktion der Stückkosten in Abhängigkeit von der Bestellmenge aufgestellt, wobei durch Betrachtung der ersten und zweiten Ableitung die optimale Bestellmenge ermittelt werden kann. Degraeve und Roodhooft integrieren den Ansatz des Total Cost of Ownership in die Zielfunktion eines Optimierungsmodells, um auf dieser Basis die Auswahl der Zulieferer und die Aufteilung der Mengen auf diese vorzunehmen.<sup>60</sup> Zur Ermittlung dieser Kosten schlagen die Autoren die Einführung einer Prozesskostenrechnung<sup>61</sup> vor.

Die vorgestellten mathematischen Optimierungsmodelle zur Auswahl von Zulieferern können im Wesentlichen vier Gruppen zugeordnet werden. Einerseits die Erfassung der Mehrfachzielsetzung durch Goal-Programming oder die Berücksichtigung weiterer Ziele als Anspruchsniveaus, wobei die Präferenzen des Entscheiders bei beiden Ansätzen a priori erfasst werden und darauf basierend eine optimale Lösung ermittelt wird. Andererseits werden die vorgestellten Zielgewichtungsansätze zur Generierung verschiedener Lösungen genutzt, zwischen denen der Entscheider gemäß seinen Präferenzen a posteriori wählen kann. Die vierte Gruppe umfasst die Ansätze, die das Konzept des Total Cost of Ownership integrieren und auf diese Weise lediglich die einzelne Zielsetzung der Kostenminimierung berücksichtigen. Im folgenden Abschnitt wird die Auswahl der Zulieferer auf Basis des Analytic Hierarchy Process erläutert.

### 4.2.3 Analytic Hierarchy Process

Ein weiterer Ansatz, der bei der Bewertung und Auswahl von Zulieferern verwendet wird, ist der Analytic Hierarchy Process oder kurz AHP.<sup>62</sup> Das Verfahren geht auf Saaty<sup>63</sup> zurück und bringt eine vorgegebene Alternativenmenge anhand einer zu entwickelnden Gesamtbewertung in eine Rangfolge.

Ausgehend von einem hierarchischen Zielsystem<sup>64</sup> werden die verschiedenen Alternativen, wie in Abbildung 4.2 dargestellt, unterhalb des Zielsystems angeordnet.<sup>65</sup> Der Entscheider muss die Bewertung der verschiedenen Elemente vornehmen. Dies geschieht durch einen paarweisen Vergleich der Elemente einer Stufe bezüglich jedes Elements der nächst höheren Stufe. In dem in Abbildung 4.2 dargestellten Beispiel müssen in einem ersten Schritt folglich die drei Zulieferer hinsichtlich Produktion,

<sup>60</sup> Vgl. Degraeve/Roodhooft (2000).

<sup>61</sup> Zur Prozesskostenrechnung vgl. etwa Gaiser (1998), S. 65ff.; Schneeweiß (1998), S. 277ff. Zur Prozesskostenrechnung in einer Supply Chain vgl. etwa Seuring (2001), S. 148ff. und die dort angegebene Literatur.

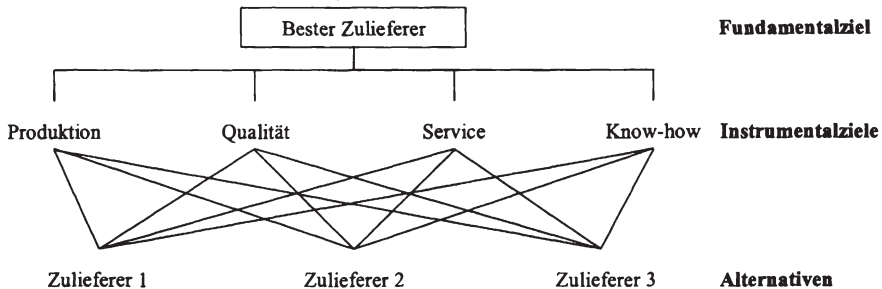
<sup>62</sup> Vgl. etwa de Boer/Labro/Morlacchi (2001), S. 82; Degraeve/Labro/Roodhooft (2000), S. 38.

<sup>63</sup> Vgl. Saaty (1980); Saaty (1990a); Saaty (2004).

<sup>64</sup> Vgl. zu hierarchischen Zielsystemen etwa Eisenführ/Weber (2003), S. 62ff.

<sup>65</sup> Für eine detaillierte Beschreibung des Vorgehens von AHP vgl. etwa Bushan/Rai (2004), S. 15ff.; Weber (1993), S. 73ff.

Qualität, Service und Know-how miteinander verglichen werden. In einem zweiten Schritt werden die Ziele Produktion, Qualität, Service und Know-how hinsichtlich des übergeordneten Ziels bester Zulieferer miteinander verglichen.



**Abbildung 4.2: Bewertung von Zulieferern mit AHP**  
(Quelle: In Anlehnung an Bhutta/Huq (2002), S. 132.)

Bei AHP wird davon ausgegangen, dass der Vergleich eines Elements  $A_2$  mit dem Element  $A_1$  zum reziproken Wert der Beurteilung von  $A_1$  mit  $A_2$  führt und der Vergleich einer Alternative mit sich selbst zu einer Bewertung von 1 nach der in Tabelle 4.1 dargestellten 9-Punkte-Skala von Saaty. Um die verschiedenen Matrizen von Paarvergleichen zu konstruieren, sind bei der in Abbildung 4.2 dargestellten Anzahl von Alternativen und Zielen folglich vom Entscheidungsträger  $3 \cdot 4 + 6 \cdot 1 = 18$  Bewertungen erforderlich. Die Anzahl der durchzuführenden Bewertungen steigt mit der Anzahl der Alternativen und der Anzahl der Ziele. So sind für vier potenzielle Zulieferer und fünf Unterziele bereits  $6 \cdot 5 + 10 \cdot 1 = 40$  und für  $n$  Zulieferer und  $m$  Unterziele bei einem Oberziel

$$\frac{m \cdot (n^2 - n)}{2} + \frac{1 \cdot (m^2 - m)}{2}$$

Bewertungen erforderlich.<sup>66</sup> Um verbale Bewertungen der Paarvergleiche zu quantifizieren, schlägt Saaty die in Tabelle 4.1 dargestellte 9-Punkte-Skala vor.<sup>67</sup> Dabei erhalten die zu vergleichenden Elemente den Wert eins, wenn diese als gleichbedeutend eingeschätzt werden und den Wert neun, wenn ein Element sehr stark bevorzugt wird. Die Werte zwei bis acht bilden die Abstufungen zwischen den beiden Extremwerten ab.

<sup>66</sup> In Anlehnung an Roth (1998), S. 114.

<sup>67</sup> Vgl. Saaty (1980), S. 53ff.

Skalenwert	Bedeutung
1	Die verglichenen Elemente sind gleich bedeutend
3	Ein Element wird leicht bevorzugt
5	Ein Element wird stark bevorzugt
7	Ein Element wird sehr stark bevorzugt
9	Ein Element kann nicht stärker bevorzugt werden
2, 4, 6, 8	Zwischenwerte, Kompromisse zwischen benachbarten Werten

**Tabelle 4.1: 9-Punkte-Skala zur Bewertung der Paarvergleiche im AHP**  
(Quelle: In Anlehnung an Saaty (1980), S. 54.)

Nachdem der Entscheider die Bewertungen vorgenommen hat, werden diese auf Konsistenz<sup>68</sup> geprüft. Scheitert die Konsistenzprüfung, muss der Entscheider die Bewertungen überprüfen, andernfalls werden dann aus den paarweisen Bewertungen Gewichte für die Attribute einer Stufe errechnet.<sup>69</sup> Die Aggregation der Stufengewichte erfolgt multiplikativ, ausgehend vom obersten Element bis hin zu den zu bewertenden Alternativen. Die Technik der Aggregation der Stufengewichte entspricht damit der der Nutzwertanalyse.<sup>70</sup> Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Vorgehen zur Konstruktion der Gewichte zwar neu ist, nachfolgend jedoch ein, in Abschnitt 4.2.1 bereits erläutertes, Punktbewertungsansatz verwendet wird.

In der wissenschaftlichen Diskussion sind die Meinungen zu AHP vielfältig.<sup>71</sup> Die unterschiedlichen in der Literatur vorgestellten zahlreichen Anwendungsgebiete insbesondere aus der Betriebswirtschaftslehre lassen auf breite Akzeptanz in der Praxis schließen.<sup>72</sup> In diesem Zusammenhang wird die strukturierte und systematische Aufbereitung der Entscheidung<sup>73</sup> und die Integration qualitativer Kriterien<sup>74</sup> als besonderer Vorteil von AHP gesehen. Andererseits wird häufig die mit der Anzahl der Alternativen und Bewertungskriterien steigende Anzahl der durchzuführenden Bewertungen oder etwa die Änderung der Rangfolge bei Berücksichtigung einer zusätzlichen Alternative kritisiert.<sup>75</sup> Ein zweiter Punkt, der in diesem Zusammenhang kritisch gesehen wird, ist, dass AHP lediglich hierarchische Bewertungen in eine Richtung zulässt. Mögliche Interdependenzen von Elementen innerhalb einer Ebene oder wechselseitig zwischen den Ebenen werden ausgeschlossen.<sup>76</sup> Diese Restriktion wird jedoch in einer

<sup>68</sup> Vgl. zur Konsistenzprüfung etwa Saaty (1990a), S. 12ff.

<sup>69</sup> Vgl. zur Berechnung der Gewichte etwa Roth (1998), S. 116ff.

<sup>70</sup> Vgl. Bamberg/Coenenberg (2002), S. 64; Roth (1998), S. 124.

<sup>71</sup> Vgl. etwa Dyer (1990); Harker/Vargas (1990); Leung/Cao (2001); Pérez (1995); Saaty (1990b).

<sup>72</sup> Vgl. für ausgewählte Anwendungsgebiete Bhushan/Rai (2004), S. 25ff.; Saaty/Vargas (2001), S. 47ff. Für einen Überblick über Anwendungen in der Literatur vgl. Golden/Wasil/Levy (1989); Weber (1993), S. 183.

<sup>73</sup> Vgl. etwa Barbarosoglu/Yazgac (1997), S. 20; Bhutta/Huq (2002), S. 128.

<sup>74</sup> Vgl. Bhutta/Huq (2002).

<sup>75</sup> Vgl. Belton/Gear (1983); Sarkis/Talluri (2002), S. 19.

<sup>76</sup> Vgl. Sarkis/Talluri (2002), S. 19f.

Weiterentwicklung des Verfahrens, dem Analytical Network Process, aufgehoben, indem keine hierarchische, sondern eine netzwerkartige Struktur vorausgesetzt wird.<sup>77</sup> Im Folgenden werden Ansätze, die AHP im Zusammenhang mit der Auswahl von Zulieferern verwenden, in chronologischer Reihenfolge kurz erläutert.

Narasimhan erläuterte bereits 1983 das Vorgehen von AHP an einem selbstentwickelten Beispiel zur Auswahl von Zulieferern.<sup>78</sup> Das Fundamentalziel „wähle den besten Zulieferer“ wird dabei in die Instrumentalziele Preisstruktur, Belieferung, Qualität und Service zerlegt. Diese Ziele werden zum Teil in weitere Kriterien zerlegt, wie Service in die Kriterien Personal, Standorte, Forschung und Entwicklung sowie Leistungsfähigkeit. Nydick und Hill erläutern in ihrem Ansatz zunächst das allgemeine Vorgehen von AHP, um dieses an einem selbstentwickelten Beispiel zu verdeutlichen.<sup>79</sup> Dabei wird ein Zulieferer aus vier möglichen anhand der bereits von Narasimhan verwendeten Kriterien Qualität, Preis, Service und Belieferung ausgewählt.

Barbarosoglu und Yazgac zeigen die Anwendung von AHP bei der Auswahl von Zulieferern bei einem führenden Hersteller von Elektromotoren in der Türkei.<sup>80</sup> Das Oberziel Bewertung von Zulieferern wird dabei zunächst in die drei Unterziele Bewertung der Performance, Bewertung von Geschäftsstruktur und Fertigungspotenzial sowie Bewertung des Qualitätssystems zerlegt. Anschließend werden diese auf zwei bzw. auf drei Ebenen weiterzerlegt, so dass die Zulieferer letztendlich anhand von 63 Attributen miteinander verglichen werden. Die Autoren schlagen vor, das vorgestellte Vorgehen nur für die wenigen Zulieferer von A-Gütern zu verwenden und dieses auf Grund der sich ändernden Daten in regelmäßigen Abständen zu wiederholen. Es ist jedoch nicht zu vernachlässigen, dass das Vorgehen bei dieser großen Anzahl zu berücksichtigender Kriterien, etwa durch die Anzahl der durchzuführenden Paarvergleiche, sehr aufwendig ist.

Ein Ansatz, der neben der Auswahl von Zulieferern auch die von den ausgewählten Zulieferern zu beschaffenden Mengen festlegt, ist der Ansatz von Ghodsypour und O'Brian.<sup>81</sup> In einem ersten Schritt werden mit AHP die Bewertungen der Zulieferer ermittelt, wobei die zu verwendenden Kriterien von der Wettbewerbssituation und der Art der Zusammenarbeit zwischen Zulieferer und Abnehmer abhängen. Ausgehend von den mit AHP ermittelten Bewertungen werden dann die Mengen, die von den jeweiligen Zulieferern beschafft werden sollen, mit Hilfe eines linearen Modells

<sup>77</sup> Vgl. Forman/Gass (2001), S. 484; Saaty (2001), S. 137ff.

<sup>78</sup> Vgl. Narasimhan (1983).

<sup>79</sup> Vgl. Nydick/Hill (1992).

<sup>80</sup> Vgl. Barbarosoglu/Yazgac (1997).

<sup>81</sup> Vgl. Ghodsypour/O'Brian (1998).

ermittelt. Als Restriktionen werden dabei die Kapazitäten der Zulieferer, die zu befriedigende Nachfrage und der maximale Ausschuss, d. h. die Qualität, berücksichtigt.

Yahya und Kingsman wenden AHP bei der Auswahl von Möbelherstellern zur Belieferung öffentlicher Einrichtungen in Malaysia an.<sup>82</sup> Dabei ist das Ziel, nicht nur besonders „gute“ Möbelhersteller auszuwählen, sondern die ausgewählten Zulieferer zu fördern und ihre Wettbewerbsfähigkeit zu steigern. Die Kriterien zur Auswahl der Zulieferer unterscheiden sich folglich von denen der bereits erläuterten Ansätze etwa darin, dass die Regierung die Preise festlegt und der Preis deshalb kein relevantes Auswahlkriterium ist. Die 13 relevanten Kriterien, die durch Befragung der Entscheidungsträger ermittelt wurden, sind neben Qualitäts-, Liefer- und Kapazitätskriterien etwa Ehrlichkeit, Haltung gegenüber Regeln und Vorschriften sowie technische Problemlösungskompetenz. Das Verfahren wurde zur Bewertung von 68 Möbelherstellern eingesetzt und hat diese anhand der Kriterien in eine Rangfolge gebracht. Als besonderen Vorteil sehen die Autoren das formalisierte, systematische Vorgehen des Verfahrens.

Die Bewertung von Zulieferern anhand ökologischer Kriterien greift der Ansatz von Handfield et al. auf.<sup>83</sup> Im Rahmen einer Delphi-Studie wurden die relevanten ökologischen Kriterien mit Produktcharakteristika, Abfallmanagement, Zertifizierung, Verpackung und Recycling, Einhaltung staatlicher Vorschriften sowie das Vorhandensein von Umweltschutzprogrammen ermittelt. Die Ergebnisse dieser Studie wurden bei einem Automobilhersteller, einer Unternehmung der Papierindustrie und einem der Bekleidungsindustrie getestet. Dabei zeigte sich, dass nicht jedes Kriterium für die Auswahl von Zulieferern jeder Branche gleich gut geeignet ist.

Sarkis und Talluri stellen einen Ansatz zur Auswahl von Zulieferern vor, der auf dem Analytic Network Process basiert und damit auch Beziehungen zwischen den Elementen einer Ebene berücksichtigt.<sup>84</sup> So werden beispielsweise die Kosten von Qualität und Zeit beeinflusst und umgekehrt. Nach Ermittlung der paarweisen Vergleichsmatrizen wird eine Supermatrix für die Netzwerkteile der Entscheidungshierarchie aufgestellt. Durch die gewichtete Summe der ermittelten Faktoren wird anschließend die Gesamtbewertung der Zulieferer ermittelt.

Ein interaktives Vorgehen, das auf AHP basiert, zeigt Chan auf.<sup>85</sup> In einem ersten Schritt wird bei diesem Ansatz die Art der Beziehung zu den potenziellen Zulieferern

---

<sup>82</sup> Vgl. Yahya/Kingsman (1999).

<sup>83</sup> Vgl. Handfield et al. (2002).

<sup>84</sup> Vgl. Sarkis/Talluri (2002).

<sup>85</sup> Vgl. Chan (2003).



ermittelt. Die Beziehungen werden anhand der gemeinsamen Aktivitäten hinsichtlich der Produkte, der Prozesse, des Humankapitals und der Technologie bewertet. Ausgehend von diesen Beziehungstypen werden die relevanten Auswahlkriterien festgelegt. In einem interaktiven Prozess werden dann die Gewichte der Kriterien ermittelt und der Analytic Hierarchy Process auf die Bewertung der Zulieferer angewandt.

Zusammenfassend zeigt sich, dass bei der Auswahl von Zulieferern auf Basis von AHP, wie auch bei den Punktbewertungsansätzen, vielfältige und insbesondere qualitative Kriterien verwendet werden, die in Abschnitt 4.3.1 detaillierter zu analysieren sind. Nachfolgend wird jedoch zunächst die Data Envelopment Analysis im Rahmen der Auswahl von Zulieferern diskutiert, bevor eine zusammenfassende Bewertung aller vorgestellten Ansätze erfolgt.

#### 4.2.4 Data Envelopment Analysis

Data Envelopment Analysis (DEA) vergleicht Organisationseinheiten, so genannte Decision Making Units, hinsichtlich ihrer Effizienz und geht auf Charnes, Cooper und Rhodes zurück.<sup>86</sup> Dabei können Organisationseinheiten etwa Produktionsstätten, Unternehmungen, gesamte Volkswirtschaften oder auch Zulieferer sein.<sup>87</sup> Die Effizienz wird als Quotient aus der gewichteten Summe des Outputs in Form von Erzeugnissen und Leistungen und der gewichteten Summe der eingesetzten Produktionsfaktoren gemessen.<sup>88</sup> Die Grundidee der Data Envelopment Analysis ist, die Schwierigkeiten bei der a priori Ermittlung von Gewichten zu vermeiden, und für jede Organisationseinheit die optimalen Gewichte mit Hilfe eines linearen mathematischen Modells zu ermitteln.<sup>89</sup> Bei  $n$  zu vergleichenden Organisationseinheiten müssen  $n$  lineare Optimierungsmodelle gelöst werden, um die für jede Organisationseinheit optimalen Gewichte zu ermitteln.<sup>90</sup> Die auf diese Weise ermittelten Gewichte für die Inputfaktoren und die Outputs werden sich üblicherweise zwischen den verschiedenen Organisationseinheiten unterscheiden.<sup>91</sup> Die Gewichte repräsentieren ein für jede Organisationseinheit eigenes Wertesystem und stehen so dem Einwand entgegen, dass die Gewichtungsfaktoren für eine betrachtete Organisationseinheit nicht passend sind.<sup>92</sup> Organisationseinheiten, die selbst bei völlig freier Wahl der Gewichte keine Effizienz von eins errei-

<sup>86</sup> Vgl. etwa Cantner/Hanusch (1998), S. 228; Cooper/Seiford/Tone (2000), S. 33. Die ursprüngliche Formulierung findet sich bei Charnes/Cooper/Rhodes (1978).

<sup>87</sup> Vgl. Behrens/Varmaz (2004) für eine Anwendung, die DEA nicht für den Vergleich von Organisationseinheiten nutzt.

<sup>88</sup> Vgl. etwa de Boer/Labro/Morlacchi (2001), S. 80.

<sup>89</sup> Vgl. zu den Grundlagen der DEA etwa Cantner/Hanusch (1998); Cooper/Seiford/Tone (2000).

<sup>90</sup> Vgl. Cantner/Hanusch (1998), S. 231.

<sup>91</sup> Vgl. Cooper/Seiford/Tone (2000), S. 33.

<sup>92</sup> Vgl. Allen et al. (1997), S. 14.

chen, werden als ineffizient charakterisiert.<sup>93</sup> Eine Einschränkung der Wahl der Gewichte kann jedoch je nach Art der Anwendung sinnvoll sein, wenn etwa ausgeschlossen werden soll, dass das Gewicht eines Inputfaktors oder Outputs zu gering, etwa null, oder zu hoch, etwa eins, gesetzt wird.<sup>94</sup> Ein Vorteil der Data Envelopment Analysis ist, dass die verschiedenen Inputfaktoren bzw. Outputs völlig unterschiedliche, nicht vergleichbare Einheiten haben können. Daraus resultiert eine häufige Anwendung der DEA im Bereich des Non-Profit-Sektors, weil deren Inputs bzw. Outputs nicht direkt mit Marktpreisen bewertbar sind.<sup>95</sup> Darüber hinaus ist die explizite Nennung einer Produktionsfunktion, die die Transformation der Inputs in Outputs formalisiert, nicht erforderlich. Ein Nachteil der Data Envelopment Analysis ist, dass die Organisationseinheiten lediglich untereinander und nicht mit einer Idealvorstellung verglichen werden, d. h. die Anwendung der DEA führt nur zur Aufdeckung von Ineffizienzen in Bezug auf die „beste“ berücksichtigte Organisationseinheit bzw. in Bezug auf die Kombination mehrerer betrachteter Organisationseinheiten.<sup>96</sup> Nachfolgend werden die Beiträge aus der Literatur, die sich im Rahmen der Auswahl von Zulieferern mit der Data Envelopment Analysis beschäftigen, kurz vorgestellt.

Weber stellt eine Anwendung der Data Envelopment Analysis vor, die sechs potenzielle Zulieferer eines Herstellers von Babynahrung bewertet.<sup>97</sup> Als Kriterien, die für das Produkt relevant sind, werden in Absprache mit dem Hersteller der Preis, der Anteil der verspäteten Lieferungen sowie der Anteil des Ausschusses festgelegt. Da alle berücksichtigten Zulieferer in der Vergangenheit mit dem Hersteller zusammengearbeitet haben, stehen die erforderlichen Daten zur Verfügung. Die durch die Anwendung der Data Envelopment Analysis als effizient charakterisierten Zulieferer können dann als ausgewählt und für die weitere Zusammenarbeit als relevant angesehen werden. Die Data Envelopment Analysis gibt darüber hinaus Auskunft, wie durch Verhandlungen mit den anderen Zulieferern die Effizienz ggf. bis auf „1“ gesteigert werden kann.

Braglia und Petroni haben ein modifiziertes Vorgehen auf Basis der Data Envelopment Analysis für die Auswahl eines Zulieferers für einen Hersteller von Verpackungs- und Abfüllanlagen entwickelt.<sup>98</sup> Als relevante Inputfaktoren werden Managementkompetenz, Produktionskapazität, technische Kompetenz, finanzielle Position, geographische

<sup>93</sup> Vgl. Allen (2002), S. 65.

<sup>94</sup> Vgl. Allen et al. (1997), S. 14ff. Für Ansätze zur Begrenzung der Gewichte vgl. etwa Angulo-Meza/Lins (2002); Pedraja-Chaparro/Salinas-Jimenez/Smith (1997); Thanassoulis (2001), S. 201ff.

<sup>95</sup> Vgl. Kleine (2001), S. 229. Für eine Übersicht über Anwendungsgebiete vgl. etwa Allen (2002), S. 91ff.; Charnes et al. (1994), S. 95ff.; Thanassoulis (2001), S. 13ff.

<sup>96</sup> Vgl. Allen (2002), S. 68.

<sup>97</sup> Vgl. Weber (1996).

<sup>98</sup> Vgl. Braglia/Petroni (2000).

Lage und Erfahrung als relevanter Output Qualität, Liefertermintreue und Preis identifiziert. Die Managementkompetenz und die technische Kompetenz der Zulieferer werden anhand einer Auswertung von Fragebogen bewertet, während für die Erfahrung der Wert der Geschäfte in der Vergangenheit gewählt wird. Nach der Ermittlung der optimalen Gewichte für jeden Zulieferer sind Kreuz-Effizienzen zu ermitteln, d. h. die optimalen Gewichte eines jeden Zulieferers werden auf alle anderen Zulieferer angewandt, so dass eine Matrix von Kreuz-Effizienzen entsteht. Um eine eindeutige Lösung zu erzeugen, wird in einem nächsten Schritt eine neue Zielfunktion eingeführt. Die einfache Effizienz des betrachteten Zulieferers, die mittels der grundlegenden DEA ermittelt wurde, wird als Satisfizierungsrestriktion übernommen, während die durchschnittlichen Kreuz-Effizienzen der anderen Zulieferer maximiert werden.<sup>99</sup> Mit Hilfe einer Clusteranalyse werden abschließend die guten Zulieferer ausgewählt.

Liu, Ding und Lall stellen für die Auswahl und insbesondere die Reduktion der Anzahl der Zulieferer ein iteratives, auf dem dualen Modell der Data Envelopment Analysis basierendes Verfahren vor.<sup>100</sup> Als Inputfaktoren verwenden die Autoren Preis, Lieferperformance und Entfernung. Als relevanter Output werden die Anzahl der verschiedenen Produkte und die Qualität herangezogen. In einem ersten Schritt wird die Effizienz der verschiedenen Zulieferer ermittelt. Die Mengen der Zulieferer mit den schlechtesten 10% Effizienz werden den Zulieferern mit einer höheren Effizienz, die noch freie Kapazität haben, zugewiesen. So wird die Basis der zu betrachtenden Zulieferer reduziert und nach der Neuverteilung der Mengen führt die Data Envelopment Analysis zu veränderten Effizienzen und das Vorgehen kann wiederholt werden. Darüber hinaus werden Ziele für die ineffizienten Zulieferer ermittelt, die bei Verhandlungen als Basis dienen können.

Ein weiterer auf der Data Envelopment Analysis basierender Ansatz zur Auswahl von Zulieferern, der darüber hinaus die Mengen festlegt, die vom jeweiligen Zulieferer beschafft werden, ist das Vorgehen von Weber, Current und Desai.<sup>101</sup> Ausgehend von einem linearen Zielgewichtungsmo-  
dell, das auf einem früheren Ansatz von Weber und Current basiert,<sup>102</sup> werden für verschiedene exogen festzulegende Gewichte der Ziele Preisminimierung, Lieferterminüberschreitungsminimierung und Ausschussminimierung die optimalen Mengen ermittelt, die von den verschiedenen Zulieferern bezogen werden sollten. Ein einzelner Zulieferer kann aus Kapazitätsgründen die Nachfrage nicht vollständig befriedigen. Die maximale Anzahl der verschiedenen Zulieferer wird begrenzt und bei wiederholten Durchläufen des mathematischen Zielgewichtungs-

<sup>99</sup> Vgl. zu den verschiedenen Arten der Kreuz-Effizienz etwa Doyle/Green (1994).

<sup>100</sup> Vgl. Liu/Ding/Lall (2000).

<sup>101</sup> Vgl. Weber/Current/Desai (2000).

<sup>102</sup> Vgl. Weber/Current (1993).

dells variiert. Die auf diese Weise ermittelten optimalen Kombinationen von Zulieferern werden als Superzulieferer bezeichnet. Als Benchmark zur Bewertung der Superzulieferer mit Hilfe der Data Envelopment Analysis werden die Lösungen des mathematischen Modells mit unbegrenzter Kapazität bei Verwendung jeweils einer Zielfunktion genutzt. Eine Ausweitung bzw. Variation dieses Ansatzes, der die Data Envelopment Analysis mit der mathematischen Optimierung kombiniert, ist denkbar, beispielsweise hinsichtlich weiterer quantifizierbarer Ziele oder weiterer Restriktionen zur Ermittlung der Superzulieferer.

Talluri stellt einen Ansatz vor, der mit einer Kombination von Goal-Programming und der Data Envelopment Analysis die Auswahl der Zulieferer vornimmt.<sup>103</sup> In einem ersten Schritt wird das von Charnes, Cooper und Rhodes<sup>104</sup> entwickelte Modell zur Data Envelopment Analysis um Restriktionen erweitert, die die Gewichtsflexibilität einschränken. Diese zusätzlichen Einschränkungen spiegeln die subjektiven Vorstellungen des Entscheidungsträgers wider, etwa dass der Preis doppelt so wichtig ist wie die Qualitätsanforderung. Nach der Ermittlung der Effizienz der einzelnen Zulieferer können die effizienten Preise je Stück für jeden Zulieferer als Produkt aus Effizienz und Preis je Stück ermittelt werden. Anschließend wird in einem Zielprogrammierungsmodell die Summe der gewichteten Abweichung der Grenzkosten von den effizienten Stückpreisen über alle Zulieferer minimiert. Die so ermittelten Grenzkosten zeigen dem Käufer, wie viel er zusätzlich zahlen muss, um den Output, etwa den Ausschuss, um eine Einheit zu verringern. Dieser Ansatz gibt dem Käufer neben der Ermittlung der effizienten Zulieferer die Möglichkeit, auch mit ineffizienten Zulieferern zu verhandeln. Dieses Vorgehen ist insbesondere im Rahmen einer Förderung der Zulieferer mit der Zielsetzung sinnvoll, eine langjährige Partnerschaft aufzubauen.<sup>105</sup>

Talluri und Narasimhan stellen einen auf der Data Envelopment Analysis basierenden Ansatz vor, der neben der besten erreichbaren Effizienz auch die schlechteste mögliche Effizienz berücksichtigt.<sup>106</sup> Mit Hilfe statistischer Methoden werden jeweils zwei Zulieferer zu einer Gruppe zusammengefasst. Die zwei Zulieferer der „besten“ Gruppe werden dann als ausgewählt betrachtet. Die endgültige Entscheidung für einen dieser Zulieferer kann auf Basis von bis dato nicht berücksichtigten, eventuell nicht quantifizierbaren Kriterien getroffen werden. Das vorgestellte Verfahren wird auf die Auswahl eines Zulieferers der pharmazeutischen Industrie angewandt.<sup>107</sup>

<sup>103</sup> Vgl. Talluri (2002).

<sup>104</sup> Vgl. Charnes/Cooper/Rhodes (1978).

<sup>105</sup> Vgl. hierzu auch Abschnitt 2.3.2.

<sup>106</sup> Vgl. Talluri/Narasimhan (2002).

<sup>107</sup> Die Daten sind der Studie von Weber/Desai (1996) entnommen.

In den vorgestellten Ansätzen zur Auswahl der Zulieferer zeigt sich, dass die Data Envelopment Analysis mit linearer Programmierung bzw. Zielprogrammierung kombiniert wird, um eine simultane Berücksichtigung aller relevanten Zulieferer zu ermöglichen. Obwohl die Data Envelopment Analysis eher ein Instrument zur Bewertung als zur Auswahl ist, lassen sich dennoch auf Basis dieser Bewertungen Auswahlentscheidungen treffen. Darüber hinaus wird bei den vorgestellten Ansätzen deutlich, dass ein Vergleich der Effizienzen der verschiedenen Zulieferer für Nachverhandlungen genutzt werden kann.

#### 4.2.5 Analyse und Bewertung der vorgestellten Verfahren

Die in der Literatur verwendeten Ansätze zur Auswahl von Zulieferern umfassen im Wesentlichen Punktbewertungsansätze, mathematische Optimierungsansätze sowie Ansätze, die auf dem Analytic Hierarchy Process oder der Data Envelopment Analysis basieren. Dabei können die Präferenzen des Entscheidungsträgers vor der Auswahlentscheidung ermittelt und berücksichtigt werden, wie bei den Punktbewertungsansätzen. Alternativ können die Präferenzen nach der Anwendung des Ansatzes berücksichtigt werden, etwa indem mit Hilfe eines mathematischen Modells durch verschiedene Zielgewichtungen mehrere optimale Lösungen generiert werden und der Entscheidungsträger die gemäß seiner individuellen Präferenzen bevorzugte Lösung auswählt. Hat der Entscheider während des Ansatzes die Möglichkeit, seine Präferenzen einzubringen oder zu modifizieren, so handelt es sich um ein interaktives Vorgehen, indem der Entscheider etwa im Rahmen eines Zielgewichtungsansatzes die Gewichte solange modifiziert, bis die Ergebnisse seinen Präferenzen entsprechen.

Insgesamt zeigt sich, dass die vorgestellten Ansätze nicht für die Findung objektiv bester Lösungen geeignet sind, d. h. keine Lösung ermitteln, die von jedem Entscheidungsträger als beste Lösung akzeptiert wird. Vielmehr dienen die erläuterten Ansätze der Entscheidungsunterstützung, so dass der Entscheidungsträger, die Problemstruktur und die Zusammenhänge zwischen Annahmen, Daten, Problemstruktur und Problemlösung analysieren und abschließend eine Entscheidung gemäß seiner individuellen Präferenzen treffen kann.<sup>108</sup>

In Tabelle 4.2 werden die vorgestellten Ansätze zur Bewertung und Auswahl von Zulieferern sowie die Literaturquellen, in denen diese verwendet werden, zusammenfassend dargestellt. Es zeigt sich, dass die Punktbewertungsansätze selten verwendet werden und insbesondere in der neueren Literatur häufig nicht zu finden sind. Dies resultiert teilweise aus den vielfältigen Bewertungen, die der Entscheider gemäß

<sup>108</sup> Vgl. Zanakis et al. (1998), S. 528.

seinen Präferenzen vornehmen muss, beispielsweise bei der Festlegung der Gewichte der einzelnen Kriterien oder bei der Bewertung der Kriterienausprägungen mit den Punkten.<sup>109</sup> Zusätzlich wird bei der Verdichtung zu einem Nutzwert, der als dimensionslose Größe schwierig zu interpretieren ist, die Substituierbarkeit zwischen den verschiedenen Kriterien vorausgesetzt.<sup>110</sup> Ansätze im Rahmen der Data Envelopment Analysis finden sich in der aktuelleren Literatur und werden häufig mit mathematischen Ansätzen kombiniert, um so eine simultane Berücksichtigung aller Zulieferer und eine Aufteilung der gesamten zu beschaffenden Menge auf diese zu ermöglichen.<sup>111</sup>

Quelle	Ansatz
Min (1994)	Multi-Attributive Nutzentheorie
Gregory (1986) Humphreys/Wong/Chan (2003) Patton (1996) Petroni/Braglia (2000) Timmermann (1986)	Punktbewertungsansätze
Buffa/Jackson (1983) Cakravastia/Toha/Nakamura (2002) Chaudhry/Forst/Zydiak (1993) Degraeve/Roodhooft (2000) Gao/Tang (2003) Ghodsypour/O'Brian (2001) Jayaraman/Srivastava/Benton (1999) Pan (1989) Smytka/Clemens (1993) Weber/Current (1993) Weber/Ellram (1993)	Mathematische Optimierung
Barbarasoglu/Yazgac (1997) Bhutta/Huq (2002) Chan (2003) Ghodsypour/O'Brian (1998) Handfield et al. (2002) Narasimhan (1983) Nydick/Hill (1992) Yahya/Kingsman (1999)	Analytic Hierarchy Process
Sarkis/Talluri (2002)	Analytical Network Process
Braglia/Petroni (2000) Liu/Ding/Lall (2000) Talluri (2002) Talluri/Narasimhan (2002) Weber (1996) Weber/Current/Desai (2000)	Data Envelopment Analysis

**Tabelle 4.2: Ansätze zur Bewertung und Auswahl von Zulieferern**

<sup>109</sup> Vgl. Adam (1996), S. 420f.

<sup>110</sup> Vgl. Adam (1996), S. 420f.

<sup>111</sup> Vgl. etwa Talluri (2002); Weber/Current/Desai (2000).

Wie in Abschnitt 4.2.3 erläutert, weisen die auf dem Analytic Hierarchy Process basierenden Ansätze den Nachteil auf, dass AHP bei einer großen Anzahl zu berücksichtigender Zulieferer und Attribute sehr aufwendig ist. Darüber hinaus werden bei den auf AHP basierenden Ansätzen die Aufteilungen der Mengen zwischen den verschiedenen Zulieferern sowie die Berücksichtigung der Kapazitäten der Zulieferer entweder nicht<sup>112</sup> oder mit Hilfe mathematischer Optimierungsmodelle<sup>113</sup> vorgenommen.

Die meisten der vorgestellten Ansätze basieren auf mathematischer Optimierung und beinhalten somit den Vorteil einer simultanen Berücksichtigung auch einer großen Anzahl von Zulieferern und Kriterien. Des Weiteren hat die Entwicklung leistungsfähiger Computer und anwenderfreundlicher Softwareprogramme den Umgang mit mathematischen Optimierungsmodellen erleichtert und damit auch die Akzeptanz beim Anwender gefördert. Mathematische Optimierungsmodelle ermöglichen die strukturierte Analyse umfangreicher Problemstellungen, die wie beim Supply Chain Design etwa durch eine Vielzahl interdependenter Verknüpfungen zwischen den verschiedenen potenziellen Standorten charakterisiert sein können. Auf diese Weise gestatten mathematische Optimierungsmodelle eine integrierte Betrachtung der Zuliefererauswahl im Rahmen des Supply Chain Design. Im folgenden Abschnitt werden in einem nächsten Schritt die in der Literatur verwendeten Auswahlkriterien analysiert und im Hinblick auf ihre Eignung hinsichtlich verschiedener Beschaffungssituationen untersucht.

### 4.3 Kriterien zur Auswahl von Zulieferern

#### 4.3.1 Analyse der in der Literatur verwendeten Auswahlkriterien

Ein häufig zitiertes Schema von Bewertungskriterien<sup>114</sup> für Zulieferer ist das von Weber, Current und Benton aus dem Jahr 1991.<sup>115</sup> Die Autoren haben 74 Artikel aus dem Bereich Beschaffung unter anderem anhand der verwendeten Bewertungskriterien klassifiziert. Ausgehend von einer Studie von Dickson<sup>116</sup>, die auf einer Umfrage bei 170 Mitarbeitern des Einkaufs basiert, wurden die folgenden Kriterien zur Bewertung von Zulieferern verwendet:

- Nettopreis
- Qualität

<sup>112</sup> Vgl. etwa Barbarosoglu/Yazgac (1997); Bhutta/Huq (2002); Yahya/Kingsman (1999).

<sup>113</sup> Vgl. etwa Ghodsypour/O'Brian (1998).

<sup>114</sup> Vgl. etwa Choi/Hartley (1996), S. 334; Degraeve/Labro/Roodhooft (2000), S. 34; Petroni/Braglia (2000), S. 64.

<sup>115</sup> Vgl. Weber/Current/Benton (1991).

<sup>116</sup> Vgl. Dickson (1966).

- Kundendienst
- Liefertermintreue
- geografische Lage
- finanzielle Lage
- Produktionsstätten und Kapazität
- Wert der bereits abgewickelten Geschäfte
- technische Ausstattung
- Management und Organisation
- zukünftige Einkäufe des Zulieferers bei der eigenen Unternehmung
- Kommunikationssysteme
- Produktionskontrollen
- Position im Vergleich zur Konkurrenz
- Ruf bezüglich des Umgangs mit Mitarbeitern
- Haltung zum Auftraggeber
- gezeigtes Interesse an einer Zusammenarbeit
- Umgang mit Garantie und Haftungsansprüchen
- Erfüllung der Verpackungsanforderungen
- Eindruck des Zulieferers bei persönlichen Gesprächen
- Möglichkeit von Schulungen und Hilfen beim Umgang mit dem zu kaufenden Produkt
- Übereinstimmung bzw. Harmonie der Ausschreibungs- und Abwicklungsverfahren der Beschaffung
- Performance in der Vergangenheit

In Tabelle 4.3 werden die in dieser Arbeit vorgestellten Ansätze hinsichtlich dieser Kriterien für die Auswahl von Zulieferern analysiert. Die Tabelle 4.3 verdeutlicht, dass Preis, Qualität<sup>117</sup> und Liefertermintreue wie bei Weber, Current und Benton die am häufigsten verwendeten Kriterien sind.<sup>118</sup> Bei einer von Dickson durchgeführten Umfrage hatten Qualität und Liefertermintreue bei der Auswahl von Zulieferern die höchste Bedeutung. Der Nettopreis wurde von den Unternehmungen hingegen erst an sechster Stelle genannt.<sup>119</sup> Bei Vonderembse und Tracey wurde ebenfalls eine Umfrage mit 268 beteiligten Mitarbeitern des Einkaufs durchgeführt, die vorgegebene Zuliefererkriterien hinsichtlich der Wichtigkeit bei der Auswahl von Zulieferern auf

<sup>117</sup> Qualität bezeichnet an dieser Stelle die Eigenschaft des zu beschaffenden Produktes, die das Produkt für die Verwendung geeignet macht (funktionsbezogene Gebrauchsqualität). Vgl. etwa Busse von Colbe/Hammann/Laßmann (1992), S. 141 und die dort angegebene Literatur.

<sup>118</sup> Vgl. Weber/Current/Benton (1991), S. 12.

<sup>119</sup> Vgl. Dickson (1966), S. 13.



einer Skala von eins, d. h. unwichtig, bis fünf, d. h. sehr wichtig, bewerten sollten.<sup>120</sup> Die zur Bewertung angegebenen Kriterien Produktqualität, Produktverfügbarkeit, Liefertermintreue sowie Performance des Produktes wurden zwischen 4,50 und 4,84 mit einer geringen Standardabweichung von maximal 0,62 bewertet.<sup>121</sup> Die Kriterien können folglich als weitgehend gleich bedeutend eingestuft werden. Allerdings ist anzumerken, dass der Preis der Produkte nicht als relevantes Kriterium berücksichtigt wird.

Kriterien	Ansätze zur Auswahl von Zulieferern																						
	Preis / Kosten	Qualität	Kundendienst / Service	Liefertermintreue	Geografische Lage	Finanzielle Lage	Art der Produktionsstätten / Kapazität	Wert der vergangenen Geschäfte	Technische Ausstattung	Management und Organisation	Reziproke Geschäfte	Art der Kommunikationssysteme	Produktionskontrollen	Position im Vergleich zu Konkurrenz	Führungsstil/Mitarbeiterbehandlung	Haltung zum Auftraggeber	Interesse an der Zusammenarbeit	Garantie / Haftung	Verpackung	Persönlicher Eindruck des Zulieferers	Produktschulungen	Prozessharmonie	Performance in der Vergangenheit
Barbarasoglu/Yazgac (1997)	x		x			x	x			x													
Bhutta/Huq (2002)	x	x	x							x									x				
Braglia/Petroni (2000)	x	x		x	x	x	x	x	x														
Buffa/Jackson (1983)	x	x		x																			
Cakravastia/Toha/Nakamura (2002)	x			x																			
Chan (2003)	x	x					x	x		x	x			x			x	x					x
Chaudhry/Forst/Zydiak (1993)	x	x		x				x															
Degraeve/Roodhooft (2000)	x																						
Gao/Tang (2003)	x	x		x																			
Ghodsypour/O'Brian (2001)	x	x																					
Ghodsypour/O'Brian (1998)	x	x		x				x															
Gregory (1986)	x	x								x	x												
Handfield et al. (2002)																							
Humphreys/Wong/Chan (2003)																							
Jayaraman/Srivastava/Benton (1999)	x	x		x																			
Liu/Ding/Lall (2000)	x	x		x	x																		
Min (1994)	x	x	x	x			x					x						x					
Narasimhan (1983)	x	x		x				x		x	x												
Nydick/Hill (1992)	x	x	x	x																			
Pan (1989)	x	x	x	x																			
Patton (1996)	x	x		x			x	x															
Petroni/Braglia (2000)	x	x		x				x		x	x												
Sarkis/Talluri (2002)	x	x	x	x				x		x	x				x	x	x			x			x
Smytka/Clemens (1993)	x																						
Talluri (2002)	x	x		x																			
Talluri/Narasimhan (2002)	x	x		x																			
Timmermann (1986)	x	x	x	x																			
Weber (1996)	x	x		x																			
Weber/Current (1993)	x	x		x																			
Weber/Current/Desai (2000)	x	x		x																			
Weber/Eltram (1993)	x	x		x																			
Yahya/Kingsman (1999)	x			x			x			x	x						x						x

Tabelle 4.3: In der Literatur verwendete Kriterien zur Auswahl von Zulieferern

<sup>120</sup> Vgl. Vonderembse/Tracey (1999), S. 33ff.

<sup>121</sup> Vgl. Vonderembse/Tracey (1999), S. 35.

Ausgehend von den Kriterien von Weber, Current und Benton werden in Tabelle 4.3 sowohl dem Ansatz von Handfield et al. als auch dem Ansatz von Humphreys, Wong und Chang keine Kriterien zugeordnet, da diese Ansätze ausschließlich auf ökologischen Kriterien basieren, die bei Weber, Current und Benton nicht berücksichtigt werden.<sup>122</sup> Darüber hinaus konnten bei einigen weiteren Ansätzen nicht alle Kriterien aufgezeigt werden, da etwa bei Barbarosoglu und Yazgac sehr detailliert 63 relevante Kriterien berücksichtigt werden, die auf dieser Detaillierungsebene bei Weber, Current und Benton nicht unterschieden werden.<sup>123</sup> Im Gegensatz dazu werden Kriterien, wie Wert der reziproken Geschäfte, Position im Vergleich zur Konkurrenz, Garantie und Haftung sowie Schulungen im Umgang mit dem Produkt in keinem der betrachteten Ansätze berücksichtigt. Auffällig ist des Weiteren, dass in jedem der Ansätze explizit mehr als zwei Kriterien berücksichtigt werden. Eine Ausnahme bildet der Ansatz von Smytka und Clemens, bei dem auf Grund qualitativer Kriterien eine Einschränkung der Menge der potenziellen Zulieferer erfolgt.<sup>124</sup> Explizit werden dann jedoch ausschließlich Kosten berücksichtigt. Die Anzahl der berücksichtigten Kriterien kann nahezu beliebig gesteigert werden. So hat Scherer in diesem Zusammenhang bereits rund 130 Kriterien aus der Literatur zusammengestellt.<sup>125</sup> Fraglich ist jedoch, ob alle Kriterien für alle zu beschaffenden Objekte relevant sind und ob ein hoher Detaillierungsgrad der Kriterien gerade auch im Zusammenhang mit dem Aufwand der Informationsbeschaffung für alle Beschaffungsobjekte sinnvoll ist. Dieser Frage wird im folgenden Kapitel nachgegangen und darüber hinaus werden Kriterien zur Bewertung und Auswahl von Zulieferern in Abhängigkeit von der Beschaffungssituation entwickelt.

### 4.3.2 Entwicklung beschaffungssituationsspezifischer Auswahlkriterien

Wie im vorherigen Abschnitt gezeigt, sind die im Zusammenhang mit der Auswahl von Zulieferern verwendeten Kriterien vielfältig und nicht einheitlich. Zunächst wird daher erläutert, inwiefern sich Beschaffungssituationen bei der Auswahl von Zulieferern unterscheiden und anhand welcher Differenzierungsmerkmale diese charakterisiert werden können.

In einem ersten Schritt kann die Beschaffungssituation anhand des zu beschaffenden Gutes klassifiziert werden. Dabei sind Güter „alle Sachgegenstände, Arbeits- und

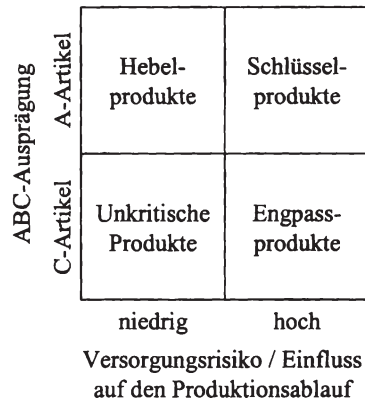
<sup>122</sup> Vgl. Handfield et al. (2002); Humphreys/Wong/Chan (2003). Für ein Umweltkennzahlensystem anhand dessen Zulieferer bewertet werden können vgl. Steven/Letmathe (2000).

<sup>123</sup> Vgl. Barbarosoglu/Yazgac (1997).

<sup>124</sup> Vgl. Smytka/Clemens (1993).

<sup>125</sup> Vgl. Scherer (1991), S. 188ff.

Dienstleistungen oder auch Informationen und andere immaterielle Werte, die im Produktions- und Tauschprozess verwendet werden“<sup>126</sup>. Nach der Stellung im Produktionsprozess können die Güter in Produktionsfaktoren und Produkte unterschieden werden.<sup>127</sup> Ausgehend von der jeweiligen Unternehmung der Supply Chain, die die Zulieferer auswählt, handelt es sich bei den zu beschaffenden Gütern um Produktionsfaktoren, wohingegen es sich aus der Sicht des Zulieferers um Produkte handelt. Im Folgenden werden daher die Begriffe je nach Sicht synonym für die zu beschaffenden Güter verwendet. Wie bereits in Abschnitt 4.1 im Rahmen der Definition des Beschaffungsbegriffs erläutert, können die Produktionsfaktoren weiter untergliedert werden in Betriebsmittel, Werkstoffe und Arbeitsleistungen. Im Zusammenhang mit dem hier definierten Beschaffungsbegriff<sup>128</sup> werden die Verbrauchsfaktoren und Zwischenprodukte weiterbetrachtet.



**Abbildung 4.3: Versorgungsrisiko-ABC-Portfolio**

(Quelle: In Anlehnung an Westermann (1989), S. 21; Wildemann (2002), S. 71.)

Bei der Auswahl von Zulieferern ist eine Unterscheidung der zu beschaffenden Güter gemäß der ABC-Analyse denkbar, wobei A-Produkte einen geringen Mengenanteil, jedoch einen hohen Wertanteil und C-Produkte einen hohen Mengenanteil, jedoch einen geringen Wertanteil aufweisen.<sup>129</sup> Darüber hinaus ist eine Unterscheidung nach dem Versorgungsrisiko möglich. Das Versorgungsrisiko wird dabei etwa an der Zahl der Zulieferer, den Möglichkeiten zur Eigenfertigung oder Substitution des Produktes, den Lagerungsrisiken, der Störanfälligkeit von Transportwegen oder auch am Einfluss

<sup>126</sup> Busse von Colbe/Laßmann (1991), S. 72.

<sup>127</sup> Vgl. Busse von Colbe/Laßmann (1991), S. 76.

<sup>128</sup> Vgl. Abschnitt 4.1.

<sup>129</sup> Vgl. zur ABC-Analyse etwa Arndt (2004), S. 81ff.; Domschke/Scholl (2003), S. 138ff.; Kistner/Steven (2001), S. 38ff.

auf den Produktionsprozess erfasst.<sup>130</sup> Werden ABC-Analyse und Versorgungsrisiko simultan berücksichtigt, so können die zu beschaffenden Produkte gemäß dem in Abbildung 4.3 dargestellten Portfolio klassifiziert werden.

Anstelle der ABC-Ausprägung wird häufig auch der Einfluss auf das Betriebsergebnis genannt, so dass dann von einem Ergebnis-Beschaffungsrisiko-Portfolio oder einem Beschaffungsobjektportfolio gesprochen wird.<sup>131</sup> Der Einfluss auf das Betriebsergebnis wird dabei etwa an dem Anteil des Produktes an den gesamten Beschaffungskosten, dem Einfluss auf das Unternehmungswachstum und dem Einfluss auf die Produktqualität gemessen.<sup>132</sup> Die Beschaffungsobjekte werden ebenfalls in Hebelprodukte, Schlüsselprodukte, Engpassprodukte und unkritische Objekte untergliedert.

**Schlüsselprodukte** zeichnen sich durch ein hohes Versorgungsrisiko und einen hohen Einfluss auf das Betriebsergebnis aus, so dass bei diesen Produkten eine sorgfältige Auswahl der Zulieferer geboten ist. Häufig stehen jedoch gerade für diese Produkte, insbesondere wenn es sich um Spezialprodukte handelt, nur wenige Zulieferer zur Verfügung, so dass hier der Aufbau einer langfristigen Zusammenarbeit mit einem Zulieferer, Analysen zur Eigenfertigung sowie die Unterstützungen von Standardisierungsmaßnahmen zu erörtern sind.<sup>133</sup> Sollte ein Auswahlprozess bei diesen Produkten möglich sein, so sind auf Grund der Langfristigkeit der Beziehungen vielfältige Auswahlkriterien, wie finanzielle Stabilität, Vertrauen, Lieferzuverlässigkeit oder Forschungs- und Entwicklungspotenzial zu berücksichtigen.

Im Gegensatz dazu zeichnen sich **unkritische Produkte** durch einen geringen Einfluss auf das Betriebsergebnis und ein niedriges Versorgungsrisiko aus, d. h., bei diesen Produkten stehen in der Regel viele verschiedene Zulieferer zur Wahl. Der Beschaffungsaufwand sollte jedoch auf Grund des geringen Einflusses auf das Betriebsergebnis und des geringen Werts der Güter überschaubar sein,<sup>134</sup> so dass eine Auswahl der Zulieferer auf Basis der Kosten im Regelfall sinnvoll ist.

**Engpassprodukte**, die den Teil der C-Artikel mit einem hohen Versorgungsrisiko umfassen, sind neben den Schlüsselprodukten als kritisch zu betrachten.<sup>135</sup> So können beispielsweise fehlende Typenschilder als Engpassprodukte die Auslieferung fertiger Produkte verhindern. Auf Grund des geringen Einflusses auf das Betriebsergebnis

<sup>130</sup> Vgl. Kraljic (1985), S. 9; Westermann (1989), S. 21.

<sup>131</sup> Vgl. Koppelman (2004), S. 49; Schulte (2001), S. 382ff.; van Weele (2002), S. 147. Als Ursprung dieses Portfolios wird in diesen Quellen Kraljic genannt. Vgl. etwa Kraljic (1983) oder Kraljic (1985).

<sup>132</sup> Vgl. Schulte (2001), S. 380; van Weele (2002), S. 146.

<sup>133</sup> Vgl. Schulte (2001), S. 382.

<sup>134</sup> Vgl. van Weele (2002), S. 149.

<sup>135</sup> Vgl. Schulte (2001), S. 383.

sollten statt der Kostengesichtspunkte vielmehr die Zuverlässigkeit des Zulieferers, etwa hinsichtlich Liefertermintreue und/oder Qualität, im Vordergrund stehen. Werden dennoch die Preise der Engpassprodukte als Auswahlkriterium mit der höchsten Priorität betrachtet, so ist die Versorgung mit diesen eher geringwertigen Produkten durch ausreichende Lagerhaltung sicherzustellen.

Bei den **Hebelprodukten** liegt ein hoher Einfluss auf das Betriebsergebnis verbunden mit einem niedrigen Versorgungsrisiko vor. Wegen des niedrigen Versorgungsrisikos kann tendenziell davon ausgegangen werden, dass eine hohe Anzahl möglicher Zulieferer zur Verfügung steht, so dass hier aggressiv am Markt agiert werden kann.<sup>136</sup> Insbesondere sollte neben dem Preis bzw. den Kosten, die das zu beschaffende Produkt verursacht, wegen des hohen Einflusses auf das Betriebsergebnis Wert auf Qualität und Service des Zulieferers, etwa in Form der Lagerbetreuung durch den Zulieferer in Anlehnung an Vendor Managed Inventory,<sup>137</sup> gelegt werden.

Eine Unterscheidung der Beschaffungsobjekte in Standardprodukte und Spezialanfertigungen kann zur Unterscheidung hinsichtlich des Versorgungsrisikos konform sein. So werden Spezialanfertigungen in der Regel von einem Zulieferer durchgeführt und weisen dadurch ein hohes Versorgungsrisiko auf. Darüber hinaus ist ein Wechsel des Zulieferers häufig nicht kurzfristig und nicht ohne hohe Kosten möglich.<sup>138</sup>

Die Beschaffungssituation lässt sich jedoch nicht allein nach der Art des Beschaffungsobjektes klassifizieren. Eine Klassifikation der Güter nach dem Bedarfsverlauf bietet die RSU bzw. XYZ-Analyse.<sup>139</sup> Dabei sind X- bzw. R-Güter durch einen stetigen, regelmäßigen und daher gut prognostizierbaren Verbrauch gekennzeichnet. Y- bzw. S-Güter unterliegen trendmäßigen oder saisonalen Schwankungen und verfügen über eine mittlere Vorhersagegenauigkeit, wohingegen Z- bzw. U-Güter sehr unregelmäßigen Schwankungen und damit einer niedrigen Vorhersagegenauigkeit unterliegen.<sup>140</sup> Bei diesen Gütern wird auch von einem sporadischen Bedarf gesprochen.<sup>141</sup> Da im Rahmen dieser Arbeit die Bedarfe der zu beschaffenden Güter in einem ersten Schritt als bekannt angenommen werden und darüber hinaus die Annahme nicht saisonal schwankender Nachfrage getroffen wird, können die hier zu betrachtenden Güter als X- bzw. R-Güter charakterisiert werden.

<sup>136</sup> Vgl. Schulte (2001), S. 383.

<sup>137</sup> Vgl. für Erläuterungen zum Vendor Managed Inventory etwa Werners/Thorn (2002).

<sup>138</sup> Vgl. van Weele (2002), S. 148f.

<sup>139</sup> Vgl. etwa Alicke (2003), S. 29; Nebl (2004), S. 248; Tempelmeier (2003), S. 31f.

<sup>140</sup> Vgl. etwa Schulte (2001), S. 77f.; Tempelmeier (2003), S. 31f.

<sup>141</sup> Vgl. Tempelmeier (2003), S. 31. Alicke (2003), S. 29 unterscheidet neben X-, Y- und Z-Gütern zusätzlich S-Güter, die einen sporadischen Bedarf aufweisen, der beispielsweise bei Ersatzteilen auftritt.

Eine Unterscheidung der Beschaffungssituation nach einmaliger oder wiederholter Beschaffung ist im Rahmen des Supply Chain Design nicht sinnvoll, da es sich bei den betrachteten Gütern um Verbrauchsfaktoren und Zwischenprodukte handelt, die im Regelfall wiederholt beschafft werden.

Eng mit der Beschaffungssituation und damit auch mit den relevanten Kriterien zur Auswahl der Zulieferer ist die Art der Beziehung zwischen Zulieferer und Abnehmer verknüpft. Dabei lassen sich die Beziehungen zwischen Zulieferer und Abnehmer zunächst nach dem Grad der Kooperation charakterisieren.<sup>142</sup> Als extreme Positionen sind in diesem Zusammenhang kurzfristige wettbewerbsorientierte Zusammenarbeit und langfristige kooperative Zusammenarbeit denkbar.<sup>143</sup> Dabei basiert die kurzfristige Zusammenarbeit im Wesentlichen auf dem Preis und auf einem ausgeprägten Konkurrenzverhalten, bei dem keine oder nur wenige Informationen ausgetauscht werden.<sup>144</sup> Im Gegensatz dazu ist die langfristige kooperative Zusammenarbeit durch einen intensiven Informationsaustausch und damit durch Vertrauen und eine ausgeprägte Zusammenarbeit charakterisiert.<sup>145</sup> Diese beiden Extrempositionen sowie zwei weitere Zwischenpositionen können, wie in Abbildung 4.4 dargestellt, anhand der Investitionen in die Zusammenarbeit charakterisiert werden. Dabei kann es sich bei den Investitionen um monetär bewertbare Investitionen, wie den Ausbau von Produktionsstätten, Lagern und Fertigungsanlagen oder um weniger greifbare Investitionen, wie das Kennenlernen der Unternehmenskultur und den Erfahrungsaustausch, handeln.<sup>146</sup>

Investitionen des Abnehmers	hoch	abhängiger Abnehmer	strategische Partnerschaft
	niedrig	marktlicher Austausch	abhängiger Zulieferer
		niedrig	hoch
		Investitionen des Zulieferers	

**Abbildung 4.4: Zulieferer-Abnehmer-Beziehungstypen-Portfolio**  
(Quelle: In Anlehnung an Bensaou (1999), S. 36.)

<sup>142</sup> Vgl. Eßig (2001), S. 70 sowie die Ausführungen zum Supplier Relationship Management in Abschnitt 2.3.2.

<sup>143</sup> Vgl. etwa Leenders et al. (2002), S. 321; Monczka/Trent/Handfield (2005), S. 105; Schulte (2001), S. 431f.

<sup>144</sup> Vgl. Leenders et al. (2002), S. 321; Schulte (2001), S. 432.

<sup>145</sup> Vgl. Leenders et al. (2002), S. 321; Lyons/Gillingham (2003), S. 365; Monczka/Trent/Handfield (2005), S. 105.

<sup>146</sup> Vgl. Bensaou (1999), S. 38ff.

Die verschiedenen Zulieferer-Abnehmer-Beziehungen werden abhängig vom Beschaffungsobjekttyp realisiert bzw. vorangetrieben. So wird der marktliche Austausch bei standardisierten Produkten realisiert, die der Zulieferer vielen Abnehmern anbietet und der Abnehmer von vielen Zulieferern beziehen kann,<sup>147</sup> d. h. bei unkritischen Produkten. Eine strategische Partnerschaft wird sich am ehesten bei den Schlüsselprodukten realisieren. Eine Beziehung, in der der Abnehmer vom Zulieferer abhängig ist, kann sich bei Produkten mit einem hohen Versorgungsrisiko, d. h. bei Engpass- und Schlüsselprodukten, einstellen. Eine Beziehung mit einem abhängigen Zulieferer wird sich eher bei Produkten mit einem niedrigen Versorgungsrisiko einstellen, folglich beispielsweise bei Hebelprodukten, da der Abnehmer zwischen verschiedenen weiteren Zulieferern wählen kann.

Neben den Beziehungstypen zwischen Zulieferern und Abnehmern kann die Beschaffungssituation anhand der Art der Zulieferer charakterisiert werden. Dabei werden, wie in Abbildung 4.5 dargestellt, Hebelzulieferer, Kernzulieferer, kritische sowie unkritische Zulieferer unterschieden.<sup>148</sup> Diese zeichnen sich durch ein hohes oder niedriges Versorgungsrisiko und durch einen hohen oder niedrigen Anteil des Abnehmers am Gesamtumsatz des Zulieferers aus.<sup>149</sup> An Stelle des Versorgungsrisikos kann in diesem Portfolio auch der Marktanteil des Zulieferers am relevanten Markt betrachtet werden.<sup>150</sup>

Anteil am Umsatz des Zulieferers	hoch	Hebel- zulieferer	Kern- zulieferer
	niedrig	Unkritischer Zulieferer	Kritischer Zulieferer
		niedrig	hoch
		Versorgungsrisiko/ Marktbedeutung	

**Abbildung 4.5: Zuliefererportfolio**

(Quelle: In Anlehnung an von Weele (2002), S. 147; Kraljic (1988), S. 486.)

<sup>147</sup> Vgl. Boutellier/Wagner/Wehrli (2003), S. 699f.

<sup>148</sup> Vgl. Kraljic (1988), S. 485f.; van Weele (2002), S. 147f.

<sup>149</sup> Vgl. van Weele (2002), S. 147.

<sup>150</sup> Vgl. etwa Kraljic (1988), S. 486.

Die anhand des Versorgungsrisiko-ABC-Portfolios klassifizierten Produkte können in einem nächsten Schritt mit den in Abbildung 4.5 dargestellten Zulieferern kombiniert werden. Das so entstehende Portfolio zeigt die Abbildung 4.6 und bietet die Möglichkeit, chancen- und risikoreiche Zulieferer-Produkt-Kombinationen aufzuzeigen.<sup>151</sup>

Unkritische Produkte	→	→	Preis Qualität	
Hebelprodukte	→	→	Liefertermintreue Service	
Engpassprodukte	F+E-Potenzial Wirtschaftl. Lage Techn. Ausstattung		↑	↑
Schlüsselprodukte	Interesse Akzeptanz Vertrauen		↑	↑
	kritischer Zulieferer	Kern-zulieferer	Hebel-zulieferer	unkritischer Zulieferer

**Abbildung 4.6: Zulieferer-Produkt-Portfolio**

(Quelle: In Anlehnung an Kraljic (1988), S. 486ff.; Schulte (2001), S. 387.)

Hebelzulieferer und unkritische Zulieferer bieten etwa auf Grund der geringen Marktbedeutung gerade bei unkritischen Produkten und Hebelprodukten, die durch ein geringes Versorgungsrisiko charakterisiert sind, die Möglichkeit, aggressiv am Markt zu agieren und so Preis-, Qualitäts- und/oder Servicevorteile, etwa in Form von Liefertermintreue, zu realisieren. Dieses Vorgehen wird durch den eher kurzfristigen Zeithorizont der Zusammenarbeit unterstützt, der aus den geringen Kosten bei einem Wechsel der Zulieferer und einer eher großen Anzahl möglicher Zulieferer resultiert.

Insbesondere bei Engpass- und Schlüsselprodukten in Kombination mit kritischen Zulieferern und Kernzulieferern ist auf Grund des hohen Versorgungsrisikos und der Marktbedeutung und damit der Marktmacht der Zulieferer eine sorgfältige Auswahl der Zulieferer geboten. Der Abnehmer sollte hier zur Reduktion des Versorgungsrisikos eine langfristige Zusammenarbeit mit den relevanten Zulieferern anstreben. Diese Zusammenarbeit wird sich eher dann positiv entwickeln, sofern neben den Kriterien Preis, Qualität und Liefertermintreue das Forschungs- und Entwicklungspotenzial, die wirtschaftliche Lage, die technische Ausstattung des Zulieferers sowie das Interesse

<sup>151</sup> Vgl. Kraljic (1988), S. 486ff.; Schulte (2001), S. 387; Wildemann (2002), S. 71.



des Zulieferers an einer Zusammenarbeit in den Auswahlprozess einbezogen werden. Darüber hinaus ist eine Atmosphäre von Akzeptanz und Vertrauen für eine gute und langfristige Zusammenarbeit unabdingbar. Diese so entwickelten Kriterien für die Auswahl und Bewertung von Zulieferern in Abhängigkeit von der Beschaffungssituation werden in Abbildung 4.6 zusammenfassend dargestellt.

Die in Abbildung 4.6 unschraffierten Felder, wie unkritische Produkte und Hebelprodukte, die sich durch ein geringes Versorgungsrisiko und damit durch geringe Auswirkungen auf den Produktionsablauf auszeichnen, werden hier in Kombination mit kritischen Zulieferern und Kernzulieferern nicht weiter behandelt, da bei Schwierigkeiten mit einem Zulieferer dieser problemlos gewechselt werden kann. Die Wahl eines Zulieferers mit einem niedrigen Versorgungsrisiko ist hier zu empfehlen, angedeutet durch die Pfeile nach rechts, um diesen dann hinsichtlich der spezifischen Anforderungen bezüglich Preis, Qualität und Service beeinflussen zu können. Dies ist vorrangig dann möglich, wenn wie bei Hebelzulieferern der Anteil am Umsatz des Zulieferers hoch ist.

Bei den Schlüsselprodukten und den Engpassprodukten ist der Einfluss auf den eigenen Produktionsablauf hoch. Insbesondere bei den Schlüsselprodukten stehen jedoch auf Grund von besonderen Produktspezifikationen häufig nur wenige potenzielle Zulieferer zur Wahl. Sollten dennoch viele potenzielle Zulieferer zur Verfügung stehen, ist das Versorgungsrisiko folglich gering und es handelt sich um Hebelzulieferer bzw. unkritische Zulieferer. Dann ist zu prüfen, ob durch alternative Verfahren oder ähnliche Produkte eine Überführung der Produkte hin zu Hebelprodukten bzw. unkritischen Produkten, angedeutet durch die Pfeile nach oben, möglich ist.

Nicht alle der vorgeschlagenen Auswahlkriterien für Zulieferer, wie die Beurteilung der finanziellen Lage eines Zulieferers, sind ohne weitere Quantifizierung in mathematischen Modellen anwendbar. Im folgenden Abschnitt wird daher zunächst auf die Quantifizierung der Auswahlkriterien eingegangen und so die Anwendbarkeit in mathematischen Modellen zum Supply Chain Design ermöglicht.

## **4.4 Supply Chain Design mit fundierter Zuliefererauswahl**

### **4.4.1 Beitrag der Kriterien zur quantitativen Zuliefererauswahl**

Der Preis eines zu beschaffenden Gutes kann als quantitativ gemessene Größe unmittelbar in ein mathematisches Modell zum Supply Chain Design integriert werden. Doch bereits bei Qualität und Liefertermintreue oder etwa der Beurteilung der finan-

ziellen Lage eines Zulieferers sind geeignete messbare Kriterien zu entwickeln, um eine Abbildung in mathematischen Modellen zu ermöglichen.

### *Qualität*

Die Qualität eines zu beschaffenden Gutes wird häufig mittels Ausschussquote bzw. Reklamationsquote gemessen.<sup>152</sup> Dabei ist die Ausschussquote die Menge des beschafften Produktes oder die Anzahl der Lieferungen, die Mängel aufweisen, im Verhältnis zur gesamten Menge des beschafften Produktes bzw. zur Gesamtzahl der Lieferungen.<sup>153</sup>

### *Liefertermintreue*

Bei der Bewertung der Liefertermintreue eines Zulieferers kommen verschiedene quantitative Kriterien in Frage. Einerseits kann der Anteil der rechtzeitigen Lieferungen an der gesamten Anzahl der Lieferungen zur Messung der Liefertermintreue herangezogen werden.<sup>154</sup> Dies setzt voraus, dass eine Verspätung von zwei Stunden genauso gravierend eingeschätzt wird, wie eine Lieferterminüberschreitung von zwei Wochen. Ist dies nicht gewünscht, so kann die Liefertermintreue andererseits als Differenz aus tatsächlichem Liefertermin und vereinbartem Liefertermin aufsummiert über alle verspäteten Lieferungen, ggf. gewichtet mit den zu spät gelieferten Mengen, gemessen werden.<sup>155</sup> Darüber hinaus können bei bekannter Wahrscheinlichkeitsverteilung der Nachfrage  $\alpha$ - und  $\beta$ -Servicegrad zur Bewertung der Zulieferer herangezogen werden.<sup>156</sup> Der  $\alpha$ -Servicegrad gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass der Lagerbestand ausreicht, um die in der Wiederbeschaffungsfrist auftretende Nachfrage zu erfüllen. Der Nachteil, dass die Höhe der unerfüllten Nachfrage unberücksichtigt bleibt, wird durch den  $\beta$ -Servicegrad überwunden, der den Anteil der sofort lieferbaren Menge an der gesamten Nachfrage umfasst.

### *Service*

Grundsätzlich können Service-Kriterien zur Reduktion der Anzahl möglicher Zulieferer verwendet werden, etwa wenn ein Zulieferer nicht über ein kompatibles IT-System verfügt und auch nicht bereit ist, sein System anzupassen, da kompatible IT-Systeme für den Informationsaustausch und damit zur Realisation der Vorteile des Supply Chain Management<sup>157</sup> unabdingbar sind.<sup>158</sup>

<sup>152</sup> Vgl. Beamon (1998), S. 288; Zeuch (2002), S. 162.

<sup>153</sup> Vgl. Beamon (1998), S. 288.

<sup>154</sup> Vgl. Gao/Tang (2003), S. 328.

<sup>155</sup> Vgl. etwa Beamon (1999), S. 284, die diese Art der Lieferterminüberschreitungen als „Product Lateness“ bezeichnet.

<sup>156</sup> Vgl. zu der Definition des  $\alpha$ - und  $\beta$ -Servicegrads Günther/Tempelmeier (2003), S. 251ff.

<sup>157</sup> Vgl. zu Collaborative Planning und dem dafür erforderlichen Datenaustausch Abschnitt 2.3.1.

<sup>158</sup> Vgl. Chopra/Meindl (2004), S. 63f.; Handfield/Nichols (1999), S. 15ff.

*Forschungs- und Entwicklungspotenzial*

Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten einer Unternehmung lassen sich auf vielfältige Weise ermitteln. So können etwa die Anzahl der Mitarbeiter, die in Forschung und Entwicklung tätig sind, im Vergleich zur Gesamtmitarbeiterzahl oder die Kosten, die im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Verhältnis zu den gesamten Produktionskosten aufgewendet werden, einen Anhaltspunkt für die Bedeutung der Abteilung Forschung und Entwicklung in der Unternehmungsstruktur geben.<sup>159</sup> Nachteilig ist jedoch, dass die absolute Höhe der Kosten keinen direkten Aufschluss darüber gibt, wie erfolgreich die Forschung und Entwicklung ist. Darüber kann eine Kennzahl Auskunft geben, welche die Anzahl der markt- bzw. produktionsreifen Produkte und Verfahren im Verhältnis zur Gesamtzahl der Forschungs- und Entwicklungsprojekte betrachtet.<sup>160</sup>

*Wirtschaftliche Lage*

Gerade bei einer geplanten langfristigen Zusammenarbeit etwa für Schlüsselprodukte, bei denen der Wechsel eines Zulieferers mit hohen Kosten für die Unternehmung verbunden sein kann, ist eine sorgfältige Auswahl des Zulieferers im Hinblick auf die wirtschaftliche Lage des Zulieferers unabdingbar. Mit Hilfe einer finanzwirtschaftlichen Bilanzanalyse kann die finanzielle Lage einer Unternehmung beurteilt werden.<sup>161</sup> Eine mögliche Kennzahl dafür ist die Eigenkapitalquote, da empirisch gezeigt werden kann, dass eine Unternehmung tendenziell weniger insolvenzgefährdet ist, je höher die Eigenkapitalquote ist.<sup>162</sup> Da es jedoch vielfältige weitere Kennzahlen gibt, die zur Beurteilung der finanziellen Lage von Unternehmungen genutzt werden,<sup>163</sup> werden häufig Kennzahlensysteme zur Messung der Insolvenzwahrscheinlichkeit herangezogen.<sup>164</sup> Dabei kann aus den verschiedenen einzelnen Kennzahlen etwa mit Hilfe neuronaler Netze ein Bonitätsindex errechnet werden, der zur Bewertung der Zulieferer herangezogen werden kann.<sup>165</sup> Diese Informationen über die wirtschaftliche Lage eines Zulieferers müssen jedoch nicht zwingend eigenständig ermittelt werden, sondern lassen sich Handelsauskünften,<sup>166</sup> wie sie etwa vom Verband der Vereine der Creditreformen angeboten werden, entnehmen.<sup>167</sup>

<sup>159</sup> Vgl. Ossola-Haring (2003), S. 178ff.

<sup>160</sup> Vgl. Ossola-Haring (2003), S. 171f.

<sup>161</sup> Vgl. Küting/Weber (2001), S. 77.

<sup>162</sup> Vgl. Baetge/Kirsch/Thiele (2004), S. 229.

<sup>163</sup> Vgl. Baetge/Kirsch/Thiele (2004), S. 225ff.; Küting/Weber (2001), S. 77ff.; Matschke/Hering/Klingelhöfer (2002), S. 43ff.

<sup>164</sup> Vgl. Hüls (1995), S. 69ff.; Matschke/Hering/Klingelhöfer (2002), S. 71.

<sup>165</sup> Vgl. Baetge/Kirsch/Thiele (2004), S. 552ff.

<sup>166</sup> Vgl. Baetge/Kirsch/Thiele (2004), S. 30f.

<sup>167</sup> Vgl. etwa Schweizerischer Verband Creditreform (2004).

### *Technische Ausstattung*

Zur technischen Ausstattung gehört neben Art und Alter der Produktionsanlagen die Informationstechnologie, die den Informationsaustausch im Rahmen der Zusammenarbeit beeinflusst. Zur Beurteilung der Altersstruktur der Anlagen kann der Anlagenabnutzungsgrad als Verhältnis von kumulierter Abschreibung zu historischen Anschaffungs- bzw. Herstellkosten dienen.<sup>168</sup> Da die Höhe der Abschreibungen jedoch stark von steuerlichen und bilanziellen Faktoren beeinflusst wird, kann alternativ die Investitionsquote zur Bewertung der technischen Ausstattung als Verhältnis von Nettoinvestitionen in Anlagen im Verhältnis zu den historischen Anschaffungs- bzw. Herstellkosten des Sachanlagevermögens herangezogen werden.<sup>169</sup>

### *Interesse/Akzeptanz/Vertrauen*

Ist das Interesse an der Zusammenarbeit von beiden Seiten gegeben, so ist eine vertrauensvolle Zusammenarbeit möglich. Diese fördert den intensiven Informationsaustausch und ermöglicht so eine Produktivitätssteigerung, da beispielsweise Qualitätskontrollen nicht doppelt durchgeführt werden müssen, und erlaubt darüber hinaus eine angemessene Preisgestaltung, da beide Unternehmungen für das zu produzierende Gut Verantwortung entwickeln.<sup>170</sup> Eine sinnvolle Quantifizierung von Interesse, Akzeptanz und Vertrauen ist nur schwierig möglich, da hier der stark subjektive Eindruck, den beide Unternehmungen voneinander gewinnen, entscheidend ist.

Um eine Bewertung der Zulieferer anhand der quantifizierten Kriterien vornehmen zu können, sind nun die Ausprägungen dieser Kriterien bei den einzelnen Zulieferern zu ermitteln. Hat es in der Vergangenheit bereits eine Zusammenarbeit mit den Zulieferern gegeben, die auch für die jetzige Beschaffungssituation in Frage kommen, so kann auf eigene Daten, etwa aus dem Informationssystem oder auf die persönlichen Erfahrungen der Mitarbeiter zurückgegriffen werden. Dies hat den Vorteil, dass der Aufwand für die Evaluation dieser Zulieferer tendenziell gering ist und den Nachteil, dass nicht bekannt ist, ob bessere Zulieferer existieren, mit denen noch keine Zusammenarbeit stattgefunden hat.<sup>171</sup> Für die Identifikation weiterer möglicher Zulieferer sind verschiedene Informationsquellen denkbar, wie Branchenverbände, Bezugsquellenverzeichnisse oder das Internet.<sup>172</sup> Als Informationsquellen für die Charakteristika dieser neuen Zulieferer kommen Selbstauskünfte des Zulieferers, Internetseiten, Konkurrenten oder auch Referenzkunden des Zulieferers sowie Handelsauskünfte in

<sup>168</sup> Vgl. Baetge/Kirsch/Thiele (2004), S. 207ff.; Küting/Weber (2001), S. 91f.

<sup>169</sup> Vgl. Küting/Weber (2001), S. 92ff.

<sup>170</sup> Vgl. Chopra/Meindl (2004), S. 493f.

<sup>171</sup> Vgl. Monczka/Trent/Handfield (2005), S. 210.

<sup>172</sup> Vgl. Oeldorf/Olfert (2004), S. 237f.

Frage.<sup>173</sup> In Branchen, in denen sich die Technologie schnell verändert, wie in der Computerbranche, kann es für große Unternehmungen sinnvoll sein, eine eigene Datenbank aufzubauen und zu pflegen. So werden etwa bei NCR laufend Informationen über 30.000 Zulieferer der Computerbranche zentral gesammelt und aufbereitet und zweimal im Monat an alle Standorte weltweit versendet.<sup>174</sup>

Neben der einzelnen Berücksichtigung der verschiedenen Auswahlkriterien ist eine simultane Beachtung aller als relevant charakterisierten Auswahlkriterien beispielsweise mittels AHP möglich.<sup>175</sup> In Abbildung 4.7 ist die entsprechende Zielhierarchie dargestellt.

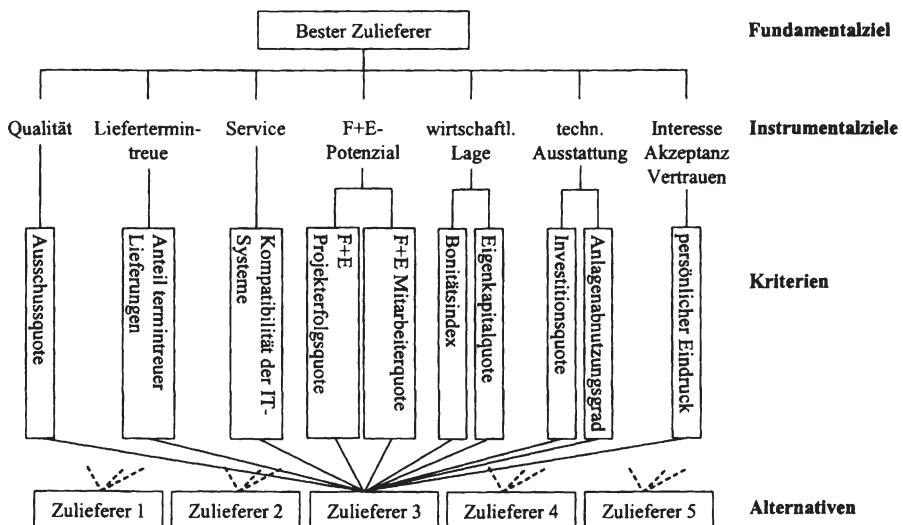


Abbildung 4.7: Erweiterte Zuliefererbewertung im Supply Chain Design mit AHP

AHP ermöglicht neben den bereits quantifizierten Kriterien, wie der Ausschussquote als Kriterium für die Qualität, die Integration qualitativer Kriterien, wie beispielsweise des persönlichen Eindrucks hinsichtlich des Instrumentaltziels „Interesse, Akzeptanz, Vertrauen“. Die Integration des Entscheiders in den durch AHP systematisierten Bewertungsprozess der Zulieferer erhöht die Akzeptanz für die ermittelten Ergebnisse.

Liegen Bewertungen der potenziellen Zulieferer hinsichtlich der relevanten Auswahlkriterien vor, so kann die Auswahl erfolgen. Im Rahmen des Supply Chain Design ist

<sup>173</sup> Für eine ausführliche Darstellung der möglichen Informationsquellen über Zulieferer vgl. Oeldorf/Olfert (2004), S. 235ff.; Weigand (1998), S. 175ff. und die dort angegebene Literatur.

<sup>174</sup> Vgl. Monczka/Trent/Handfield (2005), S. 211.

<sup>175</sup> Vgl. zu dem Vorgehen von AHP Abschnitt 4.2.3.

auf Grund der strategischen Bedeutung vorrangig die Auswahl der kritischen Zulieferer und der Kernzulieferer in Kombination mit den Schlüssel- und den Engpassprodukten von besonderem Interesse. Im Folgenden wird daher diese fundierte Zuliefererauswahl in die bereits entwickelten Modelle zum Supply Chain Design integriert.

#### 4.4.2 Erweiterung der Modelle zum Supply Chain Design

Die in Abschnitt 3.4 entwickelten Modelle werden um die fundierte Zuliefererauswahl erweitert. Fundiert heißt in diesem Fall, dass die Zulieferer nicht allein auf Basis der Kosten ausgewählt werden, sondern auf Grund der entwickelten, von der Beschaffungssituation abhängigen Auswahlkriterien. Dabei besteht die Möglichkeit, die Auswahlkriterien einzeln oder aggregiert in Form von zusätzlichen Zielen oder als Anspruchsniveaus zu berücksichtigen.

##### Zusätzliche Daten:

$AQ_{rz}$	Ausschussquote von Zulieferer $z$ hinsichtlich Rohstoff $r$
$LTQ_{rz}$	Quote nicht liefertermintreu gelieferter Rohstoffe $r$ von Zulieferer $z$
$FEP_z$	Forschungs- und Entwicklungspotenzial von Zulieferer $z$
$EKQ_z$	Eigenkapitalquote von Zulieferer $z$
$NIQ_z$	Nettoinvestitionsquote von Zulieferer $z$
$AB_z$	Aggregierte Bewertung von Zulieferer $z$

##### Zusätzliche Zielfunktionen:

$$\text{Min} \sum_{r=1}^R \sum_{z=1}^Z \sum_{i=1}^I AQ_{rz} \cdot x_{b_{rzi}} \quad (4.1)$$

$$\text{Min} \sum_{r=1}^R \sum_{z=1}^Z \sum_{i=1}^I LTQ_{rz} \cdot x_{b_{rzi}} \quad (4.2)$$

$$\text{Max} \sum_{z=1}^Z FEP_z \cdot \frac{\sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^I x_{b_{rzi}}}{\sum_{r=1}^R \sum_{z=1}^Z \sum_{i=1}^I x_{b_{rzi}}} \quad (4.3)$$

$$\text{Max} \sum_{z=1}^Z \text{EKQ}_z \cdot \frac{\sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^I x_{b_{rzi}}}{\sum_{r=1}^R \sum_{z=1}^Z \sum_{i=1}^I x_{b_{rzi}}} \quad (4.4)$$

$$\text{Max} \sum_{z=1}^Z \text{NIQ}_z \cdot \frac{\sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^I x_{b_{rzi}}}{\sum_{r=1}^R \sum_{z=1}^Z \sum_{i=1}^I x_{b_{rzi}}} \quad (4.5)$$

$$\text{Max} \sum_{z=1}^Z \text{AB}_z \cdot \frac{\sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^I x_{b_{rzi}}}{\sum_{r=1}^R \sum_{z=1}^Z \sum_{i=1}^I x_{b_{rzi}}} \quad (4.6)$$

Mit  $x_{b_{rzi}}$  werden die Mengen des Rohstoffs  $r$  bezeichnet, die von Zulieferer  $z$  beschafft und an den Standort  $i$  geliefert werden. Zielfunktion (4.1) spiegelt das Auswahlkriterium Qualität wider. Ausgehend von zuliefererspezifischen Ausschussquoten für die verschiedenen Rohstoffe wird bei dieser Zielfunktion die Gesamtmenge der fehlerhaften Rohstoffe  $r$  minimiert.<sup>176</sup> Die Erfassung der Ausschussquoten der verschiedenen Zulieferer in einer eigenen Zielfunktion berücksichtigt jedoch nicht das Erfordernis, die mangelbehafteten Teile durch neue Teile zu ersetzen, um die gewünschten Mengen der Produkte herstellen zu können. Die Beschaffungsmengen der verschiedenen Rohstoffe müssen daher um die wegen Mängeln nicht verwertbaren Mengen der Rohstoffe erhöht werden. Damit steigen die Beschaffungskosten um die zusätzlichen Mengen, bewertet mit den variablen Stückkosten. Es ist zu beachten, dass die zusätzlich beschaffte Menge ebenfalls einen mit Mängeln behafteten Anteil beinhaltet und diese wiederum. Die Restriktion, die die Beschaffungsmenge determiniert, ist daher wie folgt zu modifizieren:<sup>177</sup>

$$\sum_{z=1}^Z x_{b_{rzi}} \cdot (1 - \text{AQ}_{rz} - \text{AQ}_{rz}^2 - \text{AQ}_{rz}^3 \dots) \geq \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J A_{rp} \cdot x_{p_{ij}} \quad \forall i, r \quad (4.7)$$

<sup>176</sup> Vgl. zu diesem Vorgehen der Ausschussminimierung etwa Weber/Current (1993), S. 176 oder Ghodspour/O'Brian (2001), S. 20 und Jayaraman/Srivastava/Benton (1999), S. 53, die diese Zielfunktion als Satisfizierungsziel berücksichtigen.

<sup>177</sup> Bei der zu modifizierenden Restriktion handelt es sich um Restriktion (3.17) des in Abschnitt 3.4.1 entwickelten Grundmodells.

Bei dem Ausdruck in der Klammer handelt es sich um eine geometrische Reihe, die für absolute Werte  $AQ_{rz}$  kleiner eins konvergiert.<sup>178</sup> Da die Ausschussquote definitionsgemäß positiv und kleiner eins ist, lautet die modifizierte Restriktion:

$$\sum_{z=1}^Z x b_{rzi} \cdot \left(1 - \frac{AQ_{rz}}{1 - AQ_{rz}}\right) \geq \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J A_{rp} \cdot x p_{pji} \quad \forall i, r \quad (4.7)'$$

Darüber hinaus ist jedoch zu beachten, dass auf diese Weise lediglich die direkten Zusatzkosten erfasst werden. Kosten, die daraus resultieren, dass die Qualitätsmängel der Rohstoffe erst später im Produktionsverlauf oder beim Endkunden entdeckt werden, müssen gegebenenfalls zusätzlich erfasst werden.<sup>179</sup>

Die Liefertermintreue der einzelnen Zulieferer erfasst Zielfunktion (4.2). Dabei wird die Summe der nicht rechtzeitig gelieferten Rohstoffe als Produkt aus zuliefererspezifischen Verspätungsquoten und der von diesem Zulieferer beschafften Menge minimiert.<sup>180</sup> Eine Maximierung der liefertermintreu gelieferten Mengen ist entsprechend möglich. Die aus der schlechten Performance der Zulieferer resultierenden Kosten können als erzwungener Lagerbestand oder erzwungene Erhöhung der Lagerbestände mit Lagerhaltungskosten in der Zielfunktion erfasst werden. Die Ermittlung der Mengen dieser erzwungenen Lagerbestände kann analog zu den Betrachtungen bei der Erhöhung der Beschaffungsmenge als Resultat der Ausschussquote ermittelt werden. Während Qualität und Liefertermintreue über die verursachten Kosten in der Zielsetzung der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags erfasst werden können, sind die Zielfunktionen (4.3) - (4.6) zusätzlich zu betrachten.

Zielfunktion (4.3) maximiert das mit den Mengenanteilen der Zulieferer gewichtete Forschungs- und Entwicklungspotenzial der ausgewählten Zulieferer. Das Potenzial wird dabei als Anzahl der marktfähigen bzw. produktionsreifen Produkte und Prozesse im Verhältnis zur Gesamtzahl der durchgeführten Projekte in einem bestimmten Zeitraum, etwa den vergangenen fünf Jahren, gemessen. Die wirtschaftliche Lage wird in Zielfunktion (4.4) abgebildet, wobei die mit dem Mengenanteil des Zulieferers gewichtete Eigenkapitalquote maximiert wird. Zielfunktion (4.5) maximiert die mit den Mengenanteilen der Zulieferer gewichtete Nettoinvestitionsquote, die die technische Ausstattung der Zulieferer widerspiegelt. Die technische Ausstattung ist umso besser, je mehr im betrachteten Zeitraum in diese investiert wurde.

<sup>178</sup> Vgl. Bronstein et al. (1993), S. 733.

<sup>179</sup> Vgl. zu der Berücksichtigung aller mit einem Beschaffungsvorgang verbundenen Kosten den Ansatz des Total Cost of Ownership etwa bei Degraeve/Roodhooft (2000) oder Ellram (1995).

<sup>180</sup> Vgl. Weber/Ellram (1993), S. 6. Für eine Formulierung als Satisfizierungsziel vgl. Jayaraman/Srivastava/Benton (1999), S. 53.



Zielfunktion (4.6) maximiert die aggregierten Bewertungen der Zulieferer, die wie bei den vorherigen Zielfunktionen (4.3) - (4.5) ebenfalls mit dem Anteil des jeweiligen Zulieferers an der gesamten Beschaffungsmenge gewichtet werden. Die Erfassung dieser zusätzlichen Zielfunktionen ist im Rahmen der folgenden Robustheitsbetrachtungen ohne weiteres möglich, sofern die verwendeten Kriterien kardinal messbar sind. Es wird daher im Folgenden die Zielfunktion (4.6) zur Bewertung der Zulieferer herangezogen und davon ausgegangen, dass diese Bewertungen der Zulieferer aus Expertenschätzungen resultieren, zwischen null und eins gemessen werden und kardinal messbar sind. Ein Zulieferer wird umso besser bewertet, je näher der Wert von  $AB_z$  an eins ist. Ist bei alleiniger Betrachtung der Zielfunktion (4.6) der hinsichtlich dieser Zielfunktion beste Zulieferer in der Lage, die gesamte Nachfrage nach den verschiedenen Rohstoffen und gegebenenfalls weitere Restriktionen zu erfüllen, so wird dieser ausgewählt und es liegt kein weiteres Entscheidungsproblem vor. Andernfalls ist eine Bewertung mit dem Anteil des Zulieferers an der gesamten Beschaffungsmenge erforderlich, um eine der Zielsetzung entsprechende Zuordnung der Beschaffungsmengen hinsichtlich der Kapazitäten der Zulieferer zu erreichen.

Der aus der Gewichtung mit den Mengenanteilen resultierende Effekt kann mit Hilfe des folgenden Beispiels verdeutlicht werden:

	Zulieferer 1	Zulieferer 2	Zulieferer 3
Bewertung	0,83	0,75	0,67
Kapazität	200 ME	400 ME	200 ME

**Tabelle 4.4: Beispiel zur Zuliefererbewertung**

Ausgehend von einer kardinal messbaren Bewertung der Zulieferer, die umso besser ist, je höher die Bewertung ist, kann der Zulieferer 1 als Wunschzulieferer mit der höchsten Bewertung identifiziert werden. Reicht die Kapazität dieses Zulieferers nicht aus, um die Gesamtmenge von beispielsweise 500 ME zu liefern, führt die Gewichtung der Zuliefererbewertung mit dem Anteil an der Gesamtmenge zu einer der Zuliefererbewertung entsprechenden Aufteilung der Beschaffungsmengen:

$$0,83 \cdot \frac{200 \text{ ME}}{500 \text{ ME}} + 0,75 \cdot \frac{300 \text{ ME}}{500 \text{ ME}} + 0,67 \cdot \frac{0 \text{ ME}}{500 \text{ ME}} = 0,782$$

Die Kapazität des ersten Zulieferers mit der besten Bewertung ist mit einer Beschaffungsmenge von 200 ME vollständig ausgeschöpft. Die verbleibenden 300 ME werden Zulieferer 2, der die nächst schlechtere Bewertung aufweist, zugeordnet. Analog er-

folgt eine Aufteilung der Beschaffungsmengen, wenn mehr als ein Rohstoff zu betrachten ist.

Die Division durch die gesamte Beschaffungsmenge führt zur Nichtlinearität dieser Zielfunktion, wenn die vollständige Erfüllung der Nachfrage nicht gefordert wird und die gesamte Beschaffungsmenge folglich als Entscheidungsvariable im Rahmen des Modells zu bestimmen ist. Die der Zielsetzung entsprechende Zuordnung der Beschaffungsmengen zu Zulieferern kann jedoch an Stelle der Bewertung mit dem Anteil an der gesamten Beschaffungsmenge ebenfalls durch eine Bewertung mit der absoluten von diesem Zulieferer zu beschaffenden Menge erreicht werden.<sup>181</sup>

Schwierig zu quantifizierende Faktoren, wie Interesse, Vertrauen und Akzeptanz, die jedoch bei langfristigen, strategischen Partnerschaften bedeutend sind, können vor der quantitativen Planungsunterstützung des Supply Chain Design dazu genutzt werden, die Menge der potenziellen Zulieferer einzuschränken oder in die Gesamtbewertung integriert werden. Die vorgestellten Zielfunktionen in Kombination mit den Restriktionen und der Zielfunktion der in Abschnitt 3.4 vorgestellten Modelle bilden die Grundmodelle zum Supply Chain Design mit erweiterter Zuliefererbewertung. Der Umgang mit diesen mehrfachen Zielsetzungen wird im folgenden Kapitel im Rahmen der Robustheitsbetrachtungen bei Mehrfachzielsetzung erläutert.

---

<sup>181</sup> Vgl. zu diesem Vorgehen etwa Ghodsypour/O'Brien (1998), S. 202f.; Korpela/Lehmusvaara/Tuominen (2001), S. 201ff.; Korpela et al. (2002), S. 194f.

## 5 Robuste Planungsunterstützung im Supply Chain Design

### 5.1 Quantitative Planungsunterstützung bei Unsicherheit

Insbesondere im Supply Chain Management, in dem die unternehmungsübergreifenden Prozesse die durch Unsicherheit hervorgerufenen Effekte verstärken, ist die Berücksichtigung der Unsicherheit bereits während der Planung geboten.<sup>1</sup> Die Aspekte, die bei Entscheidungen im Rahmen des Supply Chain Management unsicher sein können, sind vielfältig.<sup>2</sup> Unsichere Einflussfaktoren im Supply Chain Management können etwa hinsichtlich der Quelle der Unsicherheit in Unsicherheit hervorgerufen durch Zulieferer, durch die Produktion oder durch Kunden unterteilt werden.<sup>3</sup> In Tabelle 5.1 werden mögliche unsichere Einflussfaktoren hinsichtlich dieser Quellen der Unsicherheit charakterisiert.

unsichere Einflussfaktoren	Zulieferer	Produktion	Kunden
Verfügbarkeit der Rohstoffe	x		
Lieferzeiten der Zulieferer	x		
Qualität der Rohstoffe	x		
Kosten	x	x	
Ausschussraten der Produktion		x	
Kapazität		x	
Anforderungen der Kunden			x
Nachfrage			x
Preise			x
Transportzeiten	x		x
Wechselkurse	x	x	x
Politisches Umfeld	x	x	x

**Tabelle 5.1: Unsichere Einflussfaktoren im Supply Chain Management**

Die durch Zulieferer hervorgerufene Unsicherheit umfasst vorrangig die Verfügbarkeit der Rohstoffe, die Qualität der Rohstoffe und die Lieferzeiten.<sup>4</sup> Der Aspekt der Verfügbarkeit der Rohstoffe ist im Rahmen des Supply Chain Design insbesondere dann von Interesse, wenn nur wenige Zulieferer für die Belieferung mit diesen Rohstoffen in Frage kommen.<sup>5</sup> Darüber hinaus können die Kosten für Rohstoffe mit Unsicherheit behaftet sein, die jedoch durch langfristige Verträge mit Zulieferern vermindert werden kann, was wiederum die Bedeutung der sorgfältigen Auswahl von Zulieferern unterstreicht. Die Kosten sind ebenfalls im Rahmen der Produktion ein wesentlicher

<sup>1</sup> Vgl. van Landeghem/Vanmaele (2002), S. 770. Zum Bullwhip Effekt vgl. etwa Lee/Padmanabhan/Whang (1997) sowie die Ausführungen in Abschnitt 2.1.2.

<sup>2</sup> Vgl. etwa Simchi-Levi/Kaminski/Simchi-Levi (2003), S. 5.

<sup>3</sup> Vgl. Chen/Paulraj (2004), S. 147f. Lee (2002), S. 106ff. und Reiner (2004), S. 220f. unterscheiden in diesem Zusammenhang Angebots- und Nachfrageunsicherheit.

<sup>4</sup> Die durch Zulieferer hervorgerufene Unsicherheit kann entsprechend auf die Zulieferer von Zwischenprodukten oder weiteren für den Produktionsablauf erforderlichen Gütern übertragen werden.

<sup>5</sup> Vgl. Ahmed/Sahinides (1998), S. 1883.

Unsicherheitsfaktor, da einerseits während des Prozesses des Supply Chain Design einige Kosten lediglich abgeschätzt werden können, folglich nicht mit Sicherheit bekannt sind und andererseits während des Produktionsprozesses zusätzliche Kosten entstehen können. Die Menge der mit Fehlern behafteten Produkte, auch als Ausschussrate bezeichnet, ist ebenfalls im Vorhinein nicht bekannt. Diese muss jedoch nicht einzeln betrachtet werden, sondern kann auch in die Betrachtung der Kosten integriert werden. Unsicherheit bei den für die Produktion verfügbaren Kapazitäten kann durch unvorhergesehene Maschinenausfälle oder durch nicht im Vorhinein bekannte Bearbeitungsdauern oder Rüstzeiten hervorgerufen werden.<sup>6</sup> Hinsichtlich der Kunden findet sich die am häufigsten antizipierte Unsicherheit, da viele Unternehmen auf gute Nachfrageprognosen angewiesen sind, insbesondere dann, wenn die Produkte einem schnellen Wandel hinsichtlich der Kundenanforderungen und kurzen Produktlebenszyklen unterliegen.<sup>7</sup> Folglich sind die Anforderungen der Kunden neben den nachgefragten Mengen und den erzielbaren Preisen ein wichtiger Einflussfaktor unter Unsicherheit. Darüber hinaus sind die Transportzeiten mit Unsicherheit behaftet, und zwar nicht nur zwischen Zulieferern und Produktionsstandorten, sondern ebenfalls zwischen Produktionsstandorten und Kunden oder weiteren Stufen der Supply Chain. Unsichere Einflussfaktoren, die den Zulieferern, der Produktion und den Kunden zugeordnet werden können, sind die Wechselkurse und das politische Umfeld. Da Wechselkurse täglich schwanken, sind sie somit stärker im Rahmen der operativen bzw. taktischen Planung relevant. Dennoch können ein stark schwankender Wechselkurs und das politische Umfeld die generelle Entscheidung, in einem Land einen Standort zu errichten, einen Zulieferer auszuwählen oder offensiv Kunden zu gewinnen, entscheidend beeinflussen und sind somit im Rahmen international ausgerichteter Supply Chains durchaus von bedeutendem Interesse.<sup>8</sup>

In mathematischen Modellen kann die Berücksichtigung der Unsicherheit in Form unsicherer Parameter als unsichere Koeffizienten der Zielfunktion<sup>9</sup> oder der Restriktionen<sup>10</sup> etwa bei den Kosten oder der Kapazitätsbeanspruchung einzelner Produkte erfolgen. Häufig wird in mathematischen Modellen zum Supply Chain Management Unsicherheit hinsichtlich der Nachfrage beachtet, was dann unsichere rechte Seiten der Restriktionen zur Folge hat.<sup>11</sup> Des Weiteren können einzelne Restriktionen oder Restriktionengruppen in mathematischen Modellen unsicher sein, d. h., es ist im Vorhinein

<sup>6</sup> Die Unsicherheit im Rahmen der Produktion kann analog auf weitere Produktionsstufen und damit auf verschiedene an der Produktion beteiligte Partner übertragen werden.

<sup>7</sup> Vgl. Reiner (2004), S. 221.

<sup>8</sup> Vgl. zu den Aspekten des globalen Supply Chain Management etwa Simchi-Levi/Kaminski/Simchi-Levi (2003), Kapitel 8; Steven/Krüger (2001).

<sup>9</sup> Vgl. etwa Alonso-Ayuso et al. (2003), S. 108.

<sup>10</sup> Vgl. etwa Vidal/Goetschalckx (2000), S. 116ff.

<sup>11</sup> Vgl. etwa Lucas et al. (2001), S. 1259f.; Tsiakis/Shah/Pantelides (2001), S. 3592f.

nicht mit Sicherheit bekannt, ob eine Restriktion eingehalten werden muss oder welche von zwei oder mehreren möglichen Restriktionen relevant ist.<sup>12</sup>

Der Umgang mit unsicheren Parametern in Optimierungsmodellen hängt von der Art der Informationen über diese ab. Dabei kann unter anderem bei Entscheidungen unter Risiko zwischen Informationen in Form von Verteilungen und Informationen in Form von Szenarien unterschieden werden, wobei es sich bei Szenarien um diskrete Verteilungen handelt.<sup>13</sup> Im Folgenden werden die verschiedenen Ansätze zum Umgang mit Unsicherheit im Rahmen der stochastischen Programmierung kurz vorgestellt und daran anschließend auf die Besonderheiten des szenariobasierten Umgangs mit Unsicherheit eingegangen.

## 5.2 Stochastische Modelle zur Planung bei Unsicherheit

### 5.2.1 Darstellung verschiedener Modellierungsansätze

Ausgehend von dem Grundmodell der linearen Optimierung,<sup>14</sup> bei dem eine lineare Zielfunktion mit linearen  $\leq$ -Restriktionen und nichtnegativen Entscheidungsvariablen zu maximieren ist, können, wie bereits im vorherigen Abschnitt erläutert, verschiedene Einflussfaktoren unsicher sein, so dass sich folgendes stochastisches Optimierungsmodell ergibt:<sup>15</sup>

$$\begin{aligned} \max \quad & z = \tilde{c}^T x \\ \text{s.d.} \quad & \tilde{A}x \leq \tilde{b} \\ & x \geq 0 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Die Zielfunktionskoeffizienten  $\tilde{c}^T$ , die Koeffizienten der Restriktionen  $\tilde{A}$  und die rechte Seite  $\tilde{b}$  können unsichere Parameter und damit Zufallszahlen beinhalten. Kann in Anlehnung an multikriterielle Entscheidungsprobleme<sup>16</sup> eine perfekte Lösung dieses Modells ermittelt werden, die für jede Ausprägung der Zufallsvariablen zu dem maximalen Zielfunktionswert führt und darüber hinaus auch in jedem Fall zulässig ist, wird diese gewählt.<sup>17</sup> In den meisten Fällen existiert jedoch keine perfekte Lösung zu einem stochastischen Optimierungsmodell, so dass ein Ersatzmodell zu formulieren ist.<sup>18</sup>

<sup>12</sup> Vgl. Hillier/Lieberman (2001), S. 585ff.

<sup>13</sup> Vgl. Gupta/Maranas (2003), S. 1222.

<sup>14</sup> Vgl. etwa Domschke/Scholl (2003), S. 73; Zimmermann (1992), S. 63.

<sup>15</sup> Vgl. Zimmermann (1992), S. 116.

<sup>16</sup> Vgl. Abschnitt 5.4.

<sup>17</sup> Vgl. Dinkelbach/Kleine (1996), S. 72f.; Scholl (2001), S. 72.

<sup>18</sup> Vgl. Dinkelbach/Kleine (1996), S. 78.

In der Literatur häufig genannte Ersatzmodelle sind:<sup>19</sup>

- Wait and See-Ansatz
- Erwartungswertmodelle
- Chance-Constrained-Modelle
- Fat Solution-Modelle
- Kompensationsmodelle

Bei einem Wait and See-Ansatz wird angenommen, dass alle Entscheidungen so lange verschoben werden, bis die Realisation der unsicheren Parameter bekannt ist, d. h., es werden für alle möglichen Realisationen der unsicheren Parameter die optimalen Lösungen bestimmt, so dass bei Realisation eines Umweltzustands die dementsprechende Lösung umgesetzt werden kann. Der Wait and See-Ansatz kann nicht im eigentlichen Sinn als Ersatzmodell bezeichnet werden, da bei diesem die Unsicherheit nicht tatsächlich berücksichtigt wird, sondern lediglich abgewartet wird, bis die Realisation der mit Unsicherheit behafteten Ereignisse stattfindet.<sup>20</sup> Im Gegensatz dazu handelt es sich bei Entscheidungen unter Unsicherheit um Here and Now-Entscheidungen, bei denen die Unsicherheit sofort berücksichtigt werden muss.<sup>21</sup>

Bei einem Erwartungswertmodell werden alle unsicheren Parameter durch ihren Erwartungswert ersetzt und für das daraus resultierende Modell eine optimale Lösung bestimmt.<sup>22</sup> Dieses Vorgehen ist insbesondere hinsichtlich der Zulässigkeit kritisch zu sehen, da auf diese Weise erzeugte Lösungen für alle möglichen Realisationen der Zufallsvariablen unzulässig sein können.<sup>23</sup>

Um die Zulässigkeit zumindest mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit  $\alpha$  sicherzustellen, werden Chance-Constrained-Modelle oder Probabilistic-Constrained-Modelle angewandt.<sup>24</sup> Dabei kann zwischen simultanen Chance-Constrained-Modellen, bei welchen alle Nebenbedingungen mit gleicher Wahrscheinlichkeit  $\alpha$  erfüllt sein müssen, und separierten Chance-Constrained-Modellen, bei welchen jede Restriktion  $i$  mit einer Wahrscheinlichkeit  $\alpha_i$  erfüllt sein muss, unterschieden werden.<sup>25</sup>

Fat Solution-Modelle ermitteln Lösungen, die für alle Realisationen der Zufallsvariablen zulässig sind, d. h., sie entsprechen den Chance-Constrained-Modellen mit einer

<sup>19</sup> Vgl. Infanger (1994), S. 4ff.; Thorn (2002), S. 161; Scholl (2001), S. 73ff.; Vladimirov/Zenios (1997), S. 12-4ff.

<sup>20</sup> Vgl. Infanger (1994), S. 5; Kall/Wallace (1994), S. 8; Sen/Higle (1999), S. 36.

<sup>21</sup> Vgl. Kall/Wallace (1994), S. 8.

<sup>22</sup> Vgl. Dinkelbach/Kleine (1996), S. 117; Homburg (2000), S. 605.

<sup>23</sup> Vgl. Vladimirov/Zenios (1997), S. 12-2. An einem einfachen Beispiel mit vier Entscheidungsvariablen verdeutlichen dies Sen/Higle (1999), S. 35f.

<sup>24</sup> Vgl. Birge/Louveaux (1999), S. 35; Homburg (2000), S. 607. Chance-Constrained Programming geht zurück auf Charnes/Cooper (1959).

<sup>25</sup> Vgl. Kall/Wallace (1994), S. 232ff.; Liu (2002), S. 77f.; Scholl (2001), S. 74; Sen/Higle (1999), S. 45ff.

Zulässigkeitswahrscheinlichkeit von eins.<sup>26</sup> Fat Solution-Modelle setzen eine stark ausgeprägte Risikoaversion des Entscheiders voraus und können im Gegensatz zu Chance-Constrained-Modellen mit einer Wahrscheinlichkeit geringfügig kleiner als eins, die folglich geringe Unzulässigkeiten erlauben, zu einer deutlichen Verschlechterung des Zielfunktionswertes führen.<sup>27</sup>

Häufig werden stochastische Probleme als zweistufige lineare Kompensationsmodelle, die auf Dantzig zurückgehen, behandelt.<sup>28</sup> Kompensationsmodelle oder auch engl. recourse models beinhalten, dass Unzulässigkeiten durch kompensierende Maßnahmen ausgeglichen werden können.<sup>29</sup> Bei zweistufigen Modellen beinhaltet die erste Stufe alle Entscheidungen, die vor der Realisation der Umweltzustände in Form der Zufallsvariablen festgelegt werden können, wohingegen die Entscheidungen der zweiten Stufe erst danach festgelegt werden müssen.<sup>30</sup> Werden in einem ersten Schritt für ein zweistufiges Kompensationsmodell mit  $x$  die Entscheidungen der ersten Stufe bezeichnet und mit  $\tilde{y}$  die Kompensationsvariablen für die Abbildung der Unzulässigkeiten, so lautet die mathematische Formulierung eines zugehörigen Kompensationsmodells mit deterministischen Zielfunktionskoeffizienten:<sup>31</sup>

$$\begin{aligned} \max \quad & z = c^T x - \text{EW}[q^T \tilde{y}] \\ \text{s.d.} \quad & A_1 x \leq b_1 \\ & \tilde{A}_2 x + W \tilde{y} = \tilde{b}_2 \\ & x, \tilde{y} \geq 0 \end{aligned} \tag{5.2}$$

In der Zielfunktion wird der Zielfunktionswert der Entscheidung der ersten Stufe abzüglich der erwarteten Kompensation maximiert. Dabei gibt  $q^T$  die Zielfunktionskoeffizienten der Kompensationsvariablen an und  $\tilde{y}$  die von Realisation der Umwelt abhängige Kompensationsvariable. In den Restriktionen steht  $W$  für die Koeffizientenmatrix der Kompensationsvariablen,  $\tilde{b}_2$  für die stochastische rechte Seite und  $\tilde{A}_2$  für die stochastische Koeffizientenmatrix der Variablen der ersten Stufe. Hinsichtlich der Kompensation wird von fester Kompensation (fixed recourse) gesprochen, wenn die Höhe der Kompensation im Vorhinein bekannt ist, andernfalls sind auch Kompensationsmaßnahmen unter Unsicherheit (general recourse) denkbar.<sup>32</sup> Können alle Restriktionsverletzungen unabhängig von der Höhe kompensiert werden, so handelt es

<sup>26</sup> Vgl. Dinkelbach/Kleine (1996), S. 117.

<sup>27</sup> Vgl. Kall/Wallace (1994), S. 8, sowie die in Kapitel 6 durchgeführten Berechnungen.

<sup>28</sup> Vgl. Gupta/Maranas (2003), S. 1223; Infanger (1994), S. 8f.; Lucas et al. (2001), S. 1257, sowie als Ursprungsquelle Dantzig (1955).

<sup>29</sup> Vgl. Dinkelbach/Kleine (1996), S. 119.

<sup>30</sup> Vgl. Birge/Louveaux (1999), S. 52; Sen/Higle (1999), S. 38.

<sup>31</sup> In Anlehnung an Scholl (2001), S. 83.

<sup>32</sup> Vgl. Sen/Higle (1999), S. 42.

sich um vollständige Kompensation (complete recourse).<sup>33</sup> Ein Sonderfall der vollständigen Kompensation, die einfache Kompensation (simple recourse) liegt vor, wenn jede Restriktionsverletzung durch genau eine Maßnahme kompensiert wird, d. h. die Strafkosten mit Sicherheit bekannt sind und die Kompensation proportional zur Höhe der Restriktionsverletzung ist.<sup>34</sup> Bei Modell (5.2) handelt es sich um ein Modell mit fester Kompensation, da  $W$  bereits im Vorhinein bekannt ist. Es wird zu einem einfachen Kompensationsmodell, wenn  $W$  der Einheitsmatrix entspricht.<sup>35</sup> Die in Modell (5.2) verwendeten Variablen  $x$  werden als nicht-antizipierend bezeichnet, da diese vor der Realisation der Zufallsvariablen festgelegt werden und damit unabhängig von der Realisation des Umweltzustands sind.<sup>36</sup> Können auf Grund der Problemstruktur die Variablen  $x$  in  $x_1$  und  $\tilde{x}_2$  zerlegt werden, wobei die Variablen  $x_1$  unabhängig von der Realisation der Umweltentwicklung und damit nicht-antizipierend und die Variablen  $\tilde{x}_2$  von der Umweltentwicklung abhängig und damit antizipierend sind, so lautet das zugehörige zweistufige Kompensationsmodell:<sup>37</sup>

$$\begin{aligned} \max z &= c_1^T x_1 + E[c_2^T \tilde{x}_2] - E[q^T \tilde{y}] \\ \text{s.d.} \quad & A_1 x_1 \leq b_1 \\ & \tilde{A}_2 x_1 + \tilde{A}_3 \tilde{x}_2 + W \tilde{y} = \tilde{b}_2 \\ & x_1, \tilde{x}_2, \tilde{y} \geq 0 \end{aligned} \tag{5.3}$$

Die Zielfunktion maximiert dann den Zielfunktionswert der Entscheidungsvariablen der ersten Stufe ( $x_1$ ) sowie den erwarteten Wert der Zielfunktion der Entscheidungsvariablen der zweiten Stufe ( $\tilde{x}_2$ ) abzüglich der erwarteten Kompensation für Unzulässigigkeiten. Die Aufteilung der Variablen in nicht-antizipierende und antizipierende Variablen erfolgt problemabhängig. Für das Supply Chain Design sind etwa Standortvariablen nicht-antizipierend, da diese bereits vor der Realisation einer mit Unsicherheit behafteten Nachfrage festgelegt werden müssen, wohingegen die tatsächlichen Produktions- und Transportmengen durch Kompensationsmaßnahmen, etwa Überstunden erhöht bzw. durch Produktion auf Lager oder Kurzarbeit vermindert werden können und somit die Realisation der eintretenden Nachfrage antizipieren. Anstelle des zweistufigen Modells kann ein mehrstufiges Modell verwendet werden, wenn die Realisation der unsicheren Umwelt und damit der Zufallsvariablen in mehreren Stufen erfolgt.<sup>38</sup>

<sup>33</sup> Vgl. Sen/Higle (1999), S. 43.

<sup>34</sup> Vgl. Birge/Louveaux (1999), S. 92.

<sup>35</sup> Vgl. Birge/Louveaux (1999), S. 92.

<sup>36</sup> Vgl. Thorn (2002), S. 163ff. und die dort angegebene Literatur.

<sup>37</sup> In Anlehnung an Sen/Higle (1999), S. 43.

<sup>38</sup> Vgl. Kall/Wallace (1994), S. 26ff.; Sahinides (2004), S. 972.



Die hier vorgestellten stochastischen Ansätze können sowohl bei bekannten stetigen Verteilungen der unsicheren Einflussfaktoren als auch bei zuvor definierten Szenarien mit bekannten Eintrittswahrscheinlichkeiten angewandt werden. Die Ermittlung von geeigneten stetigen Verteilungen ist wegen fehlender Informationen häufig mit Schwierigkeiten verbunden,<sup>39</sup> so dass Unsicherheit bei anwendungsorientierten Problemstellungen bereits seit Beginn der 70er Jahre häufig in Form von Szenarien abgebildet wird.<sup>40</sup> Im folgenden Abschnitt wird deshalb kurz auf Besonderheiten des szenariobasierten Umgangs mit Unsicherheit eingegangen und insbesondere der Prozess der Ermittlung von Szenarien erläutert.

### 5.2.2 Besonderheiten szenariobasierter Ansätze

Unter einem Szenario kann eine mögliche Ausprägung unsicherer Daten verstanden werden.<sup>41</sup> Im Rahmen der Entscheidungstheorie werden Szenarien auch mit Umweltzuständen gleichgesetzt, die durch den Entscheider nicht beeinflusst werden können.<sup>42</sup> Szenarien bilden verschiedene mögliche zukünftige Entwicklungen ab, die sowohl auf quantitativen als auch auf qualitativen Daten in Form von Erfahrungen von Experten beruhen können. Die Anzahl der Szenarien sollte zwischen zwei und vier liegen, und darüber hinaus sollten für die verschiedenen Szenarien Eintrittswahrscheinlichkeiten ermittelt werden.<sup>43</sup> Die Verfahren zur Entwicklung von Szenarien, auch als Szenarioplanung<sup>44</sup>, Szenariotechnik<sup>45</sup> oder Szenarioanalyse<sup>46</sup> bezeichnet, sind vielfältig und werden insbesondere zur strategischen Planung eingesetzt.<sup>47</sup>

Ein sehr detailliertes, systematisiertes, zehnstufiges Vorgehen zur Ermittlung von Szenarien schlägt Schoemaker vor.<sup>48</sup> Im ersten Schritt werden Untersuchungsgegenstand und Zeithorizont der Szenarien festgelegt, um darauf aufbauend im zweiten Schritt zu analysieren, von welchen Personengruppen die Szenarien beeinflusst werden und wer durch die Szenarien beeinflusst wird. In den Schritten drei und vier werden grundlegende Trends und unsichere Schlüsselfaktoren ermittelt, die die Szenarien beeinflussen. Daran anschließend werden im fünften Schritt erste mögliche Szenarien ermittelt, die im sechsten Schritt auf Konsistenz und Plausibilität geprüft werden und im siebten Schritt zu modifizierten Szenarien weiterentwickelt werden. Die Prüfung der Plausibi-

<sup>39</sup> Vgl. Bamberg/Coenberg (2002), S. 78ff.

<sup>40</sup> Vgl. Götze (1993), S. 43ff.

<sup>41</sup> Vgl. Dembo (1991), S. 64.

<sup>42</sup> Vgl. Domschke/Scholl (2003), S. 48.

<sup>43</sup> Vgl. Brauers/Weber (1986), S. 633.

<sup>44</sup> Vgl. Shapiro (2001), S. 382.

<sup>45</sup> Vgl. Brauers/Weber (1986), S. 631ff.; Domschke/Scholl (2003), S. 347; Götze (1993), S. 71.

<sup>46</sup> Vgl. Brauers/Weber (1986), S. 633ff.; Mißler-Behr (1993), S. 8; Scholl (2001), S. 215.

<sup>47</sup> Vgl. etwa Götze (1993), S. 49; Götze (1991), S. 355; Staehle (1999), S. 640; Welge/Al-Laham (2003), S. 300.

<sup>48</sup> Vgl. Schoemaker (1995), S. 28ff.; Schoemaker (1993), S. 196f.

lität der Szenarien kann etwa mit Hilfe der Cross-Impact-Analyse oder dem Batelle-Verfahren erfolgen.<sup>49</sup> Daran anschließend muss geprüft werden, ob weiterer Untersuchungsbedarf hinsichtlich der Zusammenhänge besteht. An dieser Stelle kann es erforderlich sein, in einem weiteren Schritt zusätzliche Zusammenhänge zu analysieren und dafür ggf. quantitative Modelle zu verwenden.<sup>50</sup> Der Prozess der Schritte eins bis neun kann teilweise oder vollständig wiederholt werden, um dann in einem letzten Schritt die Szenarien für die zugrunde liegende Entscheidungssituation zu erhalten. Ist die Anzahl möglicher Szenarien zu groß, kann mit Hilfe verschiedener Verfahren der Clusteranalyse die Anzahl der Szenarien reduziert werden.<sup>51</sup> Dieses detaillierte Verfahren von Schoemaker ist ebenfalls in dem fünfstufigen Vorgehen zu erkennen, welches Scherm als grundlegende Vorgehensweise der Szenariotechnik identifiziert:<sup>52</sup>

1. Analyse des Untersuchungsfeldes
2. Identifikation wesentlicher Einflussfaktoren
3. Prognose der ausgewählten Einflussfaktoren
4. Berücksichtigung alternativer und diskontinuierlicher Entwicklungen
5. Ableitung der Wirkung der Szenarien auf das Untersuchungsfeld

Darüber hinaus sind weitere unterschiedlich stufige Vorgehensweisen in der Szenariotechnik zu finden,<sup>53</sup> die unter der Grobgliederung Analyse, Prognose und Synthese subsumiert werden können.<sup>54</sup> So können die Schritte eins bis vier von Schoemaker der Analyse-Phase, die Schritte fünf bis neun der Prognose-Phase und Schritt zehn der Synthese-Phase zugeordnet werden. Hinsichtlich des Vorgehens von Scherm werden Analyse und Identifikation der Einflussfaktoren zur Analyse-Phase sowie die Berücksichtigung alternativer und diskontinuierlicher Entwicklungen und die Ableitung der Wirkung zur Synthese-Phase zusammengefasst. Infolgedessen ist auch bei diesem Ansatz das dreistufige Vorgehen Analyse, Prognose und Synthese zu finden.

Die Szenariotechnik systematisiert die Einflussfaktoren auf die Szenarien und ist geeignet, die unterschiedlichen Erwartungen und Meinungen verschiedener Experten zu berücksichtigen.<sup>55</sup> Ein weiterer wesentlicher Vorteil, der im Zusammenhang mit der Analyse und Entwicklung von Szenarien genannt wird, ist das wachsende Verständnis

<sup>49</sup> Vgl. O'Brian (2004), S. 712 und für Details zur Cross-Impact-Analyse und zum Batelle-Verfahren etwa Brauers/Weber (1986), S. 634ff.; Scholl (2001), S. 216ff.

<sup>50</sup> Vgl. etwa Schoemaker/van der Heijden (1992) zur Anwendung von Simulation zur Erfassung der Zusammenhänge.

<sup>51</sup> Vgl. Brauers/Weber (1986), S. 644; Scholl (2001), S. 220ff. und für Details zur Clusteranalyse etwa Hoberg (2003) und die dort angegebene Literatur.

<sup>52</sup> Vgl. Scherm (1992).

<sup>53</sup> Vgl. Götze (1993), S. 71ff.; Mißler-Behr (1993); O'Brian (2004); Welge/Al-Laham (2003), S. 300f.

<sup>54</sup> Vgl. Mißler-Behr (1993), S. 9ff.

<sup>55</sup> Vgl. Shapiro (2001), S. 382ff.

für die Ursachen und Auswirkungen der Unsicherheit der an diesem Prozess beteiligten Mitarbeiter.<sup>56</sup> Insbesondere der letzte Schritt, die Synthese-Phase, in der auf Basis der ermittelten Szenarien teilweise auch bereits die Auswirkungen der Szenarien untersucht werden,<sup>57</sup> führt zur Frage nach dem Umgang mit Szenarien in mathematischen Modellen. Wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, können sowohl Szenarien als auch stetige Verteilungen durch stochastische Modelle erfasst werden und, falls keine perfekte Lösung existiert, mit Hilfe von Ersatzmodellen beachtet werden.

Die Konfiguration einer Supply Chain soll möglichst für alle denkbaren Umweltentwicklungen gut oder zumindest akzeptabel sein. Dies ist eine Eigenschaft, die als robust bezeichnet wird. Im folgenden Abschnitt werden daher verschiedene Aspekte der Robustheit erläutert sowie Ansätze zur Ermittlung robuster Handlungsalternativen vorgestellt. Anschließend werden die in der Literatur im Zusammenhang mit Robustheit diskutierten Optimierungsansätze hinsichtlich der Art der Integration der Robustheit sowie ihrer Eignung zur Ermittlung robuster Handlungsalternativen analysiert.

## 5.3 Robuste Planungsunterstützung

### 5.3.1 Der Begriff der Robustheit

Eine Definition des Begriffs Robustheit, der mit Flexibilität gleichgesetzt wird, findet sich bereits 1968 bei Gupta und Rosenhead.<sup>58</sup> Dabei wird von einer mehrstufigen Entscheidung ausgegangen, so dass bei der Festlegung der Entscheidungen der zweiten und weiteren Stufen die zwischenzeitlich realisierten Umweltentwicklungen berücksichtigt werden können. Die Robustheit einer Entscheidung auf der ersten Stufe wird als Quotient aus der Anzahl der möglichen Entscheidungen, die diese Entscheidung der ersten Stufe beinhalten, und der Gesamtzahl der zu betrachtenden „guten“ mehrstufigen Entscheidungen gemessen.<sup>59</sup> Folglich ist die Robustheit einer Entscheidung umso größer, je größer die Anpassungsfähigkeit, d. h. die Flexibilität, hinsichtlich zukünftiger Entscheidungen ist. Ein wesentlicher Kritikpunkt dieses Vorgehens ist darin zu sehen, dass zwar Entscheidungen gewählt werden, die über eine hohe Anpassungsfähigkeit verfügen, jedoch nicht geprüft wird, wie hoch für ein bestimmtes Szenario die aus dieser Flexibilität resultierende Zielfunktionsverschlechterung sein kann.<sup>60</sup> Dieses Konzept der Robustheit wird von Pye dahingehend erweitert, dass Zielfunktionswerte der Entscheidung auf der ersten Stufe in die Robustheitsbetrachtungen

<sup>56</sup> Vgl. Bunn/Salo (1993), S. 291; Götze (1991), S. 357.

<sup>57</sup> Vgl. etwa O'Brian (2004), S. 712, wo in einem letzten Schritt robuste Strategien als Antwort auf die verschiedenen Szenarien gefordert werden.

<sup>58</sup> Vgl. Gupta/Rosenhead (1968).

<sup>59</sup> Vgl. Gupta/Rosenhead (1968), S. B-21ff.; Rosenhead/Elton/Gupta (1972), S. 418f.

<sup>60</sup> Vgl. zu diesen und weiteren Kritikpunkten Scholl (2001), S. 151f.

einbezogen werden und so lediglich Entscheidungen in Betracht kommen, die mindestens einen vorgegebenen Zielfunktionswert erreichen.<sup>61</sup> Rosenblatt und Lee übernehmen ebenfalls dieses Konzept der Robustheit und wenden es auf ein Beispiel aus dem Bereich der Standortplanung an.<sup>62</sup> Es wird die Entscheidung der ersten Stufe festgelegt, die hinsichtlich aller möglichen Umweltszenarien am häufigsten zu einem Zielfunktionswert innerhalb eines vordefinierten Abweichungsintervalls von den szenariooptimalen Zielfunktionswerten führt. Dieses auch als robuster erster Schritt bezeichnete Vorgehen findet sich ebenfalls bei Hanssmann, der robuste Planung als Planung definiert, die bei mehreren denkbaren Umweltzuständen gute Ergebnisse realisiert.<sup>63</sup> Hier wird von einer zweistufigen Entscheidung und damit zweistufigen Festlegung der Variablen ausgegangen. Weisen die festgelegten Entscheidungen der ersten Stufe eine hohe Anpassungsfähigkeit hinsichtlich der möglichen Umweltentwicklungen auf, so wird die Festlegung dieser als robuster erster Schritt bezeichnet.<sup>64</sup> Unter einer robusten Strategie wird dann die Strategie verstanden, die bei allen Szenarien der szenariooptimalen Idealstrategie „nahe“ kommt.<sup>65</sup> Zur Ermittlung des robusten ersten Schritts wird vorgeschlagen, die Gemeinsamkeiten aller szenariooptimalen Lösungen als robusten Kern zu wählen und nach Realisation der unsicheren Umweltentwicklung zur szenariooptimalen Lösung auszubauen. Ein wesentlicher Kritikpunkt an dem vorgestellten Vorgehen des robusten ersten Schritts ist, dass unklar ist, wie bei unterschiedlichen sich ausschließenden optimalen Lösungen der einzelnen Szenarien vorzugehen ist, d. h., wenn kein robuster Kern existiert.<sup>66</sup>

Ein häufig verwendetes Konzept der Robustheit im Zusammenhang mit Optimierung wurde von Mulvey, Vanderbei und Zenios entscheidend geprägt.<sup>67</sup> Voraussetzung für die Anwendung dieses Robustheitsansatzes ist die Definition von Szenarien für die verschiedenen unsicheren Daten sowie eine zweistufige Festlegung der Variablen in Form von Design- und Kontrollvariablen.<sup>68</sup> Darauf aufbauend wird eine Lösung als lösungsrobust bezeichnet, wenn diese für alle Realisationen der Szenarien „nah“ an den szenariooptimalen Zielfunktionswerten ist.<sup>69</sup> Ist eine Lösung „nahezu immer“ zulässig für alle Realisationen der Szenarien, so wird dies als modellrobust bezeichnet.<sup>70</sup> Die Lösungsrobustheit kann erreicht werden, indem in der Zielfunktion zur

<sup>61</sup> Vgl. Pye (1978), S. 223ff.

<sup>62</sup> Vgl. Rosenblatt/Lee (1987).

<sup>63</sup> Vgl. Hanssmann (1989).

<sup>64</sup> Vgl. Hanssmann (1989), Sp. 1759.

<sup>65</sup> Vgl. Hanssmann (1989), Sp. 1759.

<sup>66</sup> Vgl. Scholl (2001), S. 151.

<sup>67</sup> Vgl. Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995) und für Anwendungen etwa Darby-Dowman et al. (2000); Killmer/Anandalingam/Malcolm (2001); Laguna (1998); Leung/Wu/Lai (2002); Malcolm/Zenios (1994); Soteriou/Chase (2000); Suh/Lee (2002); Vassiadou-Zeniou/Zenios (1996); Watkins/McKinney (1997); Yu/Li (2000).

<sup>68</sup> Vgl. Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995), S. 264f.

<sup>69</sup> Vgl. Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995), S. 265.

<sup>70</sup> Vgl. Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995), S. 265.

Erzeugung einer robusten Lösung alle Szenarien berücksichtigt werden, beispielsweise indem die maximal möglichen Kosten minimiert werden.<sup>71</sup> Die Modellrobustheit wird darüber hinaus mit einer Straffunktion in der Zielfunktion berücksichtigt. Jede Verletzung der Zulässigkeit einer Restriktion in einem Szenario wird dann mit Strafkosten belegt und Zielfunktionswert verschlechternd in die Zielfunktion integriert. Die einzelnen Bestandteile der Zielfunktion können mit Gewichten, die den Präferenzen des Entscheiders hinsichtlich Lösungs- und Modellrobustheit entsprechen, bewertet werden.

Das Konzept der Robustheit, welches Kouvelis und Yu vorstellen, basiert auf der Definition der Lösungsrobustheit von Mulvey, Vanderbei und Zenios, wobei ebenfalls Szenarien für den Umgang mit unsicheren Daten definiert werden, jedoch das Konzept der Robustheit insbesondere für Probleme mit diskreten Variablen erweitert und angewandt werden soll.<sup>72</sup> In einem ersten Schritt werden dafür zunächst die optimalen Lösungen, beispielsweise die minimalen Kosten der verschiedenen Szenarien, ermittelt und darauf basierend drei verschiedene Zielsetzungen zur Ermittlung robuster Lösungen vorgestellt. Eine absolut robuste Lösung wird als Lösung definiert, welche die maximal möglichen Kosten, die auftreten können, minimiert und entspricht der Maximin-Regel<sup>73</sup> bei Entscheidungen unter Ungewissheit. Eine robuste Abweichungslösung bezeichnet die Lösung, welche die maximal mögliche Abweichung von den szenariooptimalen Zielfunktionswerten minimiert, d. h., dieses Vorgehen entspricht der Savage-Niehans- bzw. der Minimax-Regret-Regel bei Entscheidungen unter Ungewissheit.<sup>74</sup> Der dritte Ansatz definiert eine robuste relative Abweichungslösung als Lösung, welche die maximale relative Abweichung von den szenariooptimalen Werten minimiert.<sup>75</sup> Die entsprechende Entscheidungsregel unter Unsicherheit wird als relatives Minimax-Regret-Kriterium bezeichnet.<sup>76</sup> Im Verlauf des Prozesses der Ermittlung einer robusten Lösung ist eine der Zielsetzungen auszuwählen und mit dieser eine robuste Lösung für das Entscheidungsproblem zu bestimmen.<sup>77</sup> Eine Erweiterung des hier vorliegenden Robustheitskonzeptes beinhaltet nicht die maximale Abweichung von den szenariooptimalen Werten, sondern fordert, dass bei einer robusten Lösung die Abweichung bei allen Szenarien von den Szenariooptima maximal einen vorgegebenen Prozentsatz betragen darf.<sup>78</sup>

<sup>71</sup> Vgl. zur Eignung von Zielfunktionen zur Erzeugung robuster Lösungen Abschnitt 5.3.2.

<sup>72</sup> Vgl. Kouvelis/Yu (1997), S. 7f.

<sup>73</sup> Vgl. zur Maximin-Regel bei Entscheidungen unter Unsicherheit etwa Bamberg/Coenberg (2002), S. 129f.; Mag (1990), S. 89ff.

<sup>74</sup> Vgl. etwa Laux (2003), S. 112ff.; Scholl (2001), S. 137f.

<sup>75</sup> Vgl. Kouvelis/Yu (1997), S. 8f. Für Anwendungen dieser Ansätze vgl. etwa Kouvelis/Yu (1997), S. 116ff.; Vairaktarakis (2000).

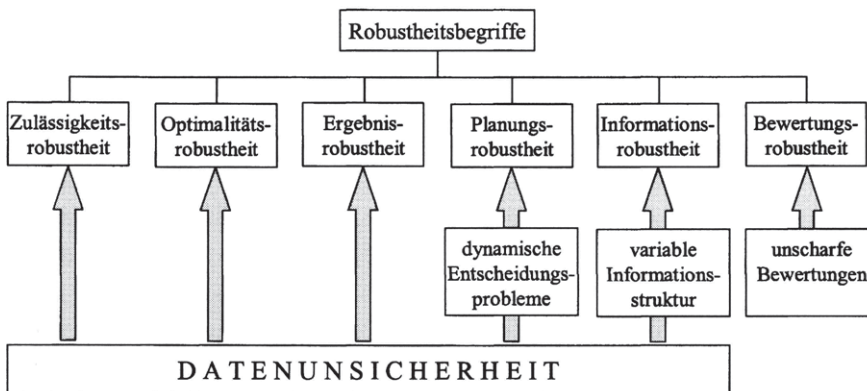
<sup>76</sup> Vgl. Scholl (2001), S. 138.

<sup>77</sup> Vgl. Kouvelis/Yu (1997), S. 11ff.

<sup>78</sup> Vgl. Gutiérrez/Kouvelis/Kurawarwala (1996), S. 364f., sowie auch Rosenblatt/Lee (1987), S. 481.

Die hier erläuterten Zielsetzungen zur Erzeugung robuster Lösungen erfordern im Gegensatz zu Zielsetzungen, die den Erwartungswert beinhalten, keine Informationen über die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Szenarien. Da die Modellrobustheit zur Berücksichtigung der Zulässigkeit unbeachtet bleibt, ist darüber hinaus davon auszugehen, dass die ermittelten Lösungen die Nebenbedingungen für alle Szenarien erfüllen. Diese Ansätze setzen eine deutliche Risikoaversion des Entscheiders voraus, da alle Ansätze lediglich die schlechteste mögliche Ausprägung betrachten.

Basierend auf dem Begriffsschema von Scholl können, wie in Abbildung 5.1 dargestellt, Zulässigkeits-, Optimalitäts-, Ergebnis-, Planungs-, Informations- und Bewertungsrobustheit unterschieden werden.<sup>79</sup> Nicht alle der dargestellten Robustheitsarten lassen sich auf alle Entscheidungsprobleme anwenden. So ist die Planungsrobustheit beispielsweise lediglich bei dynamischen Entscheidungsproblemen unter Unsicherheit anwendbar, wohingegen die Bewertungsrobustheit die Verwendung unscharfer Mengen bzw. Fuzzy-Sets voraussetzt. Datenunsicherheit als unsichere Umweltentwicklung ist keine zwingende Voraussetzung der Bewertungsrobustheit, wie sich bei der folgenden detaillierten Erläuterung der verschiedenen Robustheitsbegriffe zeigt.



**Abbildung 5.1: Entscheidungssituation der verschiedenen Robustheitsbegriffe**

Als *zulässigkeitsrobust* gilt eine Lösung, die für jedes mögliche Szenario zulässig ist, oder nur wenig von der Zulässigkeit abweicht.<sup>80</sup> Die Zulässigkeitsrobustheit entspricht damit der Modellrobustheit von Mulvey, Vanderbei und Zenios.<sup>81</sup>

<sup>79</sup> Vgl. Scholl (2001), S. 98ff.

<sup>80</sup> Vgl. Scholl (2001), S. 104f.

<sup>81</sup> Vgl. Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995), S. 265.

Eine Lösung<sup>82</sup> wird als *optimalitätsrobust* bezeichnet, wenn diese hinsichtlich des Zielfunktionswertes möglichst wenig von den szenariooptimalen Zielfunktionswerten abweicht.<sup>83</sup> Dies entspricht der Lösungsrobustheit bei Mulvey, Vanderbei und Zenios sowie Kouvelis und Yu.<sup>84</sup>

*Ergebnisrobuste* Lösungen weisen für alle Szenarien keine oder nur geringe Schwankungen hinsichtlich des Zielfunktionswertes auf, was bei stark schwankenden szenariooptimalen Zielfunktionswerten in einem Konflikt zur Optimalitätsrobustheit steht.<sup>85</sup>

*Planungsrobustheit* wird bei dynamischen Problemstellungen angewandt und entspricht im Wesentlichen der Planungsstabilität, d. h., ein mehrere Perioden umfassender Plan wird als planungsrobust bezeichnet, wenn die vorläufigen Entscheidungen, die beispielsweise im Rahmen der rollierenden Planung für spätere Perioden festgelegt werden, in den Folgeperioden nicht oder nur wenig angepasst werden müssen.<sup>86</sup>

*Informationsrobustheit* ist bei variabler Informationsstruktur anwendbar, wobei zwischen einem gegebenen Informationsstand A und einem bestmöglichen Informationsstand B, der mit maximalem Aufwand zum Planungszeitpunkt ermittelt werden kann, unterschieden wird. Eine Lösung gilt dann als informationsrobust, wenn diese im Hinblick auf beide Informationsstände als annähernd gleich gut hinsichtlich Optimalitäts-, Ergebnis- und Zulässigkeitsrobustheit eingestuft wird.<sup>87</sup>

Eine *bewertungsrobuste* Lösung ist innerhalb sinnvoller Grenzen weitgehend unempfindlich gegenüber auf der Fuzzy-Set Theorie beruhenden unscharfen Bewertungsansätzen, d. h. beispielsweise unabhängig von den exakten Ausprägungen von Nutzwerten oder Zielgewichten.<sup>88</sup>

Im Folgenden werden die verschiedenen Robustheitsbegriffe hinsichtlich ihrer Operationalisierbarkeit bei mathematischer Optimierung unter Unsicherheit analysiert. Dabei wird insbesondere auf Optimalitäts-, Ergebnis- und Zulässigkeitsrobustheit eingegangen, da im Rahmen dieser Arbeit zu Grunde liegenden Anwendungsgebiets des Supply Chain Design bei nicht saisonal schwankender Nachfrage und gegebener fixer

<sup>82</sup> Der Begriff Lösung meint in diesem Kontext die Lösung eines Optimierungsmodells und ist somit aus entscheidungstheoretischer Sicht mit einer ausgewählten Handlungsalternative gleichzusetzen.

<sup>83</sup> Vgl. Scholl (2001), S. 102ff.

<sup>84</sup> Vgl. Kouvelis/Yu (1997), S. 7; Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995), S. 265.

<sup>85</sup> Vgl. Scholl (2001), S. 99ff.

<sup>86</sup> Vgl. Scholl (2001), S. 108ff. Zur Planungsstabilität vgl. etwa Thom (2002), S. 64f., und die dort angegebene Literatur.

<sup>87</sup> Vgl. Scholl (2001), S. 105ff. Zur variablen Informationsstruktur vgl. etwa Bamberg/Coenenberg (2002), S. 144ff.; Eisenführ/Weber (2003), S. 257ff.; Laux (2003), S. 337ff.

<sup>88</sup> Vgl. Scholl (2001), S. 110f., wobei dieser hier lediglich eine Idee aufzeigt, die noch zu operationalisieren ist.

Informationsstruktur Planungs- und Informationsrobustheit auf Grund der fehlenden Voraussetzungen nicht angewandt werden können. Da der Schwerpunkt der Robustheitsbetrachtungen dieser Arbeit auf der Datenunsicherheit liegt, bleiben unscharfe Bewertungsansätze und damit die Bewertungsrobustheit ebenfalls unberücksichtigt.

### 5.3.2 Robustheit in mathematischen Modellen

Zur Erzeugung robuster Lösungen bzw. zur Auswahl robuster Handlungsalternativen mit Hilfe mathematischer Modelle sind verschiedene Ansätze denkbar, die auf unterschiedliche Art Optimalitäts-, Ergebnis- und Zulässigkeitsrobustheit beinhalten. Im Folgenden werden daher die verschiedenen Ansätze der Literatur, die Robustheit betrachten und auf mathematischen Modellen basieren, hinsichtlich der Erfassung von Optimalitäts-, Ergebnis- und Zulässigkeitsrobustheit analysiert. Mit  $x_1$  wird der Vektor der szenariounabhängigen Variablen bezeichnet, der die Entscheidungen der ersten Stufe beinhaltet, d. h., bei einer ermittelten robusten Lösung sind diese Variablen für alle Szenarien identisch. Der Vektor  $x_2^s$  hingegen umfasst bei einer robusten Lösung  $S$  verschiedene Ausprägungen jeder Variable, wobei nach Bekannt werden des Szenarios  $s$ , beispielsweise Szenario  $s=3$ , die Variablen  $x_2^{s=3}$  die optimale Entscheidung der zweiten Stufe beinhalten. Da zum Zeitpunkt der Planung das tatsächlich eintretende Szenario nicht bekannt ist, können aus den unterschiedlichen Entscheidungen der zweiten Stufe  $x_2^s$  verschiedene Zielfunktionswerte  $z_s(x_1, x_2^s)$  resultieren. Tritt dann Szenario  $s=3$  ein, so spiegelt der Zielfunktionswert  $z_{s=3}(x_1, x_2^{s=3})$  die Konsequenzen der robusten Lösung mit den szenariospezifischen Anpassungsmaßnahmen der zweiten Stufe wider. Um die verschiedenen Robustheitsarten in mathematischen Modellen abzubilden, werden zunächst einige weitere Symbole eingeführt:<sup>89</sup>

$z_s(x_1, x_2^s)$	Zielfunktionswert der robusten Lösung bei Szenario $s$
$Z_s^{\text{opt}}$	optimaler Zielfunktionswert von Szenario $s$
$P_s$	Eintrittswahrscheinlichkeit von Szenario $s$
$u_s^+$	Überschreitung des szenariooptimalen Zielfunktionswertes bei Szenario $s$
$u_s^-$	Unterschreitung des szenariooptimalen Zielfunktionswertes bei Szenario $s$
$v_s^+$	Restriktionsverletzung bei $\leq$ -Restriktionen in Szenario $s$
$v_s^-$	Restriktionsverletzung bei $\geq$ -Restriktionen in Szenario $s$
SK	Bewertungsfaktor, z. B. Strafkostensatz, je Einheit unerfüllter Nachfrage
$\xi$	Variable zur Erfassung der Optimalitätsrobustheit
$x_1$	Vektor szenariounabhängiger Strukturvariablen
$x_2^s$	Vektor szenarioabhängiger Strukturvariablen
$\text{bin}^s$	Binärvariable, die angibt, ob in Szenario $s$ Unzulässigkeiten auftreten

<sup>89</sup> Daten sind mit Großbuchstaben gekennzeichnet, Variablen mit Kleinbuchstaben.



*Optimalitätsrobustheit*

Die Verbesserung des ungünstigsten Zielfunktionswertes, beispielsweise hier die Maximierung des kleinsten möglichen Gesamtdeckungsbeitrags, kann als eine Ersatzzielfunktion zur Erzeugung einer optimalitätsrobusten Lösung verwendet werden. Damit wird jedoch nicht die Abweichung von den szenariooptimalen Werten betrachtet, so dass dies im eigentlichen Sinn nicht der Definition von Optimalitätsrobustheit entspricht. Dennoch soll hier die schlechteste mögliche Ausprägung verbessert werden und damit auch implizit eine besonders starke Verschlechterung hinsichtlich der szenariooptimalen Zielfunktionswerte vermieden werden. Bei dieser Verbesserung des Worst Case wird eine stark risikoaverse Risikoneigung vorausgesetzt. Die Berücksichtigung in mathematischen Modellen kann wie folgt lauten:<sup>90</sup>

$$\begin{aligned} \text{Max } \xi \\ \xi \leq z_s(x_1, x_2^s) \quad \forall s \end{aligned} \quad (5.4)$$

Es wird eine zusätzliche Variable  $\xi$  eingeführt, die kleiner sein muss als jeder aus den festzulegenden Variablen  $x_1$  und  $x_2^s$  resultierende Zielfunktionswert  $z_s$ . Sie gibt den kleinsten möglichen, folglich schlechtesten Zielfunktionswert an, welcher dann in der Zielfunktion maximiert wird.

Dieses Vorgehen kann entsprechend für die Minimierung der maximalen Abweichung vom szenariooptimalen Wert<sup>91</sup> übernommen werden.<sup>92</sup> Dabei ist zwischen Überschreitung bzw. Unterschreitung und absoluter Abweichung von den szenariooptimalen Zielfunktionswerten zu unterscheiden.

$$\begin{aligned} \text{Min } \xi \\ \xi \geq u_s^- \quad \forall s \\ Z_s^{\text{opt}} + u_s^+ - u_s^- = z_s(x_1, x_2^s) \quad \forall s \end{aligned} \quad (5.5)$$

In Modell (5.5) wird die maximale Unterschreitung der szenariooptimalen Zielfunktionswerte minimiert. Dies entspricht beispielsweise dem Vorgehen bei der Zielsetzung der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags. Für die Minimierung der maximalen Überschreitung, die etwa bei der Zielsetzung der Kostenminimierung angewandt werden muss, wird  $\xi \geq u_s^-$  durch  $\xi \geq u_s^+$  ersetzt. Soll die maximale absolute Abweichung von einem vorgegebenen Wert minimiert werden, sind beide Restriktionen simultan zu berücksichtigen. Sind zusätzliche Informationen über die Eintrittswahrscheinlichkeit

<sup>90</sup> Vgl. Kouvelis/Yu (1997), S. 8f.; Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995), S. 266; Vairaktarakis (2000), S. 216.

<sup>91</sup> In Anlehnung an Entscheidungen unter Ungewissheit kann an Stelle des Begriffs Abweichung hier ebenfalls der Begriff Bedauern oder Regret verwendet werden.

<sup>92</sup> Vgl. Kouvelis/Yu (1997), S. 9; Vairaktarakis (2000), S. 216.

der Szenarien vorhanden, kann auch die erwartete Abweichung, hier als Unterschreitung modelliert, minimiert werden:<sup>93</sup>

$$\begin{aligned} \text{Min } & \sum_{s=1}^S P_s \cdot u_s^- \\ & Z_s^{\text{opt}} + u_s^+ - u_s^- = z_s(x_1, x_2^s) \quad \forall s \end{aligned} \quad (5.6)$$

Um die Abweichungen mit der Höhe des Zielfunktionswertes in Verbindung zu bringen, kann im Gegensatz zu Modell (5.5), in dem das maximale absolute Bedauern minimiert wird, das maximale relative Bedauern, hier dargestellt als relative Unterschreitung, mit Modell (5.7) ermittelt werden.<sup>94</sup>

$$\begin{aligned} \text{Min } & \xi \\ & \xi \geq \frac{u_s^-}{Z_s^{\text{opt}}} \quad \forall s \\ & Z_s^{\text{opt}} + u_s^+ - u_s^- = z_s(x_1, x_2^s) \quad \forall s \end{aligned} \quad (5.7)$$

Entsprechend den Erläuterungen zu (5.5) kann die relative Überschreitung bzw. die relative absolute Abweichung bestimmt werden. Neben den hier ausführlich dargestellten Ansätzen zur Ermittlung einer optimalitätsrobusten Lösung sind weitere Ersatzzielfunktionen denkbar. In Anlehnung an Entscheidungsregeln unter Ungewissheit können diese etwa auf der Hurwicz-Regel oder bei zusätzlichen Informationen über die Eintrittswahrscheinlichkeiten auf der Hodges-Lehmann-Regel beruhen.<sup>95</sup> Eine mit diesen Ersatzzielfunktionen ermittelte Lösung kann dann beispielsweise als optimalitätsrobust bezeichnet werden, wenn die relative Abweichung nicht mehr als p% beträgt.<sup>96</sup> Die Eignung dieser verschiedenen Zielfunktion zur Erzeugung einer robusten Supply Chain wird in Kapitel 6 an einem Beispiel analysiert. Im Folgenden werden jedoch zunächst verschiedene Möglichkeiten der Berücksichtigung der Zulässigkeitsrobustheit in mathematischen Modellen diskutiert.

### *Zulässigkeitsrobustheit*

Bei der Erfassung der Zulässigkeitsrobustheit, die auf die Einhaltung der Restriktionen abzielt, muss zwischen den verschiedenen möglichen Restriktionen unterschieden werden.  $\geq$ -Restriktionen, wie sie etwa in der Produktionsplanung bei Nachfragere-

<sup>93</sup> Vgl. etwa Escudero (1994), S. 129f.

<sup>94</sup> Vgl. Gutiérrez/Kouvelis (1995), S. 179; Kouvelis/Yu (1997), S. 9f.; Vairaktarakis (2000), S. 217.

<sup>95</sup> Vgl. zu diesen Entscheidungsregeln etwa Bamberg/Coenenberg (2002), S. 130f. und S. 145; Mag (1990), S. 93ff. und S. 105f. Scholl (2001), S. 238ff. verwendet diese und weitere Entscheidungsregeln im Rahmen robuster Projektplanung und robuster Produktionsprogrammplanung.

<sup>96</sup> Vgl. Gutiérrez/Kouvelis/Kurawarwala (1996), S. 364; Rosenblatt/Lee (1987), S. 484.

striktionen zu finden sind, erfordern eine zusätzliche Variable  $v_s^-$ , die, wie in Modell (5.8) dargestellt, die unerfüllte Nachfrage abbildet. Die Funktion  $f_1(x_1, x_2^s)$  gibt in Abhängigkeit von den Ausprägungen der Variablen  $x_1$  und  $x_2^s$  an, wie hoch die erfüllte Nachfrage ist. Die Nachfrage in einem Szenario  $s$  ist mit  $D_s$  bezeichnet. Entsprechend den Kompensationsmodellen wird die unerfüllte Nachfrage  $v_s^-$  mit einem Strafkostensatz  $SK$  in der Zielfunktion berücksichtigt, so dass dann, wie in (5.8) dargestellt, die erwarteten Strafkosten minimiert werden.

$$\begin{aligned} \text{Min } & \sum_{s=1}^S P_s \cdot SK \cdot v_s^- \\ & f_1(x_1, x_2^s) \geq D_s - v_s^- \quad \forall s \end{aligned} \quad (5.8)$$

$\leq$ -Restriktionen können beispielsweise bei Kapazitätsrestriktionen auftreten. Sie erfordern eine zusätzliche Variable  $v_s^+$ , welche die Kapazitätsüberschreitung einer szenariospezifischen Kapazität  $KAP_s$  erfasst. Die Funktion  $f_2(x_1, x_2^s)$  gibt die mit einer Festlegung der Variablen  $x_1$  und  $x_2^s$  verbundene Kapazitätsinanspruchnahme an. Statt der Minimierung der erwarteten Strafkosten ist eine Erfassung dieser in einer zu maximierenden Zielfunktion  $z_s(x_1, x_2^s)$ , wie in (5.9) dargestellt, sinnvoll, wenn die Kapazitätsüberschreitungen beispielsweise durch Überstunden mit den entsprechenden Kosten  $SK$  kompensiert werden können. Durch die Integration von  $z_s(x_1, x_2^s, v_s^+)$  in die Betrachtungen zur Optimalitätsrobustheit, die die Abweichung von  $Z_s^{\text{opt}}$  und  $z_s(x_1, x_2^s, v_s^+)$  erfassen, wird eine simultane Erfassung der Abweichung von den szenariooptimalen Zielfunktionswerten und der mit den Unzulässigkeiten verbundenen Strafkosten erreicht.

$$\begin{aligned} z_s(x_1, x_2^s, v_s^+) &= z_s(x_1, x_2^s) - SK \cdot v_s^+ \quad \forall s \\ f_2(x_1, x_2^s) &\leq KAP_s + v_s^+ \quad \forall s \end{aligned} \quad (5.9)$$

Gleichheitsrestriktionen erfordern die gleichzeitige Erfassung von Unter- und Überschreitungen und dementsprechend sowohl  $v_s^+$  als auch  $v_s^-$ .<sup>97</sup> Die Funktion  $f_3(x_1, x_2^s)$  gibt an, inwiefern der Wert  $b$  durch die Variablen  $x_1$  und  $x_2^s$  erreicht wird.

$$\begin{aligned} \text{Min } & \sum_{s=1}^S P_s \cdot SK \cdot (v_s^+ + v_s^-) \\ & f_3(x_1, x_2^s) = b + v_s^+ - v_s^- \quad \forall s \end{aligned} \quad (5.10)$$

Unter- und Überschreitung eines vorgegebenen Wertes  $b$  können in der Zielfunktion, wie in Modell (5.10) bei der Minimierung der erwarteten Strafkosten dargestellt, mit

<sup>97</sup> Vgl. etwa Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995), S. 274f.

einem einheitlichen Strafkostensatz bewertet werden. Eine unterschiedliche Bewertung ist durch eine Unterscheidung in  $SK^+$  für Überschreitungen und  $SK^-$  für Unterschreitungen analog möglich. Bei den Strafkosten kann es sich hinsichtlich der Kapazität um direkt messbare Kosten handeln, die aus Anpassungsmaßnahmen wie Überstunden oder zusätzlichen Schichten resultieren.<sup>98</sup> Bei unbefriedigter Nachfrage muss neben entgangenen Deckungsbeiträgen ebenfalls der Imageverlust, der aus dem Verzicht der Nachfragebefriedigung oder der Nachlieferung in späteren Perioden resultiert, berücksichtigt werden.<sup>99</sup> Häufig werden die Unter- bzw. Überschreitungen nicht einfach, sondern quadratisch in der Zielfunktion als Strafterm berücksichtigt, beispielsweise um größere Abweichungen stärker zu erfassen als kleinere.<sup>100</sup> Die Zulässigkeitsrobustheit lässt sich nicht nur bei einzelnen Restriktionen in einem Optimierungsmodell berücksichtigen, es ist auch eine simultane Berücksichtigung der Zulässigkeitsrobustheit verschiedener Restriktionen, wie Nachfrage- und Kapazitätsrestriktionen, denkbar.<sup>101</sup> Aus der betriebswirtschaftlichen Analyse dieser Restriktionen sind verschiedene Strafkostensätze für die Verletzung der Restriktionen in der Zielfunktion zur Erzeugung robuster Lösungen zu beachten. Die Zulässigkeit kann darüber hinaus ebenfalls mit Chance-Constraints erfasst werden.<sup>102</sup> In Kombination mit den Zielfunktionen zur Erzeugung optimalitätsrobuster Lösungen werden dann beispielsweise zur Gewährleistung der Zulässigkeit mit einer vorgegebenen Mindestwahrscheinlichkeit  $\alpha$  folgende Restriktionen eingefügt:

$$f_1(x_1, x_2^s) \geq D_s - v_s^- \quad \forall s \quad (5.11)$$

$$v_s^- \leq M \cdot (1 - \text{bin}_s) \quad \forall s \quad (5.12)$$

$$\sum_{s=1}^S P_s \cdot \text{bin}_s \geq \alpha \quad (5.13)$$

Unbefriedigte Nachfrage ( $v_s^-$ ) in einem Szenario  $s$  wird erlaubt, wenn die Binärvariable  $\text{bin}_s$  den Wert null annimmt (5.12). Mit Restriktion (5.13) wird jedoch sichergestellt, dass ausreichend viele Binärvariablen  $\text{bin}_s$  den Wert eins annehmen, so dass die Nachfrage mit einer vorgegebenen Mindestwahrscheinlichkeit  $\alpha$  erfüllt wird.

<sup>98</sup> Vgl. etwa Hoitsch (1993), S. 460f.

<sup>99</sup> Vgl. etwa Schiemenz/Schönert (2003), S. 186ff., sowie ursprünglich Zäpfel (1982), S. 115ff.

<sup>100</sup> Vgl. etwa Bok/Lee/Park (1998), S. 1039; Killmer/Anandalingam/Malcolm (2001), S. 600; Soteriou/Chase (2000), S. 283.

<sup>101</sup> Vgl. Scholl (2001), S. 202f.

<sup>102</sup> Vgl. zur Verwendung von Chance-Constraints zur Gewährleistung der Zulässigkeitsrobustheit Scholl (2001), S. 233ff.

*Ergebnisrobustheit*

Die Ergebnisrobustheit erfasst die Schwankungen der möglichen Zielfunktionswerte, die sich als Resultat der Anpassungsmaßnahmen der zweiten Stufe in Abhängigkeit von Szenario  $s$  unterscheiden. Die Variablen  $x_1$  und  $x_2^s$  bilden die mit einem mathematischen Modell ermittelte robuste Lösung ab, wobei  $x_1$  unabhängig von der Realisation eines Umweltzustandes  $s$  die ausgewählte Handlungsalternative widerspiegelt. Je nachdem, welches Szenario  $s$  eintritt, ist dann ebenfalls die entsprechende Handlungsalternative  $x_2^s$  zu realisieren. Der erwartete Zielfunktionswert  $EW(z(x_1, x_2^s))$  dieser robusten Lösung  $x_1$  und  $x_2^s$  kann dann wie folgt erfasst werden:

$$EW(z(x_1, x_2^s)) = \sum_{s=1}^S P_s \cdot z_s(x_1, x_2^s)$$

Als Maß für die Schwankungen der Zielfunktionswerte wird die Varianz<sup>103</sup> (5.14), die Standardabweichung<sup>104</sup> (5.15) oder ein Risikoterm<sup>105</sup> in Form der erwarteten absoluten Abweichung, wie in (5.16) dargestellt, verwendet.

$$VAR(z) = \sum_{s=1}^S P_s \cdot [z_s(x_1, x_2^s) - EW(z)]^2 \quad (5.14)$$

$$STA(z) = \sqrt{\sum_{s=1}^S P_s \cdot [z_s(x_1, x_2^s) - EW(z)]^2} \quad (5.15)$$

$$RT(z) = \sum_{s=1}^S P_s \cdot |z_s(x_1, x_2^s) - EW(z)| \quad (5.16)$$

Diese Maße zur Erzeugung ergebnisrobuster Lösungen werden so in der Zielfunktion berücksichtigt, dass sie den Zielfunktionswert des robusten Modells verschlechtern, d. h. bei einer Maximierungszielfunktion werden diese subtrahiert, bei einer Minimierungszielfunktion addiert. Varianz und Standardabweichung beinhalten definitionsgemäß die Schwankungen um den Erwartungswert<sup>106</sup> und auch der Risikoterm beinhaltet sowohl Unterschreitungen als auch Überschreitungen des Erwartungswertes. Wenn jedoch Zielfunktionswerte, die bei einer zu minimierenden Zielfunktion kleiner sind als der Erwartungswert, die robuste Lösung nicht negativ beeinflussen sollen, ist folgendes Maß für die Ergebnisrobustheit zu wählen:

<sup>103</sup> Vgl. Bok/Lee/Park (1998), S. 1038; Malcolm/Zenios (1994), S. 1044; Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995), S. 267; Suh/Lee (2002), S. 866; Yu/Li (2000), S. 388.

<sup>104</sup> Vgl. Watkins/McKinney (1997), S. 52.

<sup>105</sup> Vgl. Darby-Dowman et al. (2000), S. 85; Yu/Li (2000), S. 387.

<sup>106</sup> Vgl. etwa Reichardt/Reichardt (2002), S. 150.

$$\sum_{s=1}^S P_s \cdot \max \{0; z_s(x_1, x_2^s) - EW(z)\} \quad (5.17)$$

Hier werden bei einer zu minimierenden Zielfunktion lediglich die Schwankungen der Ergebnisse berücksichtigt, die schlechter, demzufolge größer als der Erwartungswert sind.<sup>107</sup> Die in (5.17) dargestellt nichtlineare Modellierung kann durch eine zusätzliche Hilfsvariable in die folgende äquivalente lineare Darstellung überführt werden:

$$\begin{aligned} & \sum_{s=1}^S P_s \cdot \text{hilf}_s \\ \text{hilf}_s & \geq z_s(x_1, x_2^s) - EW(z) \quad \forall s \\ \text{hilf}_s & \geq 0 \quad \forall s \end{aligned}$$

In Tabelle 5.2 werden die in der Literatur verwendeten Zielfunktionen zur Erzeugung robuster Lösungen hinsichtlich Optimalitäts-, Ergebnis- und Zulässigkeitsrobustheit klassifiziert dargestellt. Tabelle 5.2 veranschaulicht, dass die meisten Ansätze einen Eintrag bei der Optimalitätsrobustheit aufweisen, wohingegen Zulässigkeitsrobustheit und Ergebnisrobustheit lediglich bei etwa der Hälfte der vorgestellten Ansätze erfasst werden. Hinsichtlich der Optimalitätsrobustheit ist fraglich, ob alle vorgestellten Ansätze tatsächlich zur Erzeugung optimalitätsrobuster Lösungen geeignet sind. Dies liegt darin begründet, dass ein Teil dieser Ansätze den Erwartungswert, beispielsweise in Form erwarteter Kosten oder erwarteter Gesamtdeckungsbeiträge, verwenden,<sup>108</sup> der in dieser Form kein Maß dafür ist, wie nah die erzeugte „robuste“ Lösung an den szenariooptimalen Zielfunktionswerten ist. Dennoch sehen Mulvey, Vanderbei und Zenios auch den Erwartungswert als bedingt geeignet an, etwa bei Entscheidungssituationen, in denen das Risiko nicht so hoch ist, bzw. der Entscheider nicht risikoavers, sondern eher risikoneutral ist.<sup>109</sup> Aus diesem Grund und aus Gründen der Vollständigkeit sind die Erwartungswerte, die in den Zielfunktionen der vorgestellten Ansätze zur Robustheit integriert sind, unter Optimalitätsrobustheit subsumiert. Lediglich zwei der vorgestellten Ansätze berücksichtigen die Risikoeinstellung des Entscheiders direkt in Form einer Nutzenfunktion und verwenden dementsprechend den erwarteten Nutzen als Zielfunktion zur Ermittlung einer robusten Lösung.<sup>110</sup> Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass Entscheider nicht immer eine exakte Präferenz besitzen oder ihre Präferenzen erst während der Ermittlung der Nutzenfunktionen bilden und auf diese Weise leicht durch die Art der Ermittlung beeinflusst werden können.<sup>111</sup>

<sup>107</sup> Vgl. Ahmed/Sahinides (1998), S. 1886.

<sup>108</sup> Vgl. Tabelle 5.2.

<sup>109</sup> Vgl. Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995), S. 267.

<sup>110</sup> Vgl. Bai/Carpenter/Mulvey (1997); Vassiadou-Zeniou/Zenios (1996).

<sup>111</sup> Vgl. zur Ermittlung von Nutzenfunktionen und den damit verbundenen Schwierigkeiten etwa Eisenführ/Weber (2003), S. 227ff.

Literaturquelle	Optimalitätsrobustheit	Ergebnisrobustheit	Zulässigkeitsrobustheit
Ahmed/Sahinides (1998)	Min erwartete Kosten	Überschreitung der erwarteten Kosten	-
Bai/Carpenter/Mulvey (1997)	Max erwarteten Nutzen	-	-
Bok/Lee/Park (1998)	Max erwarteten Deckungsbeitrag	Varianz	erwartete quadrierte Kapazitätsüberschreitung
Butler (2003)	Max erwarteten Deckungsbeitrag - erwartetes gewichtetes relatives Bedauern	-	-
Darby-Dowman et al. (2000)	Max gewichteten erwarteten Deckungsbeitrag	Risikoterm	-
Escudero (1994)	Min erwartete Abweichung vom Szenariooptimum	-	Straffunktion, etwa erwartete quadratische Unzulässigkeit
Gupta/Rosenhead (1968) Rosenhead/Elton/Gupta (1972)	Max Quotient aus Anzahl der Entscheidung mit gleichem ersten Schritt und Gesamtzahl der "guten" Entscheidungen	-	-
Rosenblatt/Lee (1987) Gutiérrez/Kouvelis/Kurawarwala (1996)	Abweichung vom Szenariooptimum maximal p%	-	-
Gutiérrez/Kouvelis (1995)	Min maximale relative Abweichung vom Szenariooptimum	-	-
Killmer/Anandalingam/Malcolm (2001)	Min erwartete Kosten + erwartete gewichtete quadrierte Abweichung vom Szenariooptimum	-	erwartete bewertete quadrierte Unzulässigkeit
Kouvelis/Yu (1997)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Min maximale Kosten</li> <li>• Min maximale Abweichung vom Szenariooptimum</li> <li>• Min maximale relative Abweichung</li> </ul>	-	-
Laguna (1998)	Min abdiskontierte Kosten	-	bewertete erwartete Unzulässigkeit
Leung/Wu/Lai (2002)	Min erwartete Kosten	Risikoterm	bewertete erwartete Unzulässigkeit
List et al. (2003)	Min erwartete Kosten	Überschreitung eines vorgegebenen Maximalwertes der Kosten	Strafkosten in Höhe der Lagerhaltungskosten
Malcolm/Zenios (1994)	Min erwartete Kosten	Varianz	bewertete quadrierte erwartete Unzulässigkeiten
Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Min maximale Kosten</li> <li>• Min Erwartungswert</li> <li>• Max erwarteten Nutzen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• -</li> <li>• Varianz</li> <li>• -</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• bewertete erwartete quadrierte Unzulässigkeit</li> <li>• bewertete erwartete Unzulässigkeit</li> </ul>
Soteriou/Chase (2000)	Max Erwartungswert	-	bewertete erwartete quadrierte Unzulässigkeit
Suh/Lee (2002)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Min erwartete Kosten</li> <li>• Kosten <math>&lt; \epsilon</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Varianz <math>&lt; \epsilon</math></li> <li>• Min Varianz</li> </ul>	-
Vairaktarakis (2000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Max minimalen Gewinn</li> <li>• Min maximales Bedauern</li> <li>• Min maximales relatives Bedauern</li> </ul>	-	-
Vassiadou-Zeniou/Zenios (1996)	Max erwarteten Nutzen	-	maximale Unzulässigkeit
Watkins/McKinney (1997)	Min erwartete Kosten	Standardabweichung	bewertete erwartete quadrierte Unzulässigkeit
Yu/Li (2000)	Min erwartete Kosten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Varianz</li> <li>• Risikoterm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• erwartete quadrierte Unzulässigkeit</li> <li>• erwartete absolute Unzulässigkeit</li> </ul>

Tabelle 5.2: Literaturüberblick über Robustheit in mathematischen Modellen

Bei der Ergebnisrobustheit zeigt sich mit Ausnahme des Ansatzes von Ahmed und Sahinides,<sup>112</sup> dass Streuungsmaße um den Erwartungswert betrachtet werden, die

<sup>112</sup> Vgl. Ahmed/Sahinides (1998).

sowohl Überschreitungen als auch Unterschreitungen des Erwartungswertes in der robusten Zielfunktion gleichermaßen bestrafen. Dabei ist insbesondere fraglich, warum Zielfunktionswerte bestraft werden, die besser sind als der Erwartungswert. Die Lösbarkeit der Optimierungsmodelle wird durch die Integration der Varianz oder der Standardabweichung verschlechtert, da die Berücksichtigung dieser zu einer nicht-linearen Zielfunktion führt, wohingegen der Risikoterm als absolute Abweichung vom Erwartungswert durch zwei Abweichungsvariablen linearisiert werden kann.<sup>113</sup> Darüber hinaus kann eine Berücksichtigung der Varianz, der Standardabweichung oder des Risikoterms in der Zielfunktion zur Ermittlung einer robusten Lösung zur Verschlechterung der Zielfunktionswerte einzelner Szenarien führen, um die Streuung zu verringern.<sup>114</sup> So kann beispielsweise bei Szenarien mit sehr geringen Kosten ein nicht erforderliches Lager errichtet werden oder teure Transportwege ausgewählt werden, um auf diese Weise die Streuung der Zielfunktionswerte der Szenarien zu verringern. Vorrangig aus diesem Grund ist eine direkte Berücksichtigung der Ergebnisrobustheit in Kombination mit der Optimalitätsrobustheit gerade bei stark schwankenden szenariooptimalen Zielfunktionswerten kritisch zu sehen.

Ein Vorgehen zur Verminderung der Streuung und damit zur Ermittlung einer ergebnisrobusten Lösung, welches nicht auf Variationen der Varianz oder der Standardabweichung beruht, schlagen List et al. vor.<sup>115</sup> Dabei wird ein Schwellenwert für die gesamten Kosten definiert und eine Überschreitung dieses Wertes für jedes Szenario mit Strafkosten in der Zielfunktion berücksichtigt. Dies hat zur Folge, dass Schwankungen der Zielfunktionswerte der einzelnen Szenarien bis zu diesem Schwellenwert akzeptiert werden und darüber hinaus durch die Strafkosten unterdrückt werden sollen. Dieses Vorgehen hat im Gegensatz zur Integration der Varianz den Vorteil, dass lediglich Abweichungen beachtet werden, die den Zielfunktionswert verschlechtern. Andererseits ist jedoch fraglich, wie die Festlegung dieses Schwellenwertes für akzeptable Kosten insbesondere bei stark voneinander abweichenden szenariooptimalen Kosten erfolgen soll.

Hinsichtlich der Zulässigkeitsrobustheit ist auffällig, dass die meisten Ansätze, die Unzulässigkeiten erlauben, diese quadratisch in der Zielfunktion berücksichtigen, um sowohl positive als auch negative Abweichungen zu bestrafen.<sup>116</sup> Durch die quadratische Erfassung der Abweichungen werden des Weiteren größere Abweichungen stärker bestraft als kleinere. Ist dieser zweite Effekt zu vernachlässigen, etwa sofern die Strafkosten den tatsächlichen durch die Unzulässigkeiten entstehenden Kosten ent-

<sup>113</sup> Vgl. Yu/Li (2000), S. 388ff. sowie für eine Anwendung Leung/Wu/Lai (2002), S. 1225ff.

<sup>114</sup> Vgl. List et al. (2003), S. 216ff.

<sup>115</sup> Vgl. List et al. (2003).

<sup>116</sup> Vgl. Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995), S. 266.



sprechen, ist, wie in diesem Kapitel dargestellt, eine Modellierung durch zwei positive Abweichungsvariablen möglich, so dass eine nichtlineare Berücksichtigung in der Zielfunktion vermieden werden kann. Ferner zeigt sich, dass nahezu alle Ansätze die erwarteten Unzulässigkeiten berücksichtigen, lediglich der Ansatz von Vassiadou-Zeniou und Zenios betrachtet die maximale Unzulässigkeit in der Zielfunktion, womit eine risikoaverse Einstellung des Entscheiders betont wird.<sup>117</sup>

Die Zielfunktion zur Ermittlung einer robusten Lösung kann sich somit aus drei verschiedenen Bestandteilen, je einem für die Optimalitäts-, die Ergebnis- und die Zulässigkeitsrobustheit bzw. lediglich aus Optimalitäts- und Zulässigkeitsrobustheit zusammensetzen, wenn die Ergebnisrobustheit unberücksichtigt bleiben soll. Um die Präferenzen des Entscheiders hinsichtlich der verschiedenen Robustheitsarten zu berücksichtigen, können die einzelnen Bestandteile gewichtet werden.<sup>118</sup> Sind keine Präferenzen des Entscheiders bekannt, so können die Gewichte zur Erzeugung verschiedener Lösung bzw. zur Veranschaulichung des Trade-Offs zwischen den verschiedenen Robustheitsarten benutzt werden.<sup>119</sup> Es ist jedoch bei zweistufigen Modellen ebenfalls möglich, die Zulässigkeitsrobustheit direkt in die Optimalitätsrobustheit zu integrieren, falls eine Quantifizierung der Unzulässigkeiten etwa durch die daraus entstehenden Kosten direkt möglich ist. Diese planbaren oder auch erwünschten Kompensationen können etwa als Kosten in der zu ermittelnden robusten Lösung berücksichtigt werden,<sup>120</sup> so dass diese in der Abweichung von den szenariooptimalen Werten und damit in der Optimalitätsrobustheit direkt erfasst und damit ebenfalls minimiert werden. Dieses Vorgehen wird im Rahmen der Ermittlung eines robusten Supply Chain Design bei einer Zielsetzung angewandt und näher erläutert,<sup>121</sup> da die Annahme getroffen wird, dass es sich um erwünschte, quantifizierbare Kompensationen handelt.

Im folgenden Abschnitt wird zunächst kurz auf die verschiedenen Arten des Umgangs mit mehrfachen Zielsetzungen in mathematischen Modellen eingegangen, um darauf aufbauend einen Robustheitsbegriff bei Mehrfachzielsetzung zu entwickeln und verschiedene Arten der Erzeugung robuster Lösungen bei Mehrfachzielsetzung aufzuzeigen und zu analysieren.

<sup>117</sup> Vgl. Vassiadou-Zeniou/Zenios (1996), S. 266.

<sup>118</sup> Vgl. Yu/Li (2000), S. 387.

<sup>119</sup> Vgl. Malcolm/Zenios (1994), S. 1042; Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995), S. 266.

<sup>120</sup> Vgl. Scholl (2001), S. 201ff.

<sup>121</sup> Vgl. Abschnitt 5.5.1.

## 5.4 Planungsunterstützung bei Mehrfachzielsetzung

### 5.4.1 Mehrfachzielsetzung in mathematischen Modellen

Neben der Berücksichtigung von Unsicherheit sind häufig mehrere relevante Zielsetzungen zu verfolgen, um die Anforderungen praktischer Fragestellung in mathematischen Modellen adäquat zu beachten. Dabei sind eine Reihe von Anforderungen an Zielsysteme, wie Vollständigkeit, Redundanzfreiheit oder Einfachheit, zu erfüllen, um die Erfassung aller relevanten Zusammenhänge in den Zielsetzungen zu gewährleisten.<sup>122</sup> Unter dem Oberbegriff der multikriteriellen Entscheidungsprobleme (Multiple Criteria Decision Making MCDM) wird dabei nach der Anzahl der Handlungsalternativen zwischen multiattributiven Entscheidungsproblemen (Multiple Attribute Decision Making MADM) und Vektoroptimierungsproblemen<sup>123</sup> (Multiple Objective Decision Making MODM) unterschieden. Multiattributive Entscheidungsprobleme sind durch eine endliche Anzahl möglicher Handlungsalternativen charakterisiert, wohingegen Vektoroptimierungsmodelle durch eine unendliche Anzahl möglicher Handlungsalternativen gekennzeichnet sind.<sup>124</sup> Gibt es eine Handlungsalternative, die für jedes Ziel den optimalen Zielfunktionswert erreicht, so handelt es sich um eine perfekte Lösung.<sup>125</sup> Da es in der Regel jedoch keine perfekte Lösung gibt, da die verschiedenen Ziele häufig in einem Zielkonflikt zueinander stehen,<sup>126</sup> muss eine effiziente Kompromisslösung ausgewählt werden, die den subjektiven Präferenzen des Entscheiders entspricht. Für die Erzeugung von Kompromisslösungen sind eine Vielzahl möglicher Verfahren entwickelt worden.<sup>127</sup> Diese lassen sich klassifizieren nach dem Zeitpunkt der Berücksichtigung der zusätzlichen Informationen, d. h. den Präferenzen des Entscheiders hinsichtlich der verschiedenen Ziele. Dabei gibt es drei Arten der Berücksichtigung der Präferenzen des Entscheiders: a priori, a posteriori und iterativ bzw. progressiv.<sup>128</sup> Da es sich beim Supply Chain Design auf Grund der Festlegung der Materialflüsse in den meisten Fällen um ein Entscheidungsproblem mit einer unendlichen Anzahl möglicher Handlungsalternativen handelt, werden im Folgenden lediglich die Verfahren zu diesem Teil der multikriteriellen Entscheidungsprobleme, den Vektoroptimierungsproblemen, weiter betrachtet.<sup>129</sup>

<sup>122</sup> Vgl. für eine ausführliche Erläuterung der Anforderungen an Zielsysteme Eisenführ/Weber (2003), S. 60ff.

<sup>123</sup> Der Begriff Vektoroptimierungsmodell findet sich etwa bei Domschke/Scholl (2003), S. 39.

<sup>124</sup> Vgl. Roth (1998), S. 25; Triantaphyllou (2000), S. 1; Zanakis et al. (1998), S. 507f.; Zimmermann/Gutsche (1991), S. 25f.

<sup>125</sup> Vgl. Dinkelbach/Kleine (1996), S. 37; Roth (1998), S. 29.

<sup>126</sup> Vgl. Homburg (2000), S. 590.

<sup>127</sup> Vgl. für einen Überblick über die verschiedenen Verfahren etwa Cho (2003); Korhonen/Moskowitz/Wallenius (1992); Zanakis et al. (1998) und die dort angegebene Literatur.

<sup>128</sup> Vgl. etwa Collette/Siarry (2003), S. 8f.; Korhonen/Moskowitz/Wallenius (1992), S. 364f.; Zimmermann/Gutsche (1991), S. 30f.

<sup>129</sup> Vgl. für Verfahren zum Umgang mit multiattributiven Entscheidungsproblemen auch Abschnitt 4.2, in dem die Verfahren zur Auswahl von Zulieferern vorgestellt werden, für einen Überblick etwa Yoon/Hwang (1995).

*Verfahren mit a priori bekannten Präferenzen*

Bei diesen Verfahren werden die Präferenzen des Entscheiders hinsichtlich der verschiedenen Ziele vor der Auswahl einer Handlungsalternative berücksichtigt, d. h. im Rahmen mathematischer Optimierung wird, falls keine Unsicherheit zu berücksichtigen ist, ein mathematisches Modell gelöst und die auf diese Weise generierte Lösung beinhaltet bereits die Präferenzen des Entscheiders.<sup>130</sup> Die zusätzlichen Informationen können etwa durch Gewichtung der verschiedenen Ziele<sup>131</sup> oder durch Festlegung von Anspruchsniveaus<sup>132</sup> erfolgen. Werden Anspruchsniveaus festgelegt, so können alle Ziele bis auf eines in Form von Restriktionen in das Modell integriert werden, so dass dann lediglich ein Modell mit einer Zielsetzung zu berücksichtigen ist. Alternativ kann der Ansatz des Goal-Programming bzw. der Zielprogrammierung verwendet werden, bei dem die Abweichung von den Anspruchsniveaus bzw. Goals zu minimieren ist.<sup>133</sup> Darüber hinaus kann die Nutzenfunktion des Entscheiders a priori ermittelt werden und auf diese Weise im Vorhinein eine Integration der Bewertungen der unterschiedlichen Lösungen erfolgen. Des Weiteren kann eine Rangfolge der Ziele in Form einer lexikografischen Ordnung erstellt werden, bei der die Ziele nach ihrer Wichtigkeit für den Entscheider zu ordnen sind.<sup>134</sup> Daran anschließend wird hinsichtlich des wichtigsten Ziels optimiert und nur bei verschiedenen gleich guten Lösungen wird die nächst wichtigere Zielfunktion herangezogen. Dieses Vorgehen entspricht jedoch häufig nicht der Berücksichtigung mehrerer relevanter Zielsetzungen, da bei unbegrenzt vielen Alternativen vielfach bereits das wichtigste Ziel zu einer eindeutigen Lösung führt.

*Verfahren mit a posteriori bekannt gegebenen Präferenzen*

Bei diesem Vorgehen müssen die Präferenzen des Entscheiders nicht explizit formuliert werden. Vielmehr wird eine Reihe effizienter Lösungen generiert, zwischen denen der Entscheider gemäß seinen Präferenzen wählen kann.<sup>135</sup> Im Rahmen der Erzeugung von effizienten Lösungen kann beispielsweise eine Trade-Off-Kurve zwischen zwei Zielsetzungen erzeugt werden, so dass der Entscheider direkt sehen kann, inwieweit eine Veränderung hinsichtlich der einen Zielsetzung die Ausprägungen der anderen Zielsetzung beeinflusst. Es ist jedoch zu beachten, dass diese Art der Entscheidungsunterstützung mit zunehmender Anzahl generierter effizienter Lösungen an Wert verliert,<sup>136</sup> da es für den Entscheider bei einer großen Anzahl effizienter Lösungen schwieriger ist, die seinen Präferenzen entsprechende Lösung zu identifizieren.

<sup>130</sup> Vgl. Collette/Siarry (2003), S. 8f.

<sup>131</sup> Vgl. zur Zielgewichtung Bamberg/Coenenberg (2002), S. 55f.; Dinkelbach/Kleine (1996), S. 48ff.

<sup>132</sup> Vgl. zur Festlegung von Anspruchsniveaus Eisenführ/Weber (2003), S. 86f.; Saliger (2003), S. 24ff.

<sup>133</sup> Vgl. zum Goal-Programming Bamberg/Coenenberg (2002), S. 59f.; Schniederjans (1995).

<sup>134</sup> Vgl. Collette/Siarry (2003), S. 71f.; Laux (2003), S. 96f.; Saliger (2003), S. 33f.

<sup>135</sup> Vgl. Korhonen/Moskowitz/Wallenius (1992), S. 365.

<sup>136</sup> Vgl. Werners (1984), S. 69.

### *Verfahren mit progressiv bekannt werdenden Präferenzen*

Bei dieser Art der Informationsintegration werden die Präferenzen des Entscheiders sukzessive während des Optimierungsprozesses beachtet. Dabei kann der Entscheider üblicherweise die Modellformulierung so lange beeinflussen, bis die erzeugte Lösung seinen Präferenzen entspricht bzw. die Existenz einer für ihn akzeptablen Lösung ausgeschlossen werden kann.<sup>137</sup> Dass der Entscheider in den gesamten Prozess zur Ermittlung einer optimalen Lösung involviert ist, erhöht zwar die Akzeptanz der erzeugten Lösung, hat jedoch gegenläufig einen erhöhten Zeitaufwand seitens des Entscheiders zur Folge und zwar insbesondere, wenn die mathematische Optimierung auf Grund der Komplexität der Problemstellung oder der Daten eine längere Zeit in Anspruch nimmt.<sup>138</sup> Ein interaktives Vorgehen hat jedoch den entscheidenden Vorteil, dass veränderte Präferenzen des Entscheiders, die während der fortschreitenden Analyse der Problemstellung häufig entstehen, in diesen Verfahren erwartet werden und daher ohne Weiteres in den Prozess integriert werden können.<sup>139</sup>

Die Konfiguration einer robusten Supply Chain und die Berücksichtigung einer erweiterten Zuliefererauswahl erfordert die Erfassung von zwei Zielfunktionen in einem mathematischen Optimierungsmodell. Im Folgenden werden daher verschiedene Möglichkeiten zur Berücksichtigung der Präferenzen des Entscheiders hinsichtlich mehrerer relevanter Ziele im Zusammenhang mit der Erzeugung robuster Lösungen diskutiert. Abschließend werden die entwickelten Ersatzmodelle auf die Anwendung des Supply Chain Design mit erweiterter Zuliefererauswahl übertragen und hinsichtlich ihrer Eignung zur Erzeugung robuster Lösungen bewertet.

## **5.4.2 Erweiterung des Robustheitskonzeptes um die Zielrobustheit**

Bei den in der Literatur vorgestellten Ansätzen zeigt sich, dass sowohl Optimalitäts- als auch Ergebnis- und Zulässigkeitsrobustheit mit je einem Term in der Zielfunktion zur Erzeugung robuster Lösungen verwendet werden.<sup>140</sup> Wie in Abschnitt 5.3.2 dargestellt, werden diese verschiedenen Bestandteile einer zu optimierenden Zielfunktion mit Gewichten versehen, um auf diese Weise die Präferenzen des Entscheiders zu berücksichtigen oder bei variierenden Gewichtungsfaktoren den Zusammenhang bzw. Trade-Off zwischen den verschiedenen Robustheitsarten zu veranschaulichen. Damit ist die Erzeugung robuster Lösungen bei der Berücksichtigung mehrerer Robustheitsarten ein Mehrfachzielsetzungsproblem. Sind die Präferenzen des Entscheiders a priori

<sup>137</sup> Vgl. Werners (1984), S. 108.

<sup>138</sup> Vgl. Collette/Siarry (2003), S. 9. Für einen Überblick über interaktive Verfahren zur Mehrfachzielsetzung vgl. Collette/Siarry (2003), S. 81ff.; Werners (1984), S. 108ff.

<sup>139</sup> Vgl. Kaliszewski (2000), S. 162.

<sup>140</sup> Vgl. Abschnitt 5.3.2.

bekannt, so werden Zielgewichte für die verschiedenen Robustheitszielsetzungen festgelegt und es wird eine robuste Lösung ermittelt.<sup>141</sup> Die Integration der Präferenzen des Entscheiders a posteriori umfasst auch bei der Robustheit die Ermittlung verschiedener effizienter Lösungen, etwa indem der Trade-Off zwischen Optimalitäts- und Zulässigkeitsrobustheit in Form verschiedener effizienter Lösungen ermittelt wird, zwischen denen der Entscheider wählen kann.<sup>142</sup> Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es sich bei der Erzeugung robuster Lösungen mit mehreren Robustheitsarten um Mehrfachzielsetzungsansätze handelt, die sich jedoch hinsichtlich eines ursprünglich deterministischen Modells bzw. der wirtschaftlichen Fragestellung auf eine Zielsetzung wie Kostenminimierung oder Gewinnmaximierung beziehen. Im Folgenden werden verschiedene Ansätze zur simultanen Berücksichtigung unterschiedlicher wirtschaftlicher Zielsetzungen im Hinblick auf die Erzeugung robuster Lösungen diskutiert. Da die Zulässigkeitsrobustheit entweder unabhängig von den Zielsetzungen mit Hilfe von Chance-Constraints oder durch Strafkosten in die Zielfunktion der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags integriert wird, haben weitere zu berücksichtigende Zielsetzungen überwiegend Auswirkungen auf die Optimalitätsrobustheit. Es werden daher verschiedene Ansätze zur Erzeugung optimalitätsrobuster Lösungen bei zwei oder mehreren relevanten Zielsetzungen vorgestellt. Zunächst wird jedoch in Anlehnung an die Definition der verschiedenen Robustheitsbegriffe in Abschnitt 5.3.1 an dieser Stelle der Begriff der Zielrobustheit definiert:

Eine Lösung wird als zielrobust bezeichnet, wenn diese für jedes Ziel nicht oder nur wenig von allen szenariooptimalen Zielfunktionswerten abweicht. Mit anderen Worten gilt eine Lösung genau dann als zielrobust, wenn hinsichtlich jedes Ziels Optimalitätsrobustheit vorliegt.

Die Erfassung der Zielrobustheit wird in Anlehnung an Mehrfachzielsetzungsansätze unter Sicherheit, die im vorherigen Abschnitt erläutert wurden, in a priori, iterative oder a posteriori Beachtung der Präferenzen des Entscheiders unterschieden. Zunächst werden jedoch einige zusätzliche Symbole eingeführt:

$z_s^1(x_1, x_2^s)$	Zielfunktionswert der robusten Lösung der Zielfunktion 1 bei Szenario s
$z_s^2(x_1, x_2^s)$	Zielfunktionswert der robusten Lösung der Zielfunktion 2 bei Szenario s
$z_s^{1opt}, z_s^{2opt}$	optimaler Zielfunktionswert von Zielfunktion 1 bzw. 2 bei Szenario s
$u_s^{1+}, u_s^{2+}$	Überschreitung des szenariooptimalen Zielfunktionswertes der Zielfunktion 1 bzw. 2 bei Szenario s

<sup>141</sup> So angewandt etwa bei Darby-Dowman (2000), S. 85; Leung/Wu/Lai (2002), S. 1299.

<sup>142</sup> Vgl. etwa Malcolm/Zenios (1994), S. 1042.

$u_s^{1-}, u_s^{2-}$	Unterschreitung des szenariooptimalen Zielfunktionswertes der Zielfunktion 1 bzw. 2 bei Szenario $s$
$\xi^1, \xi^2$	Variable zur Erfassung der Optimalitätsrobustheit hinsichtlich Zielsetzung 1 bzw. 2
$\rho$	Variable zur Erfassung der Zulässigkeitsrobustheit
$\omega$	Gewichtungsfaktor für die verschiedenen Robustheitsarten
$\beta^1, \beta^2$	Gewichtungsfaktoren für die Optimalitätsrobustheit der verschiedenen Zielsetzungen
$AN^2$	Anspruchsniveau hinsichtlich der Optimalitätsrobustheit von Zielsetzung 2

### *Robustheit bei a priori bekannten Präferenzen*

Sind die Präferenzen des Entscheiders hinsichtlich der Optimalitätsrobustheit einer Zielsetzung bekannt, so können diese Präferenzen als Anspruchsniveau erfasst werden. In Modell (5.18) wird eine beliebige Ersatzzielfunktion zur Erzeugung optimalitätsrobuster Lösungen hinsichtlich Zielsetzung 1, dargestellt durch  $\xi^1$ , minimiert, etwa in Anlehnung an (5.5), (5.6) oder (5.7), während für Zielsetzung 2, dargestellt durch  $\xi^2$ , das absolute Bedauern, d. h. die Überschreitung der szenariooptimalen Zielfunktionswerte, maximal dem Anspruchsniveau  $AN^2$  entsprechen darf.

$$\begin{aligned} \text{Min } \xi^1 \\ \xi^2 = u_s^{2+} \leq AN^2 \quad \forall s \\ Z_s^{2\text{opt}} + u_s^{2+} - u_s^{2-} = z_s^2(x_1, x_2^s) \quad \forall s \end{aligned} \quad (5.18)$$

Entsprechend kann für die Betrachtung der Optimalitätsrobustheit der zweiten Zielsetzung das maximale relative Bedauern gewählt werden, welches dann ebenfalls maximal einem vorgegebenen Anspruchsniveau  $AN^2$  entsprechen darf.

$$\begin{aligned} \text{Min } \xi^1 \\ \xi^2 = \frac{u_s^{2+}}{Z_s^{2\text{opt}}} \leq AN^2 \quad \forall s \\ Z_s^{2\text{opt}} + u_s^{2+} - u_s^{2-} = z_s^2(x_1, x_2^s) \quad \forall s \end{aligned} \quad (5.19)$$

Die Festlegung eines Anspruchsniveaus für das erwartete relative Bedauern hinsichtlich der szenariooptimalen Zielfunktionswerte der Zielfunktion 2 ist, wie in Modell (5.20) dargestellt, analog möglich.

Min  $\xi^1$ 

$$\xi^2 = \sum_{s=1}^S P_s \cdot \frac{u_s^{2+}}{Z_s^{2opt}} \leq AN^2 \quad (5.20)$$

$$Z_s^{2opt} + u_s^{2+} - u_s^{2-} = z_s^2(x_1, x_2^s) \quad \forall s$$

Ein weiteres Vorgehen, welches die Optimalitätsrobustheit beider Zielfunktionen berücksichtigt, ist die simultane Betrachtung beider Abweichungen von den szenario-optimalen Zielfunktionswerten. Dabei ist insbesondere die Verwendung der relativen Abweichung sinnvoll, da die Vergleichbarkeit hinsichtlich der Optimalitätsrobustheit unabhängig von den tatsächlichen Ausprägungen der einzelnen Zielfunktionen gegeben ist. Die dementsprechende mathematische Darstellung des maximalen relativen Bedauerns ohne Berücksichtigung der Zulässigkeitsrobustheit lautet wie folgt:

Min  $\xi$ 

$$\xi \geq \frac{u_s^{1-}}{Z_s^{1opt}} \quad \forall s$$

$$\xi \geq \frac{u_s^{2-}}{Z_s^{2opt}} \quad \forall s \quad (5.21)$$

$$Z_s^{1opt} + u_s^{1+} - u_s^{1-} = z_s^1(x_1, x_2^s) \quad \forall s$$

$$Z_s^{2opt} + u_s^{2+} - u_s^{2-} = z_s^2(x_1, x_2^s) \quad \forall s$$

Dieses Vorgehen ist den Verfahren mit einer a priori Berücksichtigung der Präferenzen des Entscheiders zuzuordnen, da zwar keine explizite Angabe der Präferenzen erforderlich ist, dennoch implizit angenommen wird, dass die maximalen relativen Überschreitungen unabhängig davon, welche Zielfunktion letztlich die maximale relative Überschreitung determiniert, von beiden Zielfunktionen gleichbedeutend sind. Analog ist die simultane Minimierung der erwarteten relativen Abweichungen, wie in Modell (5.22) dargestellt, möglich.

Min  $\xi$ 

$$\xi \geq \sum_{s=1}^S P_s \cdot \frac{u_s^{1-}}{Z_s^{1opt}}$$

$$\xi \geq \sum_{s=1}^S P_s \cdot \frac{u_s^{2-}}{Z_s^{2opt}} \quad (5.22)$$

$$Z_s^{1opt} + u_s^{1+} - u_s^{1-} = z_s^1(x_1, x_2^s) \quad \forall s$$

$$Z_s^{2opt} + u_s^{2+} - u_s^{2-} = z_s^2(x_1, x_2^s) \quad \forall s$$

Auch diesem Vorgehen liegt implizit die Annahme der gleichen Bedeutung beider Zielsetzungen zu Grunde, da im Vorhinein nicht bekannt ist, welche Zielsetzung die erwartete minimale relative Abweichung letztlich bestimmt.

Ein häufig angewandter Ansatz bei mehrfachen Zielsetzungen ist die Zielgewichtung.<sup>143</sup> Bei Erfassung der Zulässigkeitsrobustheit mit einem zusätzlichen Term  $\rho$  in der Zielfunktion, bei dem der Entscheider zunächst Präferenzen hinsichtlich der Wichtigkeit von Optimalitäts- und Zulässigkeitsrobustheit mit  $\omega$  bzw.  $(1-\omega)$  als auch hinsichtlich der verschiedenen wirtschaftlichen Zielsetzungen in Form von Gewichten  $(\beta^1, \beta^2)$  angeben kann, lautet eine mögliche, allgemeine Zielsetzung eines robusten Optimierungsmodells unabhängig von der konkreten Ausprägung der Erfassung der verschiedenen Robustheitsarten wie folgt:

$$\text{Min } \omega \cdot [\beta^1 \cdot \xi^1 + \beta^2 \cdot \xi^2] + (1-\omega) \cdot \rho \quad (5.23)$$

Wird zur Erfassung der Optimalitätsrobustheit bei beiden Zielfunktionen beispielsweise die maximale relative Überschreitung der szenariooptimalen Zielfunktionswerte ausgewählt, dann müssen neben der zu minimierenden Zielfunktion die folgenden Restriktionen ergänzt werden:

$$\xi^1 \geq \frac{u_s^{1-}}{z_s^{1\text{opt}}} \quad \forall s \quad (5.24)$$

$$z_s^{1\text{opt}} + u_s^{1+} - u_s^{1-} = z_s^1(x_1, x_2^s) \quad \forall s$$

$$\xi^2 \geq \frac{u_s^{2-}}{z_s^{2\text{opt}}} \quad \forall s \quad (5.25)$$

$$z_s^{2\text{opt}} + u_s^{2+} - u_s^{2-} = z_s^2(x_1, x_2^s) \quad \forall s$$

Es können jedoch auch unterschiedliche Restriktionen für die Festlegung der  $\xi$  der verschiedenen Zielsetzungen verwendet werden, wenn der Entscheider hinsichtlich der Ziele unterschiedliche Risikopräferenzen hat. Bei diesem Vorgehen ist zu beachten, dass die Gewichtungsfaktoren die Austauschraten angeben und dementsprechend festlegen, in welcher Höhe  $\xi^1$  verbessert werden muss, um eine Verringerung von  $\xi^2$  zu kompensieren. Darüber hinaus ist bei der Darstellung (5.23) zu beachten, dass nicht nur die Austauschraten hinsichtlich der Optimalitätsrobustheit, sondern ebenfalls die Austauschrate  $\omega$  zwischen Optimalitäts- und Zulässigkeitsrobustheit angegeben werden muss. Des Weiteren wird bei verschiedenen Arten der Festlegung des  $\xi$  sowie

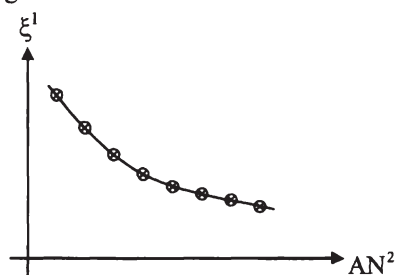
<sup>143</sup> Vgl. etwa Bamberg/Coenenberg (2002), S. 55.



der zusätzlichen Integration der Zulässigkeitsrobustheit etwa als erwartete Strafkosten die Interpretation des Zielfunktionswertes der Ersatzzielfunktion zur Erzeugung robuster Lösungen erschwert.

#### *Robustheit bei a posteriori bekannt gegebenen Präferenzen*

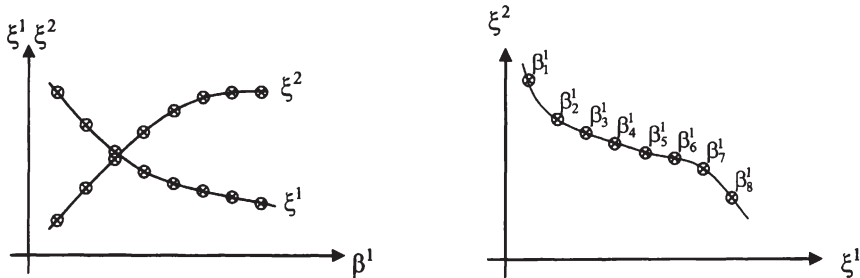
Werden die Präferenzen des Entscheiders erst nach der Ermittlung robuster Lösungen einbezogen, dann kann mit Hilfe einer visualisierten Darstellung verschiedener möglicher Lösungen die Entscheidungsfindung des Entscheiders unterstützt werden. So kann beispielsweise das in den Modellen (5.18), (5.19) oder (5.20) verwendete Anspruchsniveau variiert werden und dementsprechend der Zusammenhang zwischen dem Anspruchsniveau hinsichtlich der Optimalitätsrobustheit der zweiten Zielsetzung und der Optimalitätsrobustheit der ersten Zielsetzung, wie beispielhaft in Abbildung 5.2 visualisiert, hergestellt werden. Mit steigendem Anspruchsniveau, d. h. mit der Verschlechterung der Optimalitätsrobustheit der zweiten Zielsetzung, sinkt, d. h. verbessert sich der Wert der Optimalitätsrobustheit der ersten Zielsetzung. Der Entscheider hat dann die Möglichkeit, anhand der Darstellung der Ergebnisse das seinen Präferenzen entsprechende Ergebnis zu wählen.



**Abbildung 5.2: Trade-Off-Kurve Optimalitätsrobustheit vs. Anspruchsniveau**

Analog zu der Darstellung des Trade-Offs zwischen Optimalitätsrobustheit und Anspruchsniveau können Trade-Off-Kurven bei einem Zielgewichtungsansatz erstellt werden. Dabei werden für die in (5.23) mit  $\beta^1$  bzw.  $\beta^2$  bezeichneten Gewichte verschiedene Werte angenommen, etwa so, dass die Summe der Gewichte eins beträgt und folglich  $\beta^2$  als  $1-\beta^1$  ausgedrückt werden kann. Die aus der Variation von  $\beta^1$  resultierenden  $\xi^1$  und  $\xi^2$  können in einer Trade-Off-Kurve visualisiert, wie in Abbildung 5.3 dargestellt, der Entscheidungsunterstützung dienen. Dabei sind zwei unterschiedliche Arten der Darstellung möglich. Einerseits können die Ausprägungen in Abhängigkeit von dem Gewichtungsfaktor  $\beta^1$  in zwei verschiedenen Kurven, wie in

dem linken Teil der Abbildung 5.3 angedeutet, dargestellt werden und andererseits gegeneinander abgetragen werden, wie im rechten Teil angedeutet wird.<sup>144</sup>



**Abbildung 5.3: Trade-Off-Kurven Optimalitätsrobustheit bei zwei Zielen**

#### *Robustheit bei progressiv bekannt werdenden Präferenzen*

Auf Robustheit bei Mehrfachzielsetzung hinsichtlich iterativer Verfahren soll im Rahmen dieser Arbeit nur insofern eingegangen werden, als dass sowohl die Verfahren bei a priori als auch die Verfahren bei a posteriori Integration der Präferenzen des Entscheiders in enger Abstimmung mit dem Entscheider durchgeführt werden sollten. So können etwa Anspruchsniveaus iterativ angehoben oder gesenkt werden bzw. die verschiedenen Robustheitsarten nacheinander mit Hilfe von Trade-Off-Kurven visualisiert werden, wobei der Entscheider nach jeder visualisierten Beziehung das dementsprechende Gewicht festlegen muss.

Im folgenden Abschnitt werden exemplarisch einige der vorgestellten Ersatzmodelle zur Erzeugung robuster Lösungen auf das in Kapitel 3 entwickelte Modell zum Supply Chain Design übertragen. Dabei wird in einem ersten Schritt die einzelne Zielsetzung der Maximierung des gesamten Deckungsbeitrags betrachtet. Darauf aufbauend werden die in Kapitel 4 entwickelten, quantifizierten Zielsetzungen zur erweiterten Auswahl der Schlüsselzulieferer in das Supply Chain Design integriert und im Hinblick auf die in diesem Kapitel entwickelten Ersatzmodelle zur Erzeugung zielrobuster Lösungen erweitert.

<sup>144</sup> Die Ausprägungen der dargestellten Trade-Off-Kurven sind an die errechneten Trade-Off-Kurven des Abschnitts 6.3.5 angelehnt und werden dort erläutert.

## 5.5 Robustheit im Supply Chain Design

### 5.5.1 Robustheit im Supply Chain Design bei einem Ziel

Bei der Ermittlung eines robusten Supply Chain Design kann die Festlegung der Entscheidungsvariablen in zwei Stufen erfolgen. Als Variablen der ersten Stufe werden die Standorte der Produktionsstätten und Lager sowie die zu beschaffenden Mengen der Rohstoffe von den verschiedenen Zulieferern berücksichtigt. Dabei werden lediglich die Beschaffungsmengen der Rohstoffe berücksichtigt, die für die zu fertigenden Produkte als strategisch anzusehen sind<sup>145</sup> und somit implizit die Auswahl der relevanten Zulieferer auf Basis des Preises der Rohstoffe festlegen.<sup>146</sup> Hinsichtlich der Entscheidungsvariablen wird darüber hinaus in der ersten Stufe die Planung der Kapazitäten der Produktionsstandorte in Form von Kapazitätsmodi, wie in Abschnitt 3.4.2 erläutert, beachtet. Die Unsicherheit wird in Form von Nachfrageszenarien durch den Index  $s = 1, \dots, S$  einbezogen. Zu den Variablen der zweiten Stufe, die an die verschiedenen möglichen Szenarien angepasst werden, zählen die zu produzierenden und transportierenden Mengen der verschiedenen Produkte von den Produktionsstätten über die Warenverteilzentren bzw. Lager bis hin zu den Kunden. Die Variablen der ersten Stufe, ohne den Index  $s$ , sind unabhängig von der Realisation eines Szenarios  $s$  und somit fest. Die Variablen der zweiten Stufe hingegen erhalten einen Wert für jedes mögliche Szenario  $s$ , wobei lediglich ein Szenario in der Realität auftritt und dementsprechend die ermittelten Werte dieser Variablen für die Umsetzung relevant sind. Das mathematische Modell zur Ermittlung der szenariooptimalen Zielfunktionswerte  $GDB_{opt}^s$ , welches dann für jedes der  $S$  Szenarien gelöst werden muss, lautet wie folgt:

#### Indizes und Indexmengen

$c = 1, \dots, C$	zu beliefernden Kunden
$i = 1, \dots, I$	potenziellen Produktionsstandorte
$j = 1, \dots, J$	potenziellen Lagerstandorte <sup>147</sup>
$k = 1, \dots, K$	Modus, in dem ein Standort betrieben wird
$p = 1, \dots, P$	Produkte
$r = 1, \dots, R$	Rohstoffe
$s = 1, \dots, S$	Szenarien
$z = 1, \dots, Z$	Zulieferer

<sup>145</sup> Vgl. zur Klassifizierung von zu beschaffenden Gütern Abschnitt 4.3.

<sup>146</sup> Die Beschaffungsmengen können dennoch kurzfristig angepasst werden, wenn die im Rahmen des Supply Chain Design festgelegten Beschaffungsmengen als Rahmenverträge mit den Zulieferern aufgefasst werden.

<sup>147</sup> Diese Ebene kann an Stelle der Lager auch Warenverteilzentren beinhalten.

**Daten**

$A_{rp}$	Bedarfskoeffizient, Menge des Rohstoffs $r$ , die erforderlich ist, um eine Einheit des Produktes $p$ herzustellen
$B_{pi}$	Kapazitätsinanspruchnahme des Produktionsstandortes $i$ für die Produktion einer Einheit des Produktes $p$
$C_{pj}$	Kapazitätsinanspruchnahme des Lagers $j$ für eine Einheit des Produktes $p$
$D_{pc}^s$	Nachfrage von Kunde $c$ nach Produkt $p$ in Szenario $s$
$FBKP_{ik}$	Fixe Kosten für den Betrieb des Produktionsstandortes $i$ der Kapazität $k$
$FBKL_{jk}$	Fixe Kosten für den Betrieb des Lagers $j$ der Kapazität $k$
$FEKP_{ik}$	Fixe Kosten, die anfallen, wenn am Standort $i$ ein Produktionsstandort der Kapazität $k$ errichtet wird
$FEKL_{jk}$	Fixe Kosten, die anfallen, wenn am Standort $j$ ein Lager der Kapazität $k$ errichtet wird
$KAPZ_{rz}^{\min}$	Mindestbestellmenge des Rohstoffs $r$ bei Zulieferer $z$
$KAPZ_{rz}^{\max}$	Maximale Bestellmenge des Rohstoffs $r$ bei Zulieferer $z$
$KL_k^{\min}$	Mindestauslastung des Lagermodus $k$
$KL_k^{\max}$	Maximalauslastung des Lagermodus $k$
$KP_k^{\min}$	Mindestauslastung des Produktionsmodus $k$
$KP_k^{\max}$	Maximalauslastung des Produktionsmodus $k$
$PR_{pc}$	Preis, den Kunde $c$ für eine Einheit des Produktes $p$ bezahlt
$VBK_{rzi}$	Variable Beschaffungskosten für eine Einheit des Rohstoffs $r$ von Zulieferer $z$ und Lieferung bis zum Produktionsstandort $i$
$VLK_{pj}$	Variable Lagerhaltungs- bzw. Kommissionierkosten für eine Einheit des Produktes $p$ in Lager $j$
$VPK_{pi}$	Variable Produktionskosten für eine Einheit des Produktes $p$ am Standort $i$
$VTKP_{ij}$	Variable Transportkosten von Produktionsstandort $i$ zu Lager $j$
$VTKL_{jc}$	Variable Transportkosten von Lager $j$ zu Kunde $c$

**Entscheidungsvariablen**

$xb_{rzi}$	Menge des Rohstoffs $r$ , die von Zulieferer $z$ an Produktionsstandort $i$ geliefert wird
$xp_{pij}^s$	Menge des Produktes $p$ , die in Szenario $s$ in Produktionsstandort $i$ produziert und zu Lager $j$ transportiert wird
$xl_{pj}^s$	Menge des Produktes $p$ , die in Szenario $s$ von Lager $j$ zu Kunde $c$ transportiert wird

$$y_{pik} = \begin{cases} 1, & \text{falls an Standort } i \text{ ein Produktionsstandort der Kapazität } k \text{ errichtet wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$y_{ljk} = \begin{cases} 1, & \text{falls an Standort } j \text{ ein Lager der Kapazität } k \text{ errichtet wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$y_{rz} = \begin{cases} 1, & \text{falls Rohstoff } r \text{ von Zulieferer } z \text{ beschafft wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Für jedes  $s$  zu lösen:

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J \sum_{c=1}^C x_{pjc}^s \cdot PR_{pc} - \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K (FEKP_{ik} + FBKP_{ik}) \cdot y_{pik} \right. \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (FEKL_{jk} + FBKL_{jk}) \cdot y_{ljk} + \sum_{r=1}^R \sum_{z=1}^Z \sum_{i=1}^I VBK_{rzi} \cdot x_{b_{rzi}} \\ & \left. + \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (VPK_{pi} + VTKP_{ij}) \cdot x_{p_{ij}}^s + \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J \sum_{c=1}^C (VLK_{pj} + VTKL_{jc}) \cdot x_{l_{pjc}}^s \right] \end{aligned} \quad (5.26)$$

$$\text{s. d.} \quad \sum_{z=1}^Z x_{b_{rzi}} \geq \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J A_{rp} \cdot x_{p_{ij}}^s \quad \forall i, r \quad (5.27)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{p_{ij}}^s \geq \sum_{c=1}^C x_{l_{pjc}}^s \quad \forall p, j \quad (5.28)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{l_{pjc}}^s = D_{pc}^s \quad \forall p, c \quad (5.29)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{pik} \leq 1 \quad \forall i \quad (5.30)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{ljk} \leq 1 \quad \forall j \quad (5.31)$$

$$\sum_{k=1}^K KP_k^{\min} \cdot y_{pik} \leq \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P B_{pi} \cdot x_{p_{ij}}^s \leq \sum_{k=1}^K KP_k^{\max} \cdot y_{pik} \quad \forall i \quad (5.32)$$

$$\sum_{k=1}^K KL_k^{\min} \cdot y_{ljk} \leq \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P C_{pj} \cdot x_{l_{pjc}}^s \leq \sum_{k=1}^K KL_k^{\max} \cdot y_{ljk} \quad \forall j \quad (5.33)$$

$$KAPZ_{rz}^{\min} \cdot y_{z_{rz}} \leq \sum_{i=1}^I x_{b_{rzi}} \leq KAPZ_{rz}^{\max} \cdot y_{z_{rz}} \quad \forall r, z \quad (5.34)$$

$$x_{b_{rzi}}, x_{p_{pij}}^s, x_{l_{pjc}}^s \geq 0 \quad \forall c, i, j, p, r, s, z \quad (5.35)$$

$$y_{p_{ik}}, y_{l_{jk}}, y_{z_{rz}} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, k, r, z \quad (5.36)$$

Die Restriktionen (5.27), (5.28), (5.29) und (5.34) entsprechen der Modellierung der Grundstruktur in Abschnitt 3.4.1. Die Zielfunktion (5.26) zur Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags ist eine der Erweiterungen des Abschnitts 3.4.2. Diesem Abschnitt sind ebenfalls die Detaillierung der Entscheidungsvariablen hinsichtlich des Kapazitätsmodus sowie die Restriktionen (5.30) - (5.33) zur Kapazitätsplanung entnommen. Abschließend werden die Materialflussvariablen und die Binärvariablen mit (5.35) und (5.36) definiert.

Für die Ermittlung eines robusten Supply Chain Design werden bei der vorgestellten Zielsetzung der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags die folgenden Ersatzziel-funktionen zur Erzeugung optimalitätsrobuster Lösungen gewählt:

R<sub>1</sub>: Minimierung der maximalen Unterschreitung der szenariooptimalen Zielfunktions-werte (Minimierung des maximalen Bedauerns)

R<sub>2</sub>: Minimierung der maximalen relativen Unterschreitung der szenariooptimalen Ziel-funktionswerte (Minimierung des maximalen relativen Bedauerns)

R<sub>3</sub>: Minimierung der erwarteten relativen Unterschreitung der szenariooptimalen Ziel-funktionswerte (Minimierung des erwarteten relativen Bedauerns)

Der szenariooptimale Gesamtdeckungsbeitrag des Szenarios  $s$  wird mit  $GDB_{opt}^s$  be-zeichnet, der aus der robusten Lösung resultierende Gesamtdeckungsbeitrag in Abhän-gigkeit von den Ausprägungen der szenarioabhängigen Variablen der zweiten Stufe, durch den die Abweichung von den szenariooptimalen Zielfunktionswerten bestimmt wird, mit  $gdb^s$ . Darüber hinaus wird eine Überschreitung des szenariooptimalen Ziel-funktionswertes mit  $u_s^+$  und eine Unterschreitung mit  $u_s^-$  bezeichnet. Die optimalen Zielfunktionswerte  $GDB_{opt}^s$  werden als Daten in das robuste Optimierungsmodell übernommen und eine weitere positive Variable  $\xi$  eingeführt. Dies führt zu folgendem robusten Optimierungsmodell zur Minimierung der maximalen Unterschreitung der Szenariooptima:

$$R_1: \text{Min } \xi \tag{5.37}$$

$$\text{s. d. } \text{GDB}_{\text{opt}}^s + u_s^+ - u_s^- = \text{gdb}^s \quad \forall s \tag{5.38}$$

$$\xi \geq u_s^- \quad \forall s \tag{5.39}$$

$$\begin{aligned} \text{gdb}^s = & \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J \sum_{c=1}^C x_{\text{pjc}}^s \cdot \text{PR}_{\text{pc}} - \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K (\text{FEKP}_{\text{ik}} + \text{FBKP}_{\text{ik}}) \cdot y_{\text{pik}} \right. \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (\text{FEKL}_{\text{jk}} + \text{FBKL}_{\text{jk}}) \cdot y_{\text{1jk}} + \sum_{r=1}^R \sum_{z=1}^Z \sum_{i=1}^I \text{VBK}_{\text{rzi}} \cdot x_{\text{b}_{\text{rzi}}} \\ & + \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\text{VPK}_{\text{pi}} + \text{VTKP}_{\text{ij}}) \cdot x_{\text{p}_{\text{pij}}}^s \\ & \left. + \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J \sum_{c=1}^C (\text{VLK}_{\text{pj}} + \text{VTKL}_{\text{jc}}) \cdot x_{\text{p}_{\text{pjc}}}^s \right] \quad \forall s \tag{5.40} \end{aligned}$$

(5.27) - (5.34) und (5.36) ggf. um  $\forall s$  erweitert

$$x_{\text{b}_{\text{rzi}}}, x_{\text{p}_{\text{pij}}}^s, x_{\text{p}_{\text{pjc}}}^s, u_s^+, u_s^-, \xi \geq 0 \quad \forall r, z, p, i, j, c, s \tag{5.41}$$

$$\text{gdb}^s \in \mathbb{R} \quad \forall s \tag{5.42}$$

Die Restriktion (5.40) entspricht der Zielfunktion (5.26) des Ausgangsmodells und legt jetzt die zur robusten Lösung gehörenden Gesamtdeckungsbeiträge für jedes Szenario fest. Da bei dieser Art der Zielfunktion nur für das bindende Szenario, d. h. für das Szenario, bei dem  $u_s^-$  maximal wird, der zugehörige maximal erreichbare Gesamtdeckungsbeitrag festgelegt wird, müssen auf Basis der Entscheidungen der ersten Stufe die Entscheidungen der zweiten Stufe ermittelt werden, die den Gesamtdeckungsbeitrag der verbleibenden Szenarien maximieren. Bei Bekannt werden der Nachfrage können dann die auf der Grundlage der Entscheidungen der ersten Stufe optimalen Entscheidung der zweiten Stufe realisiert werden. Für die Anwendung der Ersatzzielfunktion  $R_2$  muss bei der Ermittlung einer robusten Lösung, welche die maximale relative Unterschreitung minimiert, Restriktion (5.39) durch Restriktion (5.43) ersetzt werden:

$$\xi \geq \frac{u_s^-}{\text{GDB}_{\text{opt}}^s} \quad \forall s \tag{5.43}$$

Für die Minimierung der erwarteten relativen Unterschreitung der szenariooptimalen Gesamtdeckungsbeiträge sind zusätzlich Eintrittswahrscheinlichkeiten  $P_s$  für die ver-

schiedenen Nachfrageszenarien erforderlich. Sind keine szenariospezifischen Eintrittswahrscheinlichkeiten ermittelbar, so ist davon auszugehen, dass alle Szenarien gleichwahrscheinlich sind. Die Hilfsvariable  $\xi$  und Restriktion (5.39) sind nicht erforderlich, die Zielfunktion für  $R_3$  lautet dann:

$$\text{Min} \sum_{s=1}^S P_s \cdot \frac{u_s^-}{\text{GDB}_{\text{opt}}^s} \quad (5.44)$$

Die Ergebnisrobustheit wird nicht in die Zielfunktion integriert, da diese je nach Datenstruktur in einem Zielkonflikt zur Optimalitätsrobustheit steht. Dennoch können die aus einem robusten Optimierungsmodell resultierenden Zielfunktionswerte der verschiedenen Szenarien hinsichtlich der Ergebnisrobustheit ex post untersucht werden, was exemplarisch in Kapitel 6 gezeigt wird.

Hinsichtlich der Zulässigkeitsrobustheit werden einerseits Kompensationsmöglichkeiten berücksichtigt, d. h. Unzulässigkeiten mit Strafkosten in die Zielfunktion integriert und andererseits Chance-Constrained-Restriktionen mit unterschiedlichen Mindestwahrscheinlichkeiten verwendet.<sup>148</sup> Für die Berücksichtigung der Strafkosten ist eine zusätzliche Entscheidungsvariable  $v_{\text{spc}}^-$  erforderlich, welche die unbefriedigte Nachfrage des Kunden  $c$  hinsichtlich Produkt  $p$  in Szenario  $s$  angibt, sowie ein ggf. produkt- und/oder kundenspezifischer Strafkostensatz  $SK$ . Bei der Erzeugung robuster Lösungen werden diese Strafkosten dann in den szenariospezifischen Gesamtdeckungsbeiträgen berücksichtigt, so dass die Abweichung von den szenariooptimalen Gesamtdeckungsbeiträgen ggf. um diese Strafkosten vergrößert wird. Restriktion (5.40), die zur Ermittlung der aus der robusten Lösung resultierenden Gesamtdeckungsbeiträge dient, muss durch Restriktion (5.45) und die Nachfragerestriktion (5.29) durch (5.46) ersetzt werden.

$$\begin{aligned} \text{gdb}^s = & \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J \sum_{c=1}^C x_{\text{pj}c}^s \cdot \text{PR}_{\text{pc}} - \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K (\text{FEKP}_{\text{ik}} + \text{FBKP}_{\text{ik}}) \cdot y_{\text{pik}} \right. \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (\text{FEKL}_{\text{jk}} + \text{FBKL}_{\text{jk}}) \cdot y_{\text{jk}} + \sum_{r=1}^R \sum_{z=1}^Z \sum_{i=1}^I \text{VBK}_{\text{rzi}} \cdot x_{\text{b}rzi} \\ & + \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\text{VPK}_{\text{pi}} + \text{VTKP}_{\text{ij}}) \cdot x_{\text{p}ij}^s \\ & \left. + \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J \sum_{c=1}^C (\text{VLK}_{\text{pj}} + \text{VTKL}_{\text{jc}}) \cdot x_{\text{pj}c}^s \right] - SK \cdot \sum_{p=1}^P \sum_{c=1}^C v_{\text{spc}}^- \quad \forall s \end{aligned} \quad (5.45)$$

<sup>148</sup> Vgl. zur Verwendung von Chance-Constraints zur Gewährleistung der Zulässigkeitsrobustheit Scholl (2001), S. 233ff.



$$\sum_{j=1}^J x_{pjcs}^s = D_{pc}^s - v_{spc}^- \quad \forall p, c, s \quad (5.46)$$

Für die zweite Art der Berücksichtigung von Unzulässigkeiten in Form von Chance-Constrained-Restriktionen ist eine vorgegebene Mindestwahrscheinlichkeit  $\alpha$ , mit der die Nachfrage erfüllt werden muss, sowie eine zusätzliche Binärvariable  $\text{bin}^s$ , die den Wert eins annimmt, wenn die Nachfrage in Szenario  $s$  vollständig erfüllt wird, erforderlich. Der Term, der die Strafkosten in die Zielfunktion (5.45) integriert, entfällt. Stattdessen müssen die folgenden Restriktionen zusätzlich im Modell beachtet werden:

$$\sum_{p=1}^P \sum_{c=1}^C v_{spc}^- \leq M \cdot (1 - \text{bin}^s) \quad \forall s \quad (5.47)$$

$$\sum_{s=1}^S P^s \cdot \text{bin}^s \geq \alpha \quad (5.48)$$

Restriktion (5.47) stellt sicher, dass die gesamte unbefriedigte Nachfrage des Szenarios  $s$  den Wert null annimmt, wenn die Binärvariable  $\text{bin}^s$  den Wert eins annimmt. Restriktion (5.48) gewährleistet dann, dass ausreichend viele der Binärvariablen den Wert eins annehmen, so dass die Mindestwahrscheinlichkeit  $\alpha$ , mit der die Nachfrage erfüllt sein muss, erreicht wird.

Nachdem in diesem Abschnitt die Modellierung der verschiedenen Ersatzmodelle, die zur Ermittlung eines robusten Supply Chain Design bei der einzelnen Zielsetzung der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags vorgestellt wurden, wird im nachfolgenden Abschnitt das Vorgehen zur Ermittlung eines robusten Supply Chain Design bei mehreren relevanten wirtschaftlichen Zielsetzungen im Rahmen der erweiterten Zuliefererauswahl näher betrachtet. Dafür werden die in Abschnitt 5.4.2 entwickelten Modelle zur Erzeugung zielrobuster Lösungen auf das Supply Chain Design mit erweiterter Zuliefererbewertung, welches in Kapitel 4 entwickelt wurde, angewandt.

### 5.5.2 Robustheit im Supply Chain Design bei Mehrfachzielsetzung

Zur Ermittlung eines robusten Supply Chain Design wurde bisher als alleinige wirtschaftliche Zielsetzung die Maximierung des erzielbaren Gesamtdeckungsbeitrags angestrebt. Die Auswahl der Zulieferer erfolgte dabei implizit auf Basis der Kosten für die Rohstoffe. Insbesondere im Rahmen der langfristigen Zusammenarbeit mit Schlüsselzulieferern ist jedoch eine sorgfältige Auswahl dieser Zulieferer nicht nur auf Basis der Kosten geboten. Aus den dafür entwickelten Zielsetzungen wird jetzt exemplarisch

eine zusätzliche aggregierte Bewertung der Zulieferer, die beispielsweise mit AHP ermittelt werden kann, in die Bestimmung eines robusten Supply Chain Design integriert.<sup>149</sup> Dabei wird die jeweilige Bewertung eines Zulieferers  $AB_z$  mit den von diesem Zulieferer bezogenen Mengen multipliziert, um zu gewährleisten, dass zwei Zulieferer mit geringer Kapazität und guter Bewertung einem Zulieferer mit großer Kapazität und schlechter Bewertung vorgezogen werden. Die Bewertung eines Zulieferers ist umso besser, je größer die Bewertung  $AB_z$  ist, dementsprechend ist die Zielfunktion (5.49) zu maximieren. Um die Optimalitätsrobustheit dieser zweiten Zielfunktion erfassen zu können, muss auch hier zunächst für jedes Szenario die optimale Lösung bestimmt werden:

$$\text{Max} \sum_{z=1}^Z AB_z \cdot \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^I x b_{rzi} \quad (5.49)$$

s. d. (5.27) - (5.36)

Die szenariooptimale Gesamtbewertung der Zulieferer wird mit  $GBZ_{\text{opt}}^s$  bezeichnet, die mit einer robusten Lösung verbundene Gesamtbewertung mit  $gbz$ . Ein Index  $s$  ist hier nicht erforderlich, da die Gesamtbewertung der Zulieferer lediglich von den beschafften Mengen der verschiedenen Rohstoffe abhängt und damit annahmegemäß von den szenariospezifischen Realisierungen der zweiten Stufe unabhängig ist. Die szenariooptimalen Werte der Gesamtbewertung  $GBZ_{\text{opt}}^s$  und des Gesamtdeckungsbeitrags  $GDB_{\text{opt}}^s$  werden als Daten in das robuste Optimierungsmodell übernommen. Darauf basierend können bei a priori bekannten Präferenzen des Entscheiders folgende in Abschnitt 5.4.2 hergeleitete Ansätze zur Erzeugung eines robusten Supply Chain Design herangezogen werden:

1. Die Optimalitätsrobustheit hinsichtlich des Gesamtdeckungsbeitrags als Zielfunktion und die Optimalitätsrobustheit der Gesamtbewertung der Zulieferer als Anspruchsniveau
2. Die simultane Minimierung der relativen Abweichungen von den szenariooptimalen Werten beider Zielfunktionen
3. Gewichtung der Optimalitätsrobustheit beider Zielsetzungen

<sup>149</sup> Vgl. zu den Zielsetzungen einer fundierten Zuliefererauswahl Abschnitt 4.4.

*Anspruchsniveau*

Die Zulässigkeitsrobustheit hinsichtlich der Erfüllung der Nachfrage wird auf die gleiche Art in die Modelle integriert wie im vorherigen Abschnitt bei lediglich einer wirtschaftlichen Zielsetzung, d. h. einerseits in Form von Strafkosten, die den Gesamtdeckungsbeitrag schmälern und andererseits durch Chance-Constraints. Das Optimierungsmodell zur Erzeugung einer robusten Lösung, welches die Optimalitätsrobustheit der Gesamtbewertung der Zulieferer als Anspruchsniveau erfasst, lautet wie folgt:

$$\text{Min } \xi^1 \quad (5.50)$$

$$\text{s. d. } \text{GDB}_{\text{opt}}^s + u_s^{1+} - u_s^{1-} = \text{gdb}^s \quad \forall s \quad (5.51)$$

$$\text{GBZ}_{\text{opt}}^s + u_s^{2+} - u_s^{2-} = \text{gbz} \quad \forall s \quad (5.52)$$

$$\text{gbz} = \sum_{z=1}^Z \text{AB}_z \cdot \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^I \text{xb}_{rzi} \quad (5.53)$$

$$\begin{aligned} \xi^1 &\geq u_s^{1-} \quad \forall s \\ \text{oder } \xi^1 &\geq \frac{u_s^{1-}}{\text{GDB}_{\text{opt}}^s} \quad \forall s \end{aligned} \quad (5.54)$$

$$\text{oder } \xi^1 = \sum_{s=1}^S \text{P}_s \cdot \frac{u_s^{1-}}{\text{GDB}_{\text{opt}}^s}$$

$$\begin{aligned} \xi^2 &= u_s^{2-} \geq \text{AN}^2 \quad \forall s \\ \text{oder } \xi^2 &= \frac{u_s^{2-}}{\text{GBZ}_{\text{opt}}^s} \geq \text{AN}^2 \quad \forall s \end{aligned} \quad (5.55)$$

$$\text{oder } \xi^2 = \sum_{s=1}^S \text{P}_s \cdot \frac{u_s^{2-}}{\text{GBZ}_{\text{opt}}^s} \geq \text{AN}^2$$

(5.27) - (5.34), (5.36) und (5.45) ggf. um  $\forall s$  erweitert

$$\text{xb}_{rzi}, \text{xp}_{pij}^s, \text{x}_{pic}^s, u_s^{1+}, u_s^{1-}, u_s^{2+}, u_s^{2-}, \xi^1, \xi^2, \text{gbz} \geq 0 \quad \forall r, z, p, i, j, c, s \quad (5.56)$$

$$\text{gdb}^s \in \mathbb{R} \quad \forall s \quad (5.57)$$

Die in (5.50) dargestellte Zielfunktion minimiert dann in Kombination mit einer der Restriktionen (5.54) die Optimalitätsrobustheit hinsichtlich der Zielsetzung der Maxi-

mierung des Gesamtdeckungsbeitrags. Da es sich bei dem Gesamtdeckungsbeitrag um eine zu maximierende Zielfunktion handelt, wird in Restriktion (5.54) die Unterschreitung und somit die negative Abweichung von den szenariooptimalen Gesamtdeckungsbeiträgen betrachtet. Die Gesamtbewertung der Zulieferer ist ebenfalls zu maximieren, da die Bewertung  $AB_z$  der Zulieferer definitionsgemäß umso besser ist, je größer dieser Wert ist, so dass in Restriktion (5.55) ebenfalls die negative Abweichung berücksichtigt werden muss.<sup>150</sup> Die Optimalitätsrobustheit der Zielsetzung der erweiterten Zuliefererbewertung wird dann mit einer der Restriktionen (5.55) und einem festzulegenden Anspruchsniveau  $AN$  erfasst. Der aus der robusten Lösung resultierende Gesamtdeckungsbeitrag eines Szenarios  $s$  kann je nach Kosten- und Erlösstruktur positive oder negative Werte annehmen, ist folglich  $\in \mathbb{R}$ . Im Gegensatz dazu muss die gesamte Bewertung der Zulieferer  $gbz$  als Summe der Produkte aus Beschaffungsmenge und Zuliefererbewertung  $AB_z$  bei einer normierten Bewertung  $AB_z$ , die für jeden Zulieferer einen Wert zwischen null und eins annimmt, positiv oder null sein. Aus den hier aufgezeigten drei verschiedenen Arten der Erfassung der Optimalitätsrobustheit resultieren bereits neun verschiedene Modelle zur Erzeugung einer zielrobusten Lösung. Ist darüber hinaus noch die Zulässigkeitsrobustheit mit verschiedenen Strafkostensätzen in der Restriktion (5.45) oder mit verschiedenen Zulässigkeitswahrscheinlichkeiten durch Chance-Constraints zu berücksichtigen, so resultieren aus diesem Ansatz bei drei Strafkostensätzen und zwei Zulässigkeitswahrscheinlichkeiten  $9 \cdot 5 = 45$  zu lösende Modelle. Aus diesem Grund sind hier neben der Festlegung des Anspruchsniveaus Informationen über die Risikoeinstellung des Entscheiders bzw. die Präferenzen hinsichtlich der Art der Integration der Robustheit wünschenswert. Andererseits ist die Konfiguration der Supply Chain dem strategischen Supply Chain Management zuzuordnen<sup>151</sup> und somit auf Grund der Bedeutung und des langfristigen Planungshorizonts ein erhöhter Aufwand und ein Vergleich verschiedener generierter Lösungen zu rechtfertigen.<sup>152</sup>

### *Simultane relative Abweichungen*

Ein weiterer Ansatz zur Erzeugung zielrobuster Lösungen ist die simultane Berücksichtigung gleicher maximaler relativer Abweichungen. Dabei wird, wie in (5.58) -

<sup>150</sup> Es ist jedoch zu beachten, dass eine auf diese Weise ermittelte Bewertung der Zulieferer als zu maximierende Zielfunktion dazu führen kann, dass mehr als die erforderlichen Rohstoffe beschafft werden, wenn das Anspruchsniveau zu hoch gewählt wird. An dieser Stelle ist zu empfehlen, die Zielfunktion der erweiterten Zuliefererbewertung in eine zu minimierende Zielfunktion zu transformieren, so dass eine Erhöhung der Beschaffungsmengen keine verbesserte Bewertung zur Folge hat. Dies kann in ähnlicher Form ebenfalls für die simultane relative Abweichung gelten, sofern die Rohstoffpreise im Vergleich zu den weiteren Kosten niedrig sind. Vgl. ebenfalls Abschnitt 6.3.1.

<sup>151</sup> Vgl. Abschnitt 2.1.

<sup>152</sup> Ein strukturiertes Vorgehen zum Vergleich verschiedener generierter Lösungen sowie die Diskussion, anhand welcher Maße die Robustheit der unterschiedlichen Lösungen analysiert werden kann und ab wann eine Lösung als robust zu bezeichnen ist, wird in Kapitel 6 ausführlich aufgezeigt.

(5.60) dargestellt, gefordert, dass die maximale relative Abweichung jeder Zielfunktion von den szenariooptimalen Werten minimiert wird. Es liegt die Annahme zu Grunde, dass es letztlich irrelevant ist, welche Zielfunktion die maximale relative Abweichung determiniert.

$$\text{Min } \xi \quad (5.58)$$

$$\text{s. d. } \xi \geq \frac{u_s^{1-}}{\text{GDB}_{\text{opt}}^s} \quad \forall s \quad (5.59)$$

$$\xi \geq \frac{u_s^{2-}}{\text{GBZ}_{\text{opt}}^s} \quad \forall s \quad (5.60)$$

Es ist des Weiteren möglich, an Stelle der maximalen relativen Abweichung die erwartete relative Abweichung zu betrachten und auf diese Weise die maximale erwartete relative Abweichung für beide Zielfunktionen simultan zu minimieren:

$$\text{Min } \xi \quad (5.61)$$

$$\text{s. d. } \xi \geq \sum_{s=1}^S P_s \cdot \frac{u_s^{1-}}{\text{GDB}_{\text{opt}}^s} \quad (5.62)$$

$$\xi \geq \sum_{s=1}^S P_s \cdot \frac{u_s^{2-}}{\text{GBZ}_{\text{opt}}^s} \quad (5.63)$$

Eine simultane Minimierung des maximalen absoluten Bedauerns beider Zielsetzungen ist auf Grund der unterschiedlichen Dimensionen der szenariooptimalen Zielfunktionswerte an dieser Stelle nicht sinnvoll und bleibt daher unberücksichtigt.

### *Gewichtung*

Ein weiteres Vorgehen, welches neben den schwankenden Anspruchsniveaus insbesondere im Rahmen der a posteriori Betrachtung der Präferenzen des Entscheiders in Frage kommt, ist die Gewichtung der einzelnen Ersatzzielfunktionen zur Erfassung der Optimalitätsrobustheit hinsichtlich der Zielsetzung der Gesamtdeckungsbeitragsmaximierung und hinsichtlich der Zielsetzung der erweiterten Zuliefererbewertung. Ein Zielgewichtungsmodell mit Integration der Zulässigkeitsrobustheit durch Strafkosten durch Restriktion (5.45), welches die maximale relative Abweichung von den szenariooptimalen Werten minimiert, lautet wie folgt:

$$\text{Min } \beta^1 \cdot \xi^1 + \beta^2 \cdot \xi^2 \quad (5.64)$$

$$\text{s. d. } \text{GDB}_{\text{opt}}^s + u_s^{1+} - u_s^{1-} = \text{gdb}^s \quad \forall s \quad (5.65)$$

$$\text{GBZ}_{\text{opt}}^s + u_s^{2+} - u_s^{2-} = \text{gbz} \quad \forall s \quad (5.66)$$

$$\text{gbz} = \sum_{z=1}^Z \text{AB}_z \cdot \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^I \text{xb}_{\text{rzi}} \quad (5.67)$$

$$\xi^1 \geq \frac{u_s^{1-}}{\text{GDB}_{\text{opt}}^s} \quad \forall s \quad (5.68)$$

$$\xi^2 \geq \frac{u_s^{2-}}{\text{GBZ}_{\text{opt}}^s} \quad \forall s \quad (5.69)$$

$$\text{xb}_{\text{rzi}}, \text{xp}_{\text{pij}}^s, \text{xl}_{\text{pjc}}^s, u_s^{1+}, u_s^{1-}, u_s^{2+}, u_s^{2-}, \xi^1, \xi^2, \text{gbz} \geq 0 \quad \forall r, z, p, i, j, c, s \quad (5.70)$$

(5.27) - (5.34), (5.36), (5.42) und (5.45) ggf. um  $\forall s$  erweitert

Da die Zielgewichte die Austauschraten zwischen den verschiedenen Ersatzzielfunktionswerten für die Optimalitätsrobustheit der beiden Zielfunktionen angeben, ist hier die Verwendung des absoluten Bedauerns auf Grund der verschiedenen Einheiten der Zielfunktionen ebenfalls kritisch zu sehen.

Im folgenden Kapitel werden die vorgestellten und entwickelten Ersatzmodelle zur Erzeugung robuster Lösung bei einfacher und mehrfacher Zielsetzung auf eine Anwendung zur Konfiguration einer Supply Chain übertragen. Zunächst werden die verschiedenen Ersatzmodelle bei einer Zielsetzung angewandt und hinsichtlich ihrer Performance bei Zulässigkeits-, Optimalitäts- und Ergebnisrobustheit analysiert. Darauf basierend wird eine Konfiguration der Supply Chain für die an die Realität angelehnte Problemstellung vorgeschlagen. Daran anschließend werden die Ergebnisse der entwickelten Ersatzmodelle zur Erzeugung robuster Lösungen bei Mehrfachzielsetzung und a priori bekannten Präferenzen des Entscheiders diskutiert und analysiert sowie ebenfalls eine robuste Konfiguration der Supply Chain vorgestellt. Abschließend wird der Trade-Off hinsichtlich der Robustheit der verschiedenen wirtschaftlichen Zielsetzungen bei variierenden Anspruchsniveaus und Zielgewichten visualisiert und auf diese Weise exemplarisch ein Vorgehen bei a posteriori Integration der Präferenzen des Entscheiders dargestellt.

## 6 Anwendung zur Konfiguration einer robusten Supply Chain

### 6.1 Darstellung der Problemstruktur

#### 6.1.1 Ausgangssituation

Das hier vorgestellte Beispiel zum robusten Supply Chain Design basiert auf den realen Gegebenheiten einer Unternehmung aus dem Bereich Mess- und Regeltechnik. Ziel des vorliegenden Planungsproblems ist es, die Struktur der Supply Chain für die zu fertigenden Produkte festzulegen, so dass für alle betrachteten Nachfrageszenarien möglichst hohe Gesamtdeckungsbeiträge erzielbar sind (Optimalitätsrobustheit) und möglichst wenig Nachfrage unerfüllt bleibt (Zulässigkeitsrobustheit). Hinsichtlich der Standortwahl der Produktionsstätten und Lager stehen, wie in Abbildung 6.1 in Anlehnung an die reale räumliche Struktur dargestellt, jeweils fünf potenzielle Standorte zur Verfügung. Die Kunden sind zu Absatzgebieten, durch die gestrichelten Linien angedeutet, aggregiert. Die Transportkosten werden in Abhängigkeit von den Entfernungen von einem Lager zu dem jeweiligen Nachfrageschwerpunkt eines Absatzgebietes erfasst und durch die nummerierten Kreise dargestellt.<sup>1</sup>

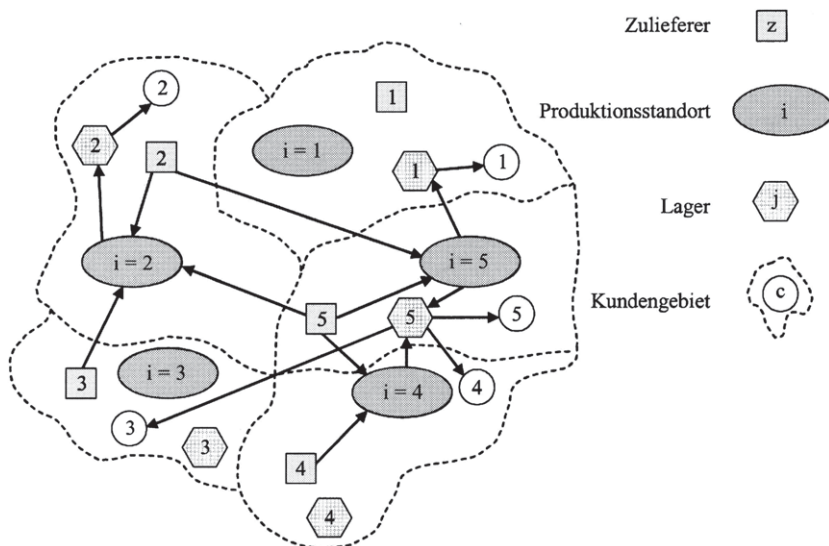


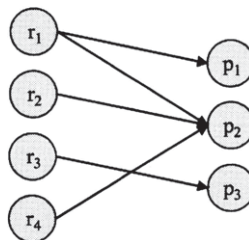
Abbildung 6.1: Darstellung einer möglichen Supply Chain<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Vgl. zur Aggregation von Daten und Entscheidungsvariablen etwa Thorn (2002), S. 73ff.

<sup>2</sup> Zur Visualisierung der Lösungen der nachfolgend durchgeführten Berechnungen in Bezug auf die realen räumlichen Gegebenheiten wird im Folgenden diese Abbildung verwendet. Nicht gewählte Zulieferer, Produktionsstandorte und Lager werden dann aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

Die in Abbildung 6.1 beispielhaft aufgezeigte Struktur einer Supply Chain umfasst die Belieferung durch die Zulieferer 2, 3, 4 und 5, die Produktion an den Standorten 2, 4 und 5 sowie die Belieferung der verschiedenen Kundengebiete ausgehend von den Lagern 1, 2 und 5. Die Transporte zwischen den verschiedenen Ebenen der Supply Chain sind durch Pfeile kenntlich gemacht.

Die Produktionsstätten und Lager können in jeweils 18 verschiedenen Kapazitätsmodi betrieben werden, die sich durch minimale und maximale Produktions- bzw. Lagermengen sowie durch die Fixkosten für die Errichtung und den Betrieb unterscheiden. Ursächlich für die Kosten der verschiedenen Modi sind die Automatisierungsgrade der Anlagen sowie Anzahl und Qualifikation der Mitarbeiter. Die maximal produzierbare Menge kann aus der Zeit, die ein Mitarbeiter benötigt, um ein Produkt zu fertigen, sowie der Gesamtarbeitszeit eines Mitarbeiters je Zeitperiode ermittelt werden. Die Gesamtarbeitszeit kann um länder- bzw. standortspezifische Pausen-, Urlaubs- und Feiertagszeiten sowie durchschnittliche Krankentage bereinigt werden. Darüber hinaus kann die Kapazität durch die Anzahl der Schichten und Arbeitstage, an denen ein Standort betrieben wird, beeinflusst werden. Die im Rahmen der strategischen Ausrichtung des Supply Chain Design zu betrachtenden vier Rohstoffe gehen, wie in Abbildung 6.2 dargestellt, in die Endprodukte ein. Die Produktionskoeffizienten sind bei der hier vorliegenden Produktionsstruktur und den zu betrachtenden Rohstoffen jeweils eins. Bei den weiteren für die Produktion benötigten Inputfaktoren handelt es sich um unkritische Güter, die im Supply Chain Design nicht explizit zu betrachten sind.<sup>3</sup>



**Abbildung 6.2: Darstellung der Produktionsstruktur**

Für die Belieferung mit Rohstoffen stehen fünf Zulieferer zur Verfügung, die in einem ersten Schritt lediglich anhand des Preises für die jeweiligen Rohstoffe bewertet und ausgewählt werden. Diese fünf als relevant charakterisierten Zulieferer weisen die folgenden unterschiedliche Mindestbestellmengen und maximalen Bestellmengen in dem betrachteten Zeitabschnitt für die Rohstoffe  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  und  $r_4$  auf:

<sup>3</sup> Vgl. zur Unterscheidung der Inputfaktoren und einer Analyse ihrer Relevanz im Supply Chain Design Kapitel 4.



	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$		$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$
Zulieferer 1	10.000	10.000	10.000	10.000	Zulieferer 1	75.000	75.000	75.000	25.000
Zulieferer 2	0	0	10.000	10.000	Zulieferer 2	0	0	100.000	100.000
Zulieferer 3	500	500	500	500	Zulieferer 3	25.000	25.000	25.000	25.000
Zulieferer 4	0	0	7.500	7.500	Zulieferer 4	0	0	50.000	50.000
Zulieferer 5	7.500	7.500	0	0	Zulieferer 5	50.000	50.000	0	0

Tabelle 6.1a: Mindestbestellungen

Tabelle 6.1b: Maximale Bestellmengen

Wie in Tabelle 6.1a und Tabelle 6.1b dargestellt, stehen nicht alle Zulieferer für jeden Rohstoff zur Verfügung. So können etwa die Zulieferer 2 und 4 lediglich die Rohstoffe  $r_3$  und  $r_4$  bereitstellen. Die Mindestbestellungen schwanken von 500 Einheiten bei Zulieferer 3 bis hin zu 10.000 Einheiten bei Zulieferer 1 und 2. Die in Tabelle 6.2 angegebenen Kosten für die Beschaffung einer Einheit der Rohstoffe  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  und  $r_4$  beinhalten den Transport bis zu den verschiedenen potenziellen Produktionsstandorten, angegeben mit  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_4$  und  $I_5$ . Hinsichtlich der Preisstruktur der Zulieferer weisen Zulieferer 1 und 5 für die Rohstoffe  $r_1$  und  $r_2$  die niedrigsten Preise auf, während für die Rohstoffe  $r_3$  und  $r_4$  Zulieferer 2 die niedrigsten Preise hat.

$r_1$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$
Zulieferer 1	1	2	3	4	2
Zulieferer 2	-	-	-	-	-
Zulieferer 3	6	4	3	4	5
Zulieferer 4	-	-	-	-	-
Zulieferer 5	2	3	4	2	1

$r_2$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$
Zulieferer 1	2	3	4	5	3
Zulieferer 2	-	-	-	-	-
Zulieferer 3	7	5	4	5	6
Zulieferer 4	-	-	-	-	-
Zulieferer 5	3	4	5	3	2

$r_3$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$
Zulieferer 1	2,5	3,5	4,5	5,5	3,5
Zulieferer 2	2,0	1,0	2,0	3,0	4,0
Zulieferer 3	7,5	5,5	4,5	5,5	6,5
Zulieferer 4	4,5	5,5	3,5	2,5	3,5
Zulieferer 5	-	-	-	-	-

$r_4$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$
Zulieferer 1	5	6	7	8	6
Zulieferer 2	2	1	2	3	4
Zulieferer 3	7	5	4	5	6
Zulieferer 4	4	5	3	2	3
Zulieferer 5	-	-	-	-	-

Tabelle 6.2: Rohstoffpreise der Zulieferer

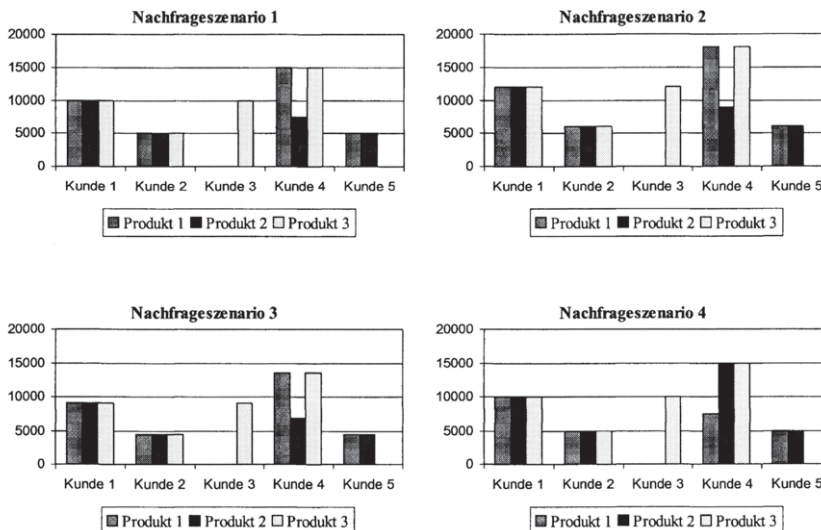
### 6.1.2 Unsicherheit

Die im Supply Chain Design zu berücksichtigenden Daten können auf Grund der Langfristigkeit der Planung vielfältige Unsicherheitsaspekte aufweisen. So können die variablen oder fixen Produktions- bzw. Lagerkosten sowie die Rohstoffpreise oder die Stückdeckungsbeiträge mit Unsicherheit behaftet sein. Die bedeutsamste Form der Unsicherheit umfasst jedoch in der Regel die Nachfrage.<sup>4</sup> Wie in Abbildung 6.3 dargestellt, wird daher im Folgenden die Unsicherheit in Form verschiedener Nachfrage-szenarien berücksichtigt.<sup>5</sup> Diese unterscheiden sich einerseits hinsichtlich der gesam-

<sup>4</sup> Vgl. etwa Muckstadt et al. (2001), S. 434; Scholl (2001), S. 295 sowie die Ausführungen zur Unsicherheit in Abschnitt 5.1.

<sup>5</sup> Zur Entwicklung von Szenarien vgl. Abschnitt 5.2.2.

ten nachgefragten Menge und andererseits hinsichtlich der Struktur der Nachfrage nach den verschiedenen Produkten. So ist in Szenario 2 die Nachfrage jedes Kunden bzw. jeder Kundengruppe<sup>6</sup> nach jedem Produkt um 20% höher als in Szenario 1, es wird von einer optimistischen Nachfrageentwicklung ausgegangen. Bei Szenario 3 wird eine pessimistische Nachfrageentwicklung angenommen, so dass die Nachfrage im Vergleich zu Szenario 1 um 10% reduziert ist. In Szenario 4 ist die über alle Produkte aggregierte Gesamtnachfrage genauso hoch wie in Szenario 1, jedoch wird auf Grund einer Änderung der Zusammensetzung der Kundengruppe 4 eine Verschiebung der Nachfrage von Produkt 1 zu Produkt 2 bei dieser Kundengruppe angenommen.



**Abbildung 6.3: Nachfrageszenarien**

Das Vorgehen für die Berücksichtigung weiterer unsicherer Einflussfaktoren entspricht dem hier exemplarisch vorgestellten Vorgehen bei Nachfrageunsicherheit. So ist beispielsweise Unsicherheit hinsichtlich der variablen Produktionskosten der verschiedenen Standorte denkbar, so dass die Entwicklung verschiedener Kostenszenarien erforderlich ist, die entsprechend mit den Nachfrageszenarien zu kombinieren sind.

Für die Entscheidungsvariablen wird angenommen, dass vor Realisierung der unsicheren Umweltentwicklung in einer ersten Stufe die Festlegung der Standorte und Kapazitäten der Produktionsstätten und Lager sowie die implizite Auswahl der Zulieferer über die Festlegung der Beschaffungsmengen je Zulieferer erfolgen. Die Beschaf-

<sup>6</sup> Die Begriffe Kunde und Kundengruppe werden im Folgenden synonym verwendet, da eine Kundengruppe etwa auch aus einem Großkunden bestehen kann.

fungsmengen müssen bereits in der ersten Stufe festgelegt werden, um eine den Anforderungen entsprechende Produktion und Lieferung zu ermöglichen und können in diesem Zusammenhang ebenfalls als Rahmenverträge aufgefasst werden. In einer zweiten Stufe sind dann die Produktions-, Lager- und Transportmengen bei bekannter Umweltentwicklung, d. h. in Abhängigkeit von der Realisation eines Nachfrageszenarios, festzulegen. Des Weiteren wird angenommen, dass alle Szenarien gleichwahrscheinlich sind, folglich mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,25 eintreten.<sup>7</sup> Die Erlöse werden unabhängig von der Produktart mit 100 Geldeinheiten je Stück angenommen.

## 6.2 Robustheit im Supply Chain Design

### 6.2.1 Verwendete Ersatzmodelle

Aus der Vielfalt der in Kapitel 5 dargestellten Modelle zur Erzeugung robuster Lösungen werden in dem hier vorgestellten Anwendungsfall hinsichtlich der Zulässigkeitsrobustheit Chance-Constrained-Modelle (C) und Kompensationsmodelle (K) betrachtet.

Modell	Zielfunktion
D-Szenario 1	Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags
D-Szenario 2	Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags
D-Szenario 3	Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags
D-Szenario 4	Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags
D-EW	Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags
C-MMB (1)	Minimierung des maximalen Bedauerns
C-MMB (0,75)	Minimierung des maximalen Bedauerns
C-MMRB (1)	Minimierung des maximalen relativen Bedauerns
C-MMRB (0,75)	Minimierung des maximalen relativen Bedauerns
C-MERB (1)	Minimierung des erwarteten relativen Bedauerns
C-MERB (0,75)	Minimierung des erwarteten relativen Bedauerns
K-MMB (200)	Minimierung des maximalen Bedauerns
K-MMB (150)	Minimierung des maximalen Bedauerns
K-MMB (100)	Minimierung des maximalen Bedauerns
K-MMRB (200)	Minimierung des maximalen relativen Bedauerns
K-MMRB (150)	Minimierung des maximalen relativen Bedauerns
K-MMRB (100)	Minimierung des maximalen relativen Bedauerns
K-MERB (200)	Minimierung des erwarteten relativen Bedauerns
K-MERB (150)	Minimierung des erwarteten relativen Bedauerns
K-MERB (100)	Minimierung des erwarteten relativen Bedauerns

Tabelle 6.3: Darstellung der verwendeten Modelle bei einem Ziel

Die Ersatzzielfunktionen, die zur Erzeugung optimalitätsrobuster Lösungen betrachtet werden, umfassen das minimierte maximale Bedauerns (MMB), d. h. die minimierte

<sup>7</sup> Diese Annahme hat keinen Einfluss auf die Anwendbarkeit der verschiedenen Modelle, da eine Lösung mit modifizierten Wahrscheinlichkeiten analog möglich ist. Falls der Entscheider hinsichtlich der Wahrscheinlichkeiten unsicher ist, können verschiedene Lösungen erzeugt werden, um die Auswirkungen der angenommenen Wahrscheinlichkeiten auf die Lösung zu verdeutlichen, oder Sensitivitätsuntersuchungen angeschlossen werden.

maximale Unterschreitung der szenariooptimalen Gesamtdeckungsbeiträge, das minimierte maximale relative Bedauern (MMRB) und das minimierte erwartete relative Bedauern (MERB). Darüber hinaus werden die szenariooptimalen Lösungen sowie zum Vergleich die Lösung eines deterministischen Ersatzmodells auf Basis der Erwartungswerte, kurz deterministisches Erwartungswertmodell, betrachtet. In diesem wird die Nachfrage in den einzelnen Szenarien in Form einer erwarteten Nachfrage aggregiert.

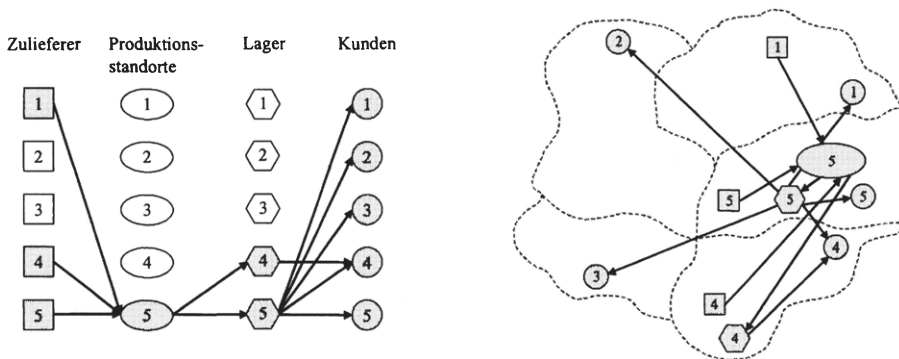
In Tabelle 6.3 werden die Modelle zur Ermittlung und weiteren Auswertung der verschiedenen Lösungen mit den für diese verwendeten Bezeichnungen zusammenfassend dargestellt. Der erste Buchstabe in der Benennung der Modelle steht für die Art des Modells: D für deterministisches Modell, C für Chance-Constrained-Modell und K für Kompensationsmodell. In der Klammer ist hinter den Chance-Constrained-Modellen die geforderte Zulässigkeitswahrscheinlichkeit angegeben, beispielsweise bedeutet 0,75, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,75 die Nachfrage der verschiedenen Szenarien erfüllt sein muss. In der Klammer hinter den Kompensationsmodellen ist die Höhe der Strafkosten angegeben, mit denen jede Einheit der unerfüllten Nachfrage in der Zielfunktion berücksichtigt wird. Die Bestimmung der Lösungen der verschiedenen Modelle zur Ermittlung einer robusten Supply Chain erfolgt mit Unterstützung der Software Xpress-MP 2003 zur Lösung gemischt-ganzzahliger linearer Optimierungsmodelle.<sup>8</sup> Die Modelle zur Ermittlung der szenariooptimalen Zielfunktionswerte umfassen bei der vorliegenden Problemstruktur etwa 250 ganzzahlige und 200 binäre Variablen sowie etwa 160 Restriktionen und haben auf einem Computer mit einem Pentium Prozessor mit 1,8 GHz und 512 MB RAM eine Laufzeit von unter einer Sekunde. Bei den in Tabelle 6.3 dargestellten Ersatzmodellen zur Erzeugung robuster Lösungen sind für die Entscheidung der ersten Stufe je ein gemischt-ganzzahliges mathematisches Modell zu lösen und für die Entscheidungen der zweiten Stufe jeweils vier weitere ganzzahlige Modelle, so dass insgesamt 100 Optimierungsmodelle zu lösen sind.

## 6.2.2 Analyse der szenariooptimalen Ergebnisse

Die Ermittlung optimalitätsrobuster Lösungen erfordert für jedes Szenario die Berechnung der optimalen Lösung, um die Abweichung von diesen szenariooptimalen Zielfunktionswerten im Rahmen der Robustheitsbetrachtungen erfassen zu können. Daher werden in einem ersten Schritt die deterministischen Lösungen der verschiedenen Szenarien

<sup>8</sup> Xpress-MP ist ein Produkt der Dash Optimization und beinhaltet in der Version 2003 das Visualisierungsmodul Xpress-IVE Version 1.14.33, das Modellierungsmodul Xpress Mosel Version 1.2.4 und das Optimierungsmodul Xpress Optimizer Version 14.27. Für einen Überblick über Software zur Modellierung und Lösung mathematischer Modelle vgl. Kallrath (2004).

narien bei vollständiger Erfüllung der jeweiligen Nachfrage errechnet. Die daraus resultierenden Konfigurationen der Supply Chain sind in Abbildung 6.4 bis Abbildung 6.7 dargestellt. Der linke Teil dieser Abbildungen umfasst eine vereinfachte Darstellung der Modelllösung, wobei nicht ausgewählte Zulieferer und Standorte hell angezeichnet werden. Im rechten Teil der Abbildungen wird die Lösung des Modells auf die realen räumlichen Gegebenheiten übertragen, wodurch beispielsweise eine visualisierte Darstellung der Transportbeziehungen und Entfernungen zwischen den verschiedenen Standorten ermöglicht wird.



**Abbildung 6.4: Optimale Supply Chain für Szenario 1**

Die hinsichtlich des Gesamtdeckungsbeitrags optimale Struktur der Supply Chain für das erste Nachfrageszenario ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Dabei ist eine Produktion an Produktionsstandort 5 und eine Belieferung mit Rohstoffen durch die Zulieferer 1, 4 und 5 vorgesehen. Die Kundengruppen werden überwiegend von Lager 5 beliefert, lediglich Kundengruppe 4 wird darüber hinaus ebenfalls von Lager 4 beliefert. Der mit dieser Struktur der Supply Chain verbundene Gesamtdeckungsbeitrag beträgt 4.497.500 GE und resultiert aus Verkaufserlösen von 10.250.000 GE und Kosten von 5.752.500 GE. Die Entscheidungen der ersten Stufe dieser deterministischen Lösung des ersten Szenarios können im Rahmen einer weiteren Analyse auf die anderen Szenarien angewandt werden, d. h., es ist zu ermitteln, welche szenariospezifischen Anpassungen auf der zweiten Stufe für die Szenarien 2, 3 und 4 erforderlich sind, wenn der Entscheider die Beschaffungsmengen und Standorte der Produktionsstätten und Lager sowie die zugehörigen Kapazitätsmodi der optimalen Lösung des ersten Szenarios festlegt. Übertragen auf die reale Problemstellung bedeutet dies, dass der Entscheider davon ausgeht, dass die Nachfrage des Szenarios 1 realisiert wird und er dann einen Gesamtdeckungsbeitrag von 4.497.500 GE realisieren kann. Entspricht die tatsächliche Nachfrage jedoch einem der anderen Szenarien, wird der Entscheider die

Produktions- und Transportmengen so gut wie möglich anpassen, was zu den in Tabelle 6.4 dargestellten Konsequenzen führt.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Gesamtdeckungsbeitrag [GE]	4 497.500	4.556.500	3.627.000	3.852.500
unerfüllte Nachfrage [ME]	0	20.500	0	7.500
auf Lager produzierte Produkte [ME]	0	0	7.750	5.000
zu viel bestellte Rohstoffe [ME]	0	14.000	2.500	2.500

Tabelle 6.4: Mögliche Konsequenzen bei Anwendung der optimalen Lösung Szenario 1

Es zeigt sich, dass bei Realisation der Nachfrage der Szenarien 2 oder 4 trotz Anpassungsmaßnahmen auf der zweiten Stufe unerfüllte Nachfrage auftreten wird. Bei den Szenarien 3 und 4 werden Produkte gefertigt, die zwar nicht abgesetzt werden können, jedoch die geforderte Mindestauslastung des Produktionsmodus gewährleisten. Das simultane Auftreten von unbefriedigter Nachfrage und Überproduktion bei Szenario 4 ist darauf zurückzuführen, dass zwar Rohstoffe zur Produktion von Produkt  $p_1$  zur Verfügung stehen, die unerfüllte Nachfrage jedoch bei Produkt  $p_4$  auftritt. Eine ähnliche Argumentation erklärt das gleichzeitige Auftreten unerfüllter Nachfrage und zu viel bestellter Rohstoffe im zweiten Szenario. Die unerfüllte Nachfrage bezieht sich auf die Produkte  $p_2$  und  $p_3$  mit den für  $p_2$  erforderlichen Rohstoffen  $r_1$ ,  $r_2$  und  $r_4$  sowie dem für  $p_3$  erforderlichen Rohstoff  $r_3$ . Bei den zu viel bestellten Rohstoffen handelt es sich hingegen um 7.000 ME von  $r_2$  und 7.000 ME von  $r_4$ , so dass weder die Fertigung von Produkt  $p_2$  noch von Produkt  $p_3$  möglich ist.

Die aus der optimalen Lösung des deterministischen Modells für Szenario 2 resultierende Supply Chain zeigt Abbildung 6.5.

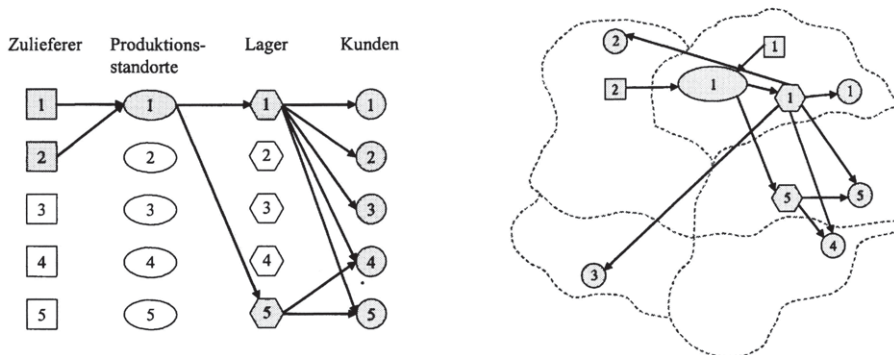


Abbildung 6.5: Optimale Supply Chain für Szenario 2

Im Gegensatz zur optimalen Supply Chain des ersten Szenarios werden bei der optimalen Lösung des zweiten Szenarios die Zulieferer 1 und 2 sowie der Produktions-

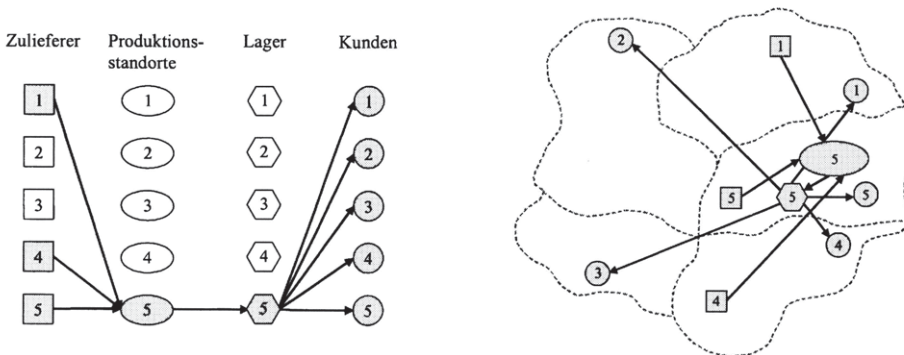
standort 1 und die Lager 1 und 5 ausgewählt. Lediglich der Lagerstandort 5 ist bei beiden Szenarien in der optimalen Konfiguration enthalten. Jedoch wird dieser bei der Konfiguration, die auf Szenario 1 basiert, im Modus 18 betrieben, während hier der Lagermodus 3 festgelegt wird. Alle Kundengruppen werden von Lager 1 beliefert, die Kundengruppen 4 und 5 zusätzlich von Lager 5.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Gesamtdeckungsbeitrag [GE]	3.765.000	5.544.000	2.827.000	3.511.000
unerfüllte Nachfrage [ME]	0	0	0	2.000
auf Lager produzierte Produkte [ME]	17.500	0	27.750	19.500
zu viel bestellte Rohstoffe [ME]	3.000	0	3.000	3.000

**Tabelle 6.5: Mögliche Konsequenzen bei Anwendung der optimalen Lösung Szenario 2**

Die Ergebnisse der szenariospezifischen Anpassungsmaßnahmen auf der zweiten Stufe, die durchgeführt werden, wenn andere Umweltszenarien auftreten, sind in Tabelle 6.5 zusammengefasst. Es ist auffällig, dass alle weiteren Szenarien hohe überschüssige Produktionsmengen aufweisen. Dies liegt in dem hohem Produktionsmodus und damit einer hohen Mindestproduktionsmenge begründet, in dem Produktionsstandort 1 betrieben werden muss, um eine vollständige Erfüllung der hohen Nachfrage des zweiten Szenarios zu ermöglichen. Lediglich bei Realisation des vierten Szenarios tritt unerfüllte Nachfrage auf, dennoch sind die Gesamtdeckungsbeiträge der Szenarien 3 und 4 auf Grund der aus der hohen Überschussproduktion und den zu viel beschafften Rohstoffen resultierenden Produktions- und Beschaffungskosten deutlich unter denen, die bei Umsetzung der Lösung des Szenarios 1 möglich sind.

Eine zu Szenario 1 ähnliche Lösung weist die in Abbildung 6.6 visualisierte Supply Chain bei Lösung des deterministischen Modells mit den nachgefragten Mengen des Szenarios 3 auf.



**Abbildung 6.6: Optimale Supply Chain für Szenario 3**

Die ausgewählten Zulieferer sind in der optimalen Lösung des ersten Szenarios und in der optimalen Lösung des dritten Szenarios die Zulieferer 1, 4 und 5. Der Produktionsstandort 5 ist zwar ebenfalls bei beiden Lösungen festgelegt, wird jedoch bei Szenario 3 auf Grund der geringeren Nachfragemengen in einem geringeren Modus betrieben. Das gleiche gilt für den Lagermodus des Lagers 5, das Lager 4 ist auf Grund der geringen Nachfragemengen nicht erforderlich.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Gesamtdeckungsbeitrag [GE]	4.057.000	4.111.000	4.025.500	3.701.500
unerfüllte Nachfrage [ME]	10.250	30.750	0	14.250
auf Lager produzierte Produkte [ME]	0	0	0	1.750
zu viel bestellte Rohstoffe [ME]	7.000	21.000	0	2.250

Tabelle 6.6: Mögliche Konsequenzen bei Anwendung der optimalen Lösung Szenario 3

Die Auswirkungen einer Planung der Struktur der Supply Chain auf Basis der geringsten Nachfragemengen des dritten Szenarios auf die weiteren möglichen Szenarien sind in Tabelle 6.6 aggregiert erfasst. Es zeigt sich, dass bei Realisation eines anderen Szenarios hohe Fehlmengen, etwa bei dem zweiten Szenario 30.750 ME unerfüllte Nachfrage, auftreten. Dennoch weisen die anderen Szenarien zu viel bestellte Rohstoffe auf, die aus einer Verlagerung der Produktion von Produkt  $p_2$  zu Produkt  $p_1$ , welches einen höheren Deckungsbeitrag als Produkt  $p_2$  aufweist, resultieren. Tendenziell sind die Gesamtdeckungsbeiträge der verschiedenen Szenarien höher als bei der Planung auf Basis der höchsten Nachfragemengen des zweiten Szenarios. Es ist jedoch zu beachten, dass außer den Erlöseffekten weitere negative Effekte auf Grund der hohen unerfüllten Nachfrage, beispielsweise daraus resultierende weitere Nachfrageverluste in späteren Perioden, nicht berücksichtigt sind.

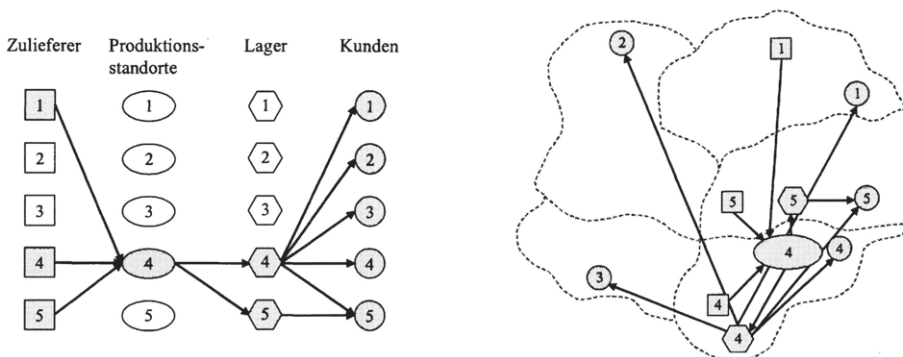


Abbildung 6.7: Optimale Supply Chain für Szenario 4



Die Lösung des deterministischen Modells mit den Nachfragemengen des vierten Szenarios ist in Abbildung 6.7 visualisiert. Die Belieferung mit Rohstoffen erfolgt durch die Zulieferer 1, 4 und 5, die Produktion am Standort 4 und die Lagerung an den Lagern 4 und 5, wobei das Lager 5 lediglich zusätzlich zu Lager 4 die Kundengruppe 5 beliefert und damit der Schwerpunkt auf Lager 4 liegt. Im Gegensatz zur Lösung des Szenarios 3 ist zu beobachten, dass zwar dieselben Zulieferer ausgewählt werden, die Produktion jedoch an einem anderen Standort stattfindet.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Gesamtdeckungsbeitrag [GE]	4.417.500	4.473.000	3.591.000	4.455.000
unerfüllte Nachfrage [ME]	0	20.500	0	0
auf Lager produzierte Produkte [ME]	0	0	7.750	0
zu viel bestellte Rohstoffe [ME]	15.000	4.000	10.500	0

**Tabelle 6.7: Mögliche Konsequenzen bei Anwendung der optimalen Lösung Szenario 4**

Die Auswirkungen der Planung auf Basis des vierten Szenarios bei Realisation anderer Nachfrageszenarien sind einschließlich der möglichen Anpassungsmaßnahmen auf der zweiten Stufe in Tabelle 6.7 dargestellt. Es zeigt sich, dass lediglich bei Szenario 2 mit der größten Nachfrage ein Teil der Nachfrage unerfüllt bleibt. Im Fall des dritten Szenarios wird es wie bei allen betrachteten Ergebnissen, es sei denn die Planung erfolgt auf Basis der Nachfrage des dritten Szenarios, zur Überproduktion kommen, um die Mindestauslastung des Produktionsmodus zu gewährleisten.

Zusammenfassend kann nach Analyse der Ergebnisse der jeweils ein Szenario betrachtenden, deterministischen Modelle zunächst festgehalten werden, dass alle Lösungen über maximal drei verschiedene Zulieferer, einen Produktionsstandort und zwei Lager verfügen. Darüber hinaus wird das Lager in der Nähe des ausgewählten Produktionsstandortes (mit gleicher Nummer) in allen Lösungen ebenfalls als Lagerstandort ausgewählt. Dies ist auf die räumliche Anordnung der Lager und Produktionsstandorte und damit auf die zugehörigen, im Vergleich zu den Lagerkosten relativ hohen Transportkosten zwischen Produktionsstandort und Lager zurückzuführen.

Da die Unsicherheit bei Planungsproblemen in der Praxis häufig vernachlässigt wird und stattdessen eine Planung auf der Basis von erwarteten Werten erfolgt,<sup>9</sup> wird mit dem Ziel, einen Vergleich zwischen der Planung mit Erwartungswerten und der robusten Planung zu ermöglichen, bei den deterministischen Modellen zusätzlich zu den szenariooptimalen Lösungen die Lösung des Modells D-EW mit einer Planung auf Basis der erwarteten Nachfrage betrachtet. Zu diesem Zweck wird aus den gleichwahr-

<sup>9</sup> Vgl. etwa Simchi-Levi/Kaminsky/Simchi-Levi (2003), S. 49. Für Vor- und Nachteile der Planung mit Erwartungswerten vgl. Adam (1996), S. 209ff.; Homburg (2000), S. 605ff. sowie Abschnitt 5.2.1.

scheinlichen Einzelszenarien die erwartete Nachfrage der verschiedenen Produkte ermittelt und erneut eine Lösung des Modells mit diesen erwarteten Nachfragen errechnet. Die Auswirkungen einer Planung auf Basis der erwarteten Nachfragen sind in Tabelle 6.8 dargestellt.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Gesamtdeckungsbeitrag [GE]	4.473.685	4.676.591	3.630.000	4.092.355
unerfüllte Nachfrage [ME]	0	17.937	0	4.937
auf Lager produzierte Produkte [ME]	0	0	7.750	2.437
zu viel bestellte Rohstoffe [ME]	7.689	12.126	5.063	5.063

**Tabelle 6.8: Mögliche Konsequenzen bei Anwendung der optimalen Lösung D-EW**

Eine Planung auf Basis der erwarteten Nachfrage führt zu einer Verschlechterung des Gesamtdeckungsbeitrags im Vergleich zu den jeweiligen szenariooptimalen Werten von mindestens 23.815 GE und maximal 867.409 GE. Bei Realisation der Szenarien 2 und 4 wird darüber hinaus unerfüllte Nachfrage auftreten. Die vollständige Erfüllung der Nachfrage bei den Szenarien 1 und 3 ist auf die spezielle Beziehung der Nachfrageszenarien in dem hier betrachteten Anwendungsfall zurückzuführen, bei dem in Szenario 2 die Nachfrage jeder Kundengruppe 20% höher und in Szenario 3 10% geringer ist als bei Szenario 1. Bei Nachfrageszenarien, die durch starke Nachfrageverschiebungen zwischen den verschiedenen Produkten charakterisiert sind, wird eine Planung auf Basis der erwarteten Nachfrage tendenziell zu deutlich größeren unerfüllten Nachfragen und damit auch zu schlechteren Gesamtdeckungsbeiträgen führen. Des Weiteren zeigt Tabelle 6.8, dass bei jedem möglichen Nachfrageszenario zu viel bestellte Rohstoffe auftreten werden, was die Nachteile einer Planung auf Basis der erwarteten Nachfrage verdeutlicht.

Im Folgenden werden die Ergebnisse aller betrachteten Modelle hinsichtlich ihrer unterschiedlichen Ausprägungen im Hinblick auf die Eignung zur Erzeugung robuster Lösungen analysiert. In den folgenden Auswertungen werden die Höhe der unerfüllten Nachfrage als ein Maß für die Zulässigkeitsrobustheit und die Höhe des erzielbaren Gesamtdeckungsbeitrags, die Höhe der Unterschreitung der szenariooptimalen Werte (Bedauern) sowie die Höhe der relativen Unterschreitung der szenariooptimalen Werte (relatives Bedauern) als Maße für die Optimalitätsrobustheit betrachtet. Die Ergebnisrobustheit wird abschließend durch verschiedene Streuungsmaße hinsichtlich der möglichen Zielfunktionswerte des erzielbaren Gesamtdeckungsbeitrags erfasst.<sup>10</sup> Die überschüssigen Rohstoffe sowie die Überproduktion, die bei den verschiedenen Szenarien im Rahmen der Entscheidungen der zweiten Stufe anfallen, werden im Folgenden

<sup>10</sup> Vgl. zur Verwendung dieser und weiterer Analysemaße im Rahmen der Beurteilung robuster Lösungen Scholl (2001), S. 251ff.

nicht weiter betrachtet, da diese mittels der Beschaffungskosten bzw. mittels der Produktionskosten bereits in den dadurch verminderten Gesamtdeckungsbeiträgen erfasst sind.

### 6.2.3 Bestimmung einer robusten Supply Chain

Das im Folgenden angewandte Vorgehen zur Bestimmung einer robusten Supply Chain beinhaltet nach der Optimierung der einzelnen Modelle die Ermittlung der minimalen, der erwarteten und der maximalen Ausprägungen der verschiedenen Analysemaße. Eine Visualisierung dieser berechneten Werte durch Balkendiagramme erleichtert die folgenden Analysen, die zunächst eine Reduktion der Anzahl der weiter zu betrachtenden Lösungen der verschiedenen Modelle umfassen. Dafür sind solche Lösungen zu identifizieren, die hinsichtlich einzelner Analysemaße unakzeptabel schlechte Ausprägungen aufweisen. Für die verbleibenden Modelle werden nachfolgend die relativen Abweichungen<sup>11</sup> von der besten Ausprägung eines Analysemaßes berechnet, um abschließend anhand zu definierender maximaler erlaubter relativer Abweichungen die als robust zu charakterisierenden Lösungen zu ermitteln.<sup>12</sup>

In Tabelle 6.9, Tabelle 6.10 und Tabelle 6.11 werden die Ergebnisse der verschiedenen Modelle in tabellarischer Form dargestellt. Die unerfüllte Nachfrage ist in Mengeneinheiten angegeben, der Gesamtdeckungsbeitrag und das Bedauern in Geldeinheiten, das relative Bedauern in Prozent. Mit Best wird in der untersten Zeile der beste erzielbare Wert hinsichtlich der verschiedenen Analysemaße dargestellt. Eine Spalte für die minimalen unerfüllten Nachfragen ist nicht erforderlich, da alle Modelle in mindestens einem Nachfrageszenario die Nachfrage vollständig erfüllen.

	unerf. Nachfrage		GDB			Bedauern			rel. Bedauern		
	erw.	max.	erw.	max.	min.	erw.	max.	min.	erw.	max.	min.
D-Szenario 1	7.000	20.500	4.133.375	4.556.500	3.627.000	497.125	987.500	0	10,31%	17,81%	0,00%
D-Szenario 2	<b>500</b>	<b>2.000</b>	3.911.750	<b>5.544.000</b>	2.827.000	718.750	1.198.500	0	16,81%	29,77%	0,00%
D-Szenario 3	13.813	30.750	3.973.750	4.111.000	<b>3.701.500</b>	656.750	1.433.000	0	13,14%	25,85%	0,00%
D-Szenario 4	5.125	20.500	<b>4.234.125</b>	4.473.000	3.591.000	<b>396.375</b>	1.071.000	0	<b>7,97%</b>	19,32%	<b>0,00%</b>
D-EW	5.719	17.937	4.218.158	4.676.591	3.630.000	412.342	<b>867.409</b>	23.815	8,54%	<b>15,65%</b>	0,53%
<b>Best</b>	<b>500</b>	<b>2.000</b>	<b>4.234.125</b>	<b>5.544.000</b>	<b>3.701.500</b>	<b>396.375</b>	<b>867.409</b>	0	<b>7,97%</b>	<b>15,65%</b>	<b>0,00%</b>

Tabelle 6.9: Ergebnisse der deterministischen Modelle bei einem Ziel

Bei den in Tabelle 6.9 dargestellten Lösungen der deterministischen Modelle werden in einem ersten Schritt die jeweiligen szenariooptimalen Lösungen berechnet. Damit

<sup>11</sup> Vgl. zur Verwendung der relativen Abweichung für den Vergleich von Lösungen Scholl (2001), S. 255f.

<sup>12</sup> Die Anzahl der auszuwertenden Lösungen kann im Vorhinein reduziert werden, beispielsweise indem der Entscheider aus betriebswirtschaftlichen Analysen genau einen Strafkostensatz für die Kompensationsmodelle oder eine Zulässigkeitswahrscheinlichkeit für die Chance-Constrained-Modelle angibt. Alternativ kann durch die Angabe von Präferenzen des Entscheiders die Anzahl der Ersatzzielfunktionen reduziert werden.

sind gleichzeitig die Entscheidungen der ersten Stufe festgelegt und darauf basierend die optimalen Entscheidungen der zweiten Stufe für alle weiteren Szenarien zu ermitteln. Ein Vergleich mit Tabelle 6.4, in der die Konsequenzen einer Planung auf Basis der Nachfrage des ersten Szenarios dargestellt sind, zeigt, dass aus dieser Lösung eine maximale unerfüllte Nachfrage von 20.500 ME und folgende erwartete unerfüllte Nachfrage resultiert:

$$0,25 \cdot 0 \text{ ME} + 0,25 \cdot 20.500 \text{ ME} + 0,25 \cdot 0 \text{ ME} + 0,25 \cdot 7.500 \text{ ME} = 7.000 \text{ ME}$$

Diese Werte hinsichtlich der Nachfrage sind ebenfalls der Zeile D-Szenario 1 und der zweiten Spalte der Tabelle 6.9 zu entnehmen. Die möglichen Gesamtdeckungsbeiträge der Tabelle 6.4 weisen einen minimalen Gesamtdeckungsbeitrag von 3.627.000 GE und einen maximalen von 4.556.500 GE auf. Der erwartete Gesamtdeckungsbeitrag einer Planung auf Basis der Nachfrage des ersten Szenarios beträgt 4.133.375 GE, wie in der entsprechenden Zeile und der Spalte „erw. GDB“ der Tabelle 6.9 zu sehen ist. Um das erwartete, minimale und maximale Bedauern zu errechnen sind neben den Gesamtdeckungsbeiträgen der Tabelle 6.4 die szenariooptimalen Zielfunktionswerte der einzelnen Szenarien in Höhe von 4.497.500 GE, 5.544.000 GE, 4.025.500 GE und 4.455.000 GE den jeweiligen Tabellen zu entnehmen. Das Bedauern einer Planung mit der optimalen Lösung des ersten Szenarios beträgt dann für das zweite Szenario  $5.544.000 \text{ GE} - 4.556.500 \text{ GE} = 987.500 \text{ GE}$  und entspricht damit dem maximal möglichen Bedauern. Für das dritte Szenario ist die Abweichung von dem szenariooptimalen Zielfunktionswert und damit das Bedauern  $4.025.500 \text{ GE} - 3.627.000 \text{ GE} = 398.500 \text{ GE}$  und für das vierte Szenario  $4.455.000 \text{ GE} - 3.852.500 \text{ GE} = 602.500 \text{ GE}$ . Für das erwartete Bedauern gilt dann:

$$0,25 \cdot 0 \text{ GE} + 0,25 \cdot 987.500 \text{ GE} + 0,25 \cdot 398.500 \text{ GE} + 0,25 \cdot 602.500 \text{ GE} = 497.125 \text{ GE}$$

Diese Werte des Bedauerns sind ebenfalls in der vierten Spalte der Tabelle 6.9 abzulesen. Entsprechend kann das relative Bedauern als Anteil des absoluten Bedauerns an den szenariooptimalen Zielfunktionswerten errechnet werden und der fünften Spalte der Tabelle 6.9 entnommen werden.

Ein Vergleich der in Tabelle 6.9 dargestellten Ergebnisse der deterministischen Modelle zeigt, dass es bei der hier vorliegenden Problemstruktur hinsichtlich des Gesamtdeckungsbeitrags vorteilhafter ist, eine der deterministischen Einzellösungen der Szenarien im Gegensatz zum Erwartungswertmodell zu realisieren. Lediglich hinsichtlich des maximalen absoluten und relativen Bedauerns weist das Modell D-EW bei den deterministischen Lösungen die besten Ergebnisse auf. Jedoch verdeutlichen die Ergebnisse des minimalen absoluten und relativen Bedauerns, dass die Realisierung einer

Lösung, die auf dem Erwartungswert beruht, bei der vorliegenden Problemstruktur nicht der Realisierung einer der szenariooptimalen Lösung vorzuziehen ist, da mindestens ein Bedauern von 23.815 Einheiten bzw. 0,53% realisiert wird. Zusammengefasst zeigt sich an diesem Beispiel, dass eine Planung mit Hilfe von erwarteten Nachfragen, wie sie in der Praxis häufig vorzufinden ist, im Allgemeinen nicht empfehlenswert ist.

Entsprechend der ausführlich dargestellten Berechnung der Werte der Tabelle 6.9 können die Analysemaße für die Chance-Constrained-Modelle in Tabelle 6.10 ermittelt werden. Definitionsgemäß weisen die Chance-Constrained-Modelle bei einer geforderten Zulässigkeitswahrscheinlichkeit von 1 keine unerfüllte Nachfrage auf. Es zeigt sich jedoch, dass die Modelle mit einer Zulässigkeitswahrscheinlichkeit von 0,75 hinsichtlich des erwarteten und des minimal erreichbaren Gesamtdeckungsbeitrags deutlich bessere Ergebnisse aufweisen als die entsprechenden Modelle mit einer Zulässigkeitswahrscheinlichkeit von 1.

	unerf. Nachfrage		GDB			Bedauern			rel. Bedauern		
	erw.	max.	erw.	max.	min.	erw.	max.	min.	erw.	max.	min.
C-MMB (0,75)	2.446	9.783	4.406.913	5.133.803	3.615.283	223.587	<b>410.217</b>	23.217	4,81%	10,19%	0,52%
C-MMRB (1)	0	0	3.962.250	5.502.000	2.860.000	668.250	1.165.500	42.000	15,61%	28,95%	0,76%
C-MMRB (0,75)	3.087	12.346	4.371.031	4.982.586	<b>3.617.846</b>	259.469	561.414	20.654	5,45%	<b>10,13%</b>	0,46%
C-MERB (1)	0	0	3.960.750	5.496.000	2.860.000	669.750	1.165.500	48.000	15,64%	28,95%	0,87%
C-MERB (0,75)	750	3.000	<b>4.496.125</b>	<b>5.544.000</b>	3.597.500	<b>134.375</b>	428.000	<b>0</b>	<b>3,27%</b>	<b>10,63%</b>	<b>0,00%</b>
<b>Best</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>4.496.125</b>	<b>5.544.000</b>	<b>3.617.846</b>	<b>134.375</b>	<b>410.217</b>	<b>0</b>	<b>3,27%</b>	<b>10,13%</b>	<b>0,00%</b>

**Tabelle 6.10: Ergebnisse der Chance-Constrained-Modelle bei einem Ziel**

Lediglich bei dem eher risikofreudigen Maß des maximal möglichen Gesamtdeckungsbeitrags schneiden die Chance-Constrained-Modelle mit einer Zulässigkeitswahrscheinlichkeit von 1 mit Ausnahme der Modelle, die das erwartete relative Bedauern minimieren (C-MERB), besser ab. Beim erwarteten, maximalen und minimalen absoluten und relativen Bedauern hingegen sind die Modelle mit einer Zulässigkeitswahrscheinlichkeit von 0,75 ebenfalls deutlich besser. Es kann zusammenfassend festgehalten werden, dass die Modelle mit einer Zulässigkeitswahrscheinlichkeit von 0,75 bei den bedeutenden Maßen des minimalen Deckungsbeitrags, des maximalen (relativen) Bedauerns und der erwarteten Werte besser abschneiden als die Modelle mit einer Zulässigkeitswahrscheinlichkeit von 1.

Hervorzuheben bei den Ergebnissen der Kompensationsmodelle in Tabelle 6.11 sind die negativen Werte bei dem minimalen absoluten und dem minimalen relativen Bedauern. Grund ist, dass der maximale Gesamtdeckungsbeitrag bei Szenario 2 bei vollständiger Befriedigung der gesamten Nachfrage nicht erzielt wird. Für die letzten 3.000 Einheiten der Nachfrage nach Produkt 2 ist eine Erhöhung der Produktions- und

Lagerkapazitäten erforderlich, deren Kosten durch den Deckungsbeitrag der 3.000 Einheiten des Produktes 2 nicht gedeckt werden und dementsprechend bei vollständiger Befriedigung der Nachfrage zu einer Verschlechterung des Gesamtdeckungsbeitrags führen. Bei den in Tabelle 6.9 dargestellten deterministischen Lösungen der einzelnen Szenarien wird jedoch die vollständige Befriedigung der Nachfrage gefordert, so dass der ermittelte szenariooptimale Gesamtdeckungsbeitrag von Szenario 2 kleiner ist als der durch eine teilweise unbefriedigte Nachfrage erreichbare Gesamtdeckungsbeitrag.

	unerf. Nachfrage		GDB			Bedauern			rel. Bedauern		
	erw.	max.	erw.	max.	min.	erw.	max.	min.	erw.	max.	min.
K-MMB (150)	1.223	3.000	4.476.335	5.561.560	3.603.060	158.555	422.440	-17.560	3,81%	10,49%	-0,32%
K-MMB (100)	1.545	3.763	4.458.745	5.504.219	3.609.280	171.755	416.220	39.781	4,06%	10,34%	0,72%
K-MMRB (200)	1.166	3.000	4.478.832	5.560.652	3.602.152	155.831	423.348	-16.652	3,75%	10,52%	-0,30%
K-MMRB (150)	1.414	3.599	4.464.674	5.510.346	3.607.883	165.826	417.617	33.654	3,93%	10,37%	0,61%
K-MMRB (100)	1.806	4.725	4.444.656	5.446.275	<b>3.611.450</b>	185.844	<b>414.050</b>	54.550	4,31%	<b>10,29%</b>	1,21%
K-MERB (200)	<b>750</b>	<b>3.000</b>	<b>4.497.125</b>	5.554.000	3.595.500	<b>135.875</b>	430.000	-10.000	<b>3,30%</b>	10,68%	-0,18%
K-MERB (150)	<b>750</b>	<b>3.000</b>	<b>4.497.125</b>	5.554.000	3.595.500	<b>135.875</b>	430.000	-10.000	<b>3,30%</b>	10,68%	-0,18%
K-MERB (100)	<b>750</b>	<b>3.000</b>	<b>4.497.125</b>	5.554.000	3.595.500	<b>135.875</b>	430.000	-10.000	<b>3,30%</b>	10,68%	-0,18%
<b>Best</b>	<b>750</b>	<b>3.000</b>	<b>4.497.125</b>	<b>5.561.560</b>	<b>3.611.450</b>	<b>135.875</b>	<b>414.050</b>	<b>-17.560</b>	<b>3,30%</b>	<b>10,29%</b>	<b>-0,32%</b>

**Tabelle 6.11: Ergebnisse der Kompensationsmodelle bei einem Ziel**

Bei einem Vergleich der Lösungen der in Tabelle 6.11 dargestellten Kompensationsmodelle zeigt sich tendenziell der erwartete Effekt, dass die unbefriedigte Nachfrage mit steigenden Strafkosten sinkt oder zumindest gleich bleibt. Auffällig ist, dass die Modelle, die das erwartete relative Bedauern minimieren (K-MERB), unabhängig von der Höhe der Strafkosten dieselbe Lösung erzeugen. Darüber hinaus weisen diese Modelle die besten Ergebnisse hinsichtlich des erwarteten Gesamtdeckungsbeitrags, des erwarteten absoluten und relativen Bedauerns sowie der erwarteten und maximalen unerfüllten Nachfrage auf. Jedoch haben diese Modelle hinsichtlich des schlechtesten möglichen Gesamtdeckungsbeitrags und des absoluten und relativen maximalen Bedauerns nach dem Modell K-MMB (200) die schlechtesten Ergebnisse im Vergleich zu den anderen Kompensationsmodellen. Hinsichtlich der maximalen unerfüllten Nachfrage sind die Ergebnisse des Modells K-MMB (200), K-MMB (150) und K-MMRB (200) ebenso gut wie die der Modelle K-MERB. Jedoch zeigt das Modell K-MMB (200) bei dem minimalen absoluten und relativen Bedauern die besseren Ergebnisse.

Für einen besseren Vergleich zeigen die Abbildungen 6.8 - 6.11 die Modellergebnisse hinsichtlich der verschiedenen Analysemaße zusammengefasst in einem Diagramm. So verdeutlicht eine graphische Darstellung der Ergebnisse der verschiedenen Modelle, wie sie in Abbildung 6.8 hinsichtlich der Gesamtdeckungsbeiträge erfolgt, dass sowohl die maximalen als auch die minimalen und die erwarteten Gesamtde-

ckungsbeiträge der Kompensationsmodelle entweder größer oder zumindest annähernd so groß sind wie die der anderen Modelle. Die Ergebnisse des Modells D-Szenario 2 sowie der Chance-Constrained-Modelle mit Zulässigkeitswahrscheinlichkeit 1 sind zwar hinsichtlich des maximal erzielbaren Gesamtdeckungsbeitrags etwa genauso gut, jedoch sind die mindestens erreichten und die erwarteten Gesamtdeckungsbeiträge deutlich geringer. Von den Chance-Constrained-Modellen liefert lediglich das C-MERB (0,75) hinsichtlich der Gesamtdeckungsbeiträge ähnlich gute Werte wie die Kompensationsmodelle.

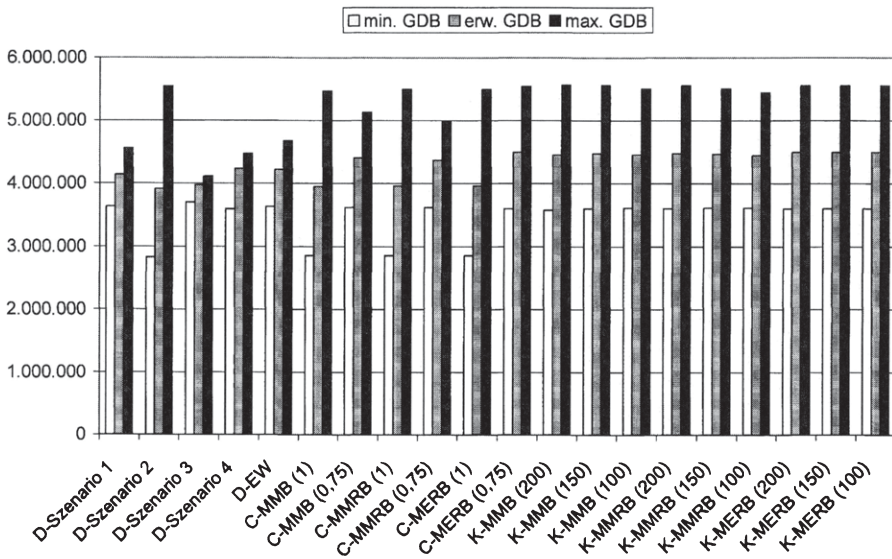


Abbildung 6.8: Gesamtdeckungsbeiträge bei einem Ziel

Die deutlich besseren Ergebnisse der Kompensationsmodelle zeigen sich ebenfalls bei der Betrachtung der absoluten und relativen Abweichung von den szenariooptimalen Werten, dem absoluten bzw. relativen Bedauern, welches hinsichtlich der maximalen, der minimalen und der erwarteten Ausprägungen in Abbildung 6.9 bzw. Abbildung 6.10 dargestellt ist. Hier weisen die Chance-Constrained-Modelle mit einer Zulässigkeitswahrscheinlichkeit von 0,75 hinsichtlich des maximalen und minimalen relativen Bedauerns ebenfalls ähnlich gute Werte auf. Allerdings ist C-MMRB (0,75) bezüglich des erwarteten und des maximalen absoluten Bedauerns deutlich schlechter. Darüber hinaus ist das erwartete absolute und relative Bedauern bei C-MMB (0,75) und C-MMRB (0,75) schlechter als die Ergebnisse der Kompensationsmodelle.

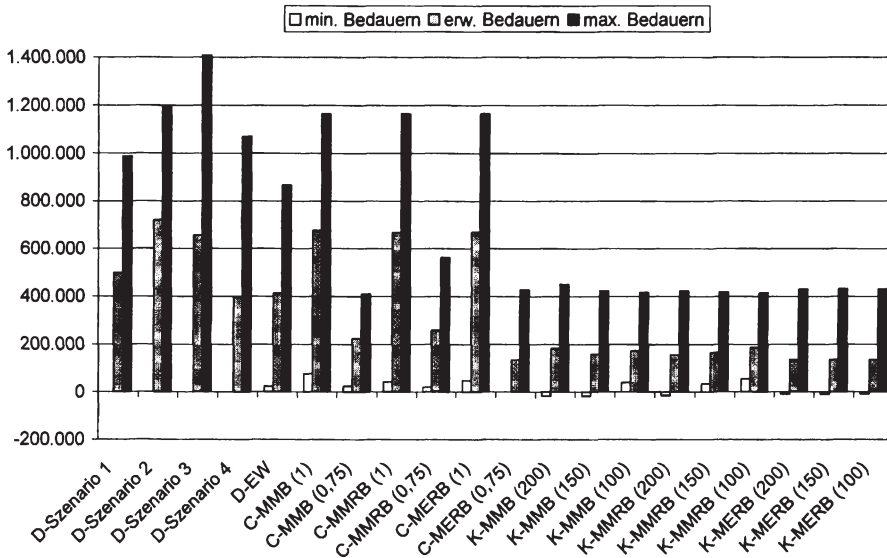


Abbildung 6.9: Absolutes Bedauern bei einem Ziel

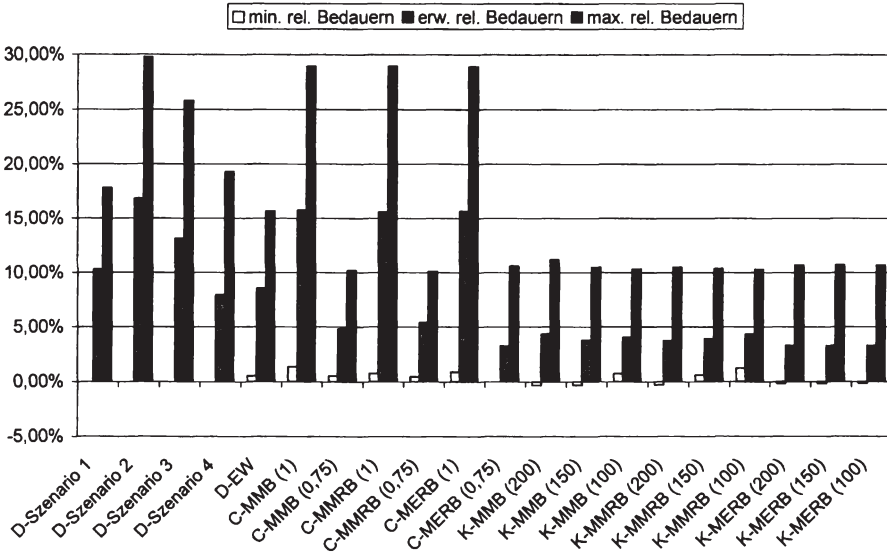


Abbildung 6.10: Relatives Bedauern bei einem Ziel

Der schlechteste Wert hinsichtlich des maximalen absoluten Bedauerns ist, wie in Abbildung 6.9 dargestellt, bei Realisierung der Lösung des Modells D-Szenario 3



möglich. Dies ist eine Folge der niedrigsten möglichen Nachfrage, die in Szenario 3 betrachtet wird, und somit hinsichtlich der anderen Nachfrageszenarien hohe Fehlmenngen und geringe Erlöse verursacht. Für das relative Bedauern, bei denen das absolute Bedauern im Verhältnis zu den szenariooptimalen Werten betrachtet wird, weisen die deterministische Lösung von Szenario 2 sowie die Lösungen der Chance-Constrained-Modelle mit Zulässigkeitswahrscheinlichkeit 1 die schlechtesten Werte auf.

Zusammengefasst zeigen nach den bisherigen Auswertungen die Kompensationsmodelle und die Chance-Constrained-Modelle mit einer Zulässigkeitswahrscheinlichkeit von 0,75 die besseren Ergebnisse im Vergleich zu den deterministischen Modellen und den Chance-Constrained-Modellen mit einer Zulässigkeitswahrscheinlichkeit von 1. In einem nächsten Schritt werden die aus den Lösungen der Modelle resultierenden unbefriedigten Nachfragen analysiert, die in Abbildung 6.11 dargestellt sind. Es wird deutlich, dass die von den bisher als akzeptabel charakterisierten Chance-Constrained-Modellen mit einer Zulässigkeitswahrscheinlichkeit von 0,75 die Modelle C-MMB (0,75) und C-MMRB (0,75) bei der unerfüllten Nachfrage deutlich schlechtere Ergebnisse aufweisen als das Modell C-MERB (0,75) und die Kompensationsmodelle. Bei der Lösung von Szenario 2 sind zwar maximale und unbefriedigte Nachfrage gering, ein Resultat aus der hohen Nachfrage in Szenario 2, dennoch ist das absolute und relative Bedauern hoch. Grund ist, dass den hohen Beschaffungs- und Kapazitätskosten bei Realisierung der Nachfrage anderer Szenarien keine Erlöse gegenüberstehen.

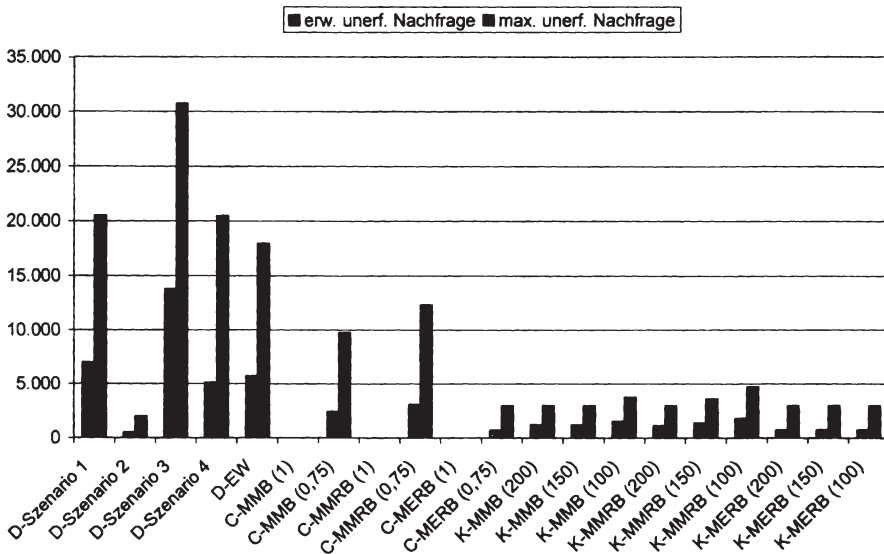


Abbildung 6.11: Unerfüllte Nachfrage bei einem Ziel

Für eine weitere Analyse hinsichtlich Zulässigkeits-, Optimalitäts- und Ergebnisrobustheit werden als Resultat dieser Auswertungen die Kompensationsmodelle und das Chance-Constrained-Modell C-MERB (0,75) weiter betrachtet, da die anderen Lösungen bei mindestens einem Analysemaß nicht akzeptable Ergebnisse aufweisen.

	unerf. Nachfrage		GDB		Bedauern		rel. Bedauern	
	erw.	max.	erw.	min.	erw.	max.	erw.	max.
<b>C-MERB (0,75)</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,02%</b>	<b>0,39%</b>	<b>0,00%</b>	<b>3,37%</b>	<b>0,00%</b>	<b>3,37%</b>
K-MMB (200)	63,70%	0,00%	0,99%	1,01%	35,70%	8,79%	33,34%	8,79%
K-MMB (150)	63,00%	0,00%	0,46%	0,23%	17,99%	2,03%	16,51%	2,03%
K-MMB (100)	106,03%	25,43%	0,85%	0,06%	27,82%	0,52%	24,13%	0,52%
K-MMRB (200)	55,43%	0,00%	0,41%	0,26%	15,97%	2,25%	14,66%	2,25%
K-MMRB (150)	88,47%	19,97%	0,72%	0,10%	23,41%	0,86%	20,29%	0,86%
K-MMRB (100)	140,83%	57,50%	1,17%	0,00%	38,30%	0,00%	31,81%	0,00%
<b>K-MERB (200)</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,44%</b>	<b>1,12%</b>	<b>3,85%</b>	<b>1,06%</b>	<b>3,85%</b>
<b>K-MERB (150)</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,44%</b>	<b>1,12%</b>	<b>3,85%</b>	<b>1,06%</b>	<b>3,85%</b>
<b>K-MERB (100)</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,44%</b>	<b>1,12%</b>	<b>3,85%</b>	<b>1,06%</b>	<b>3,85%</b>

Tabelle 6.12: Relative Abweichungen von den besten möglichen Ausprägungen

Die verbleibenden weiter zu betrachtenden Modelle C-MERB (0,75) sowie die Kompensationsmodelle werden in Tabelle 6.12 hinsichtlich ihrer relativen Abweichungen vom jeweils besten Wert eines Maßes dargestellt. Da Robustheitsmaße besonders bei risikoaverser Risikoneigung des Entscheiders als Grundlage der Entscheidungsunterstützung geeignet sind, werden die besten Ausprägungen eines Maßes, der maximale erreichbare Gesamtdeckungsbeitrag sowie das minimale absolute und relative Bedauern bei der folgenden Auswertung nicht berücksichtigt.

### *Zulässigkeitsrobustheit*

Die erwartete und maximale unerfüllte Nachfrage spiegelt die Zulässigkeitsrobustheit wider. Ausgehend von den besten möglichen Ergebnissen der verbleibenden betrachteten Modelle in Höhe von 750 bzw. 3.000 Mengeneinheiten unerfüllter Nachfrage können die in Tabelle 6.12 fett gekennzeichneten Modelle als zulässigkeitsrobust bezeichnet werden. Die nicht fett markierten Modelle erzeugen Lösungen, die teilweise deutlich von den besten Ergebnissen hinsichtlich der erwarteten und maximalen unerfüllten Nachfrage abweichen und deshalb im Vergleich als nicht zulässigkeitsrobust bezeichnet werden.

### *Optimalitätsrobustheit*

Als Maß für die Optimalitätsrobustheit kann zunächst der erwartete und minimale Gesamtdeckungsbeitrag betrachtet werden.<sup>13</sup> Da die Abweichung von den besten Ergebnissen jedoch maximal 1,17% beträgt und außer bei K-MMB (200), K-MMB

<sup>13</sup> Vgl. zur Verwendung des minimalen Gesamtdeckungsbeitrags als Maß für die Optimalitätsrobustheit Kouvelis/Yu (1997), S. 8f., sowie die Ausführungen zur Optimalitätsrobustheit in Abschnitt 5.3.2.

(100) und K-MMRB (100) sogar unter 0,75% liegt, sind gemäß diesem Maß alle Ergebnisse als optimalitätsrobust zu bezeichnen. Für die Optimalitätsrobustheit kann in einem zweiten Schritt das absolute und relative Bedauern als Maß herangezogen werden. Wird hier eine relative Abweichung von maximal 4% zugelassen, so sind K-MMB und K-MMRB unabhängig von den Strafkostensätzen nicht optimalitätsrobust. Daraus resultieren die in Tabelle 6.12 fett gekennzeichneten Modelle, die sowohl als zulässigkeits- als auch als optimalitätsrobust zu charakterisieren sind.

### *Ergebnisrobustheit*

Ergebnisrobuste Lösungen weisen hinsichtlich der möglichen Zielfunktionswerte lediglich geringe Schwankungen auf. Für die Analyse der Schwankungen des Zielfunktionswertes Gesamtdeckungsbeitrag sind in Tabelle 6.13 die Streuungsmaße Spannweite, als Differenz aus minimalem und maximalem Gesamtdeckungsbeitrag, die Standardabweichung und der Variationskoeffizient, als Quotient aus Standardabweichung und erwartetem Gesamtdeckungsbeitrag, dargestellt.<sup>14</sup>

	Spannweite	Standardabweichung	Variationskoeffizient
<b>C-MERB (0,75)</b>	<b>1.946.500</b>	<b>1.384.492</b>	<b>30,79%</b>
K-MMB (200)	1.987.500	1.428.976	32,09%
K-MMB (150)	1.958.500	1.403.933	31,36%
K-MMB (100)	1.894.939	1.358.907	30,48%
K-MMRB (200)	1.958.500	1.402.330	31,31%
K-MMRB (150)	1.902.463	1.361.955	30,51%
K-MMRB (100)	1.834.825	1.313.494	29,55%
<b>K-MERB (200)</b>	<b>1.958.500</b>	<b>1.393.584</b>	<b>30,99%</b>
<b>K-MERB (150)</b>	<b>1.958.500</b>	<b>1.393.584</b>	<b>30,99%</b>
<b>K-MERB (100)</b>	<b>1.958.500</b>	<b>1.393.584</b>	<b>30,99%</b>

**Tabelle 6.13: Streuungsmaße des Gesamtdeckungsbeitrags bei einem Ziel**

Alle in Tabelle 6.13 analysierten Modelle weisen ähnliche Werte hinsichtlich der betrachteten Streuungsmaße auf. Die als zulässigkeits- und optimalitätsrobust bezeichneten Modelle liegen dabei zwischen der besten Ausprägung der Modelle K-MMRB (100) und der schlechtesten Ausprägung des Modells K-MMB (200). Die besten und schlechtesten Ausprägungen liegen jedoch maximal 9% auseinander, so dass alle Modelle tendenziell als etwa gleich ergebnisrobust eingestuft werden können.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird im Folgenden die aus den als zulässigkeits- und optimalitätsrobust charakterisierten Modellen resultierende Struktur der Supply Chain sowie die Auswahl der Zulieferer analysiert. Da die Kompensationsmodelle, die das erwartete relative Bedauern minimieren, unabhängig von der Höhe des hier

<sup>14</sup> Vgl. zur Definition dieser und weiterer Streuungsmaße Bamberg/Baur (2002), S. 20ff.; Reichardt/Reichardt (2002), S. 67f.

gewählten Strafkostensatzes zu derselben Lösung führen, sind nachfolgend lediglich zwei Lösungen detaillierter zu betrachten.

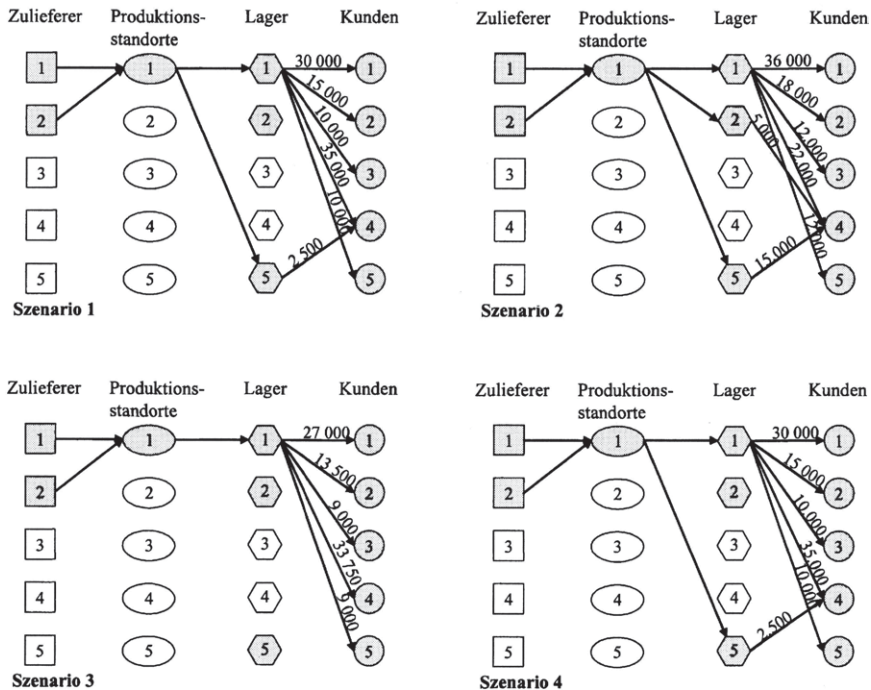
Tabelle 6.14 enthält die Standorte der Produktionsstätten und Lager mit den zugehörigen Kapazitätsmodi sowie den zu beschaffenden Mengen der zwei zu analysierenden Lösungen. Hervorzuheben ist, dass sich diese Lösungen lediglich bei den Beschaffungsmengen unterscheiden. So werden bei C-MERB (0,75) 2.000 Einheiten mehr von  $r_1$  und 2.000 Einheiten weniger von  $r_3$  beschafft als bei K-MERB. Daraus resultieren lediglich für Szenario 2 unterschiedliche Produktions- und Liefermengen. Die Entscheidungen der zweiten Stufe sind bei allen weiteren Szenarien gleich. Um dennoch hier zu einer eindeutigen Entscheidung zu gelangen, falls der Entscheider zwischen diesen Lösungen indifferent ist, zeigt Tabelle 6.12, dass C-MERB (0,75) lediglich bei dem erwarteten Gesamtdeckungsbeitrag eine unwesentlich schlechtere Abweichung (0,02%) aufweist. Bei allen anderen Maßen hat C-MERB (0,75) jedoch genauso gute oder sogar bessere Werte als K-MERB, so dass hier die Lösung von C-MERB zu bevorzugen ist.

	C-MERB (0,75)	K-MERB
<b>Produktionsstandorte</b>	Standort 1 im Modus 5	Standort 1 im Modus 5
<b>Lager</b>	Standort 1 im Modus 18	Standort 1 im Modus 18
	Standort 2 im Modus 1	Standort 2 im Modus 1
	Standort 5 im Modus 1	Standort 5 im Modus 1
<b>Beschaffungsmengen <math>z_1</math></b>	$r_1$ : 74.000	$r_1$ : 72.000
	$r_2$ : 35.000	$r_2$ : 35.000
<b>Beschaffungsmengen <math>z_2</math></b>	$r_3$ : 46.000	$r_3$ : 48.000
	$r_4$ : 35.000	$r_4$ : 35.000

**Tabelle 6.14: Struktur der robusten Supply Chain bei einem Ziel**

Die Struktur der Lösung des Modells C-MERB (0,75) wird in Abbildung 6.12 für die verschiedenen Szenarien visualisiert. Die Standortentscheidung der Lager mit den damit verbundenen Errichtungskosten sind zwar den Entscheidungen der ersten Stufe zugeordnet, es zeigt sich dennoch, dass nicht alle Lager in allen Szenarien tatsächlich in die Belieferung der Kunden einbezogen sind. So sind die Lager 1, 2 und 5 lediglich bei Szenario 2 mit der größten Nachfrage erforderlich. Bei Szenario 3 mit der geringsten Nachfrage wird hingegen lediglich das Lager 1 benötigt. In den Szenarien 1 und 4 werden die Lager 1 und 5 für die Belieferung der Kunden herangezogen. Die Fixkosten der Lager 1, 2 und 5 sind in den Gesamtdeckungsbeiträgen der verschiedenen Szenarien erfasst, auch wenn diese nicht genutzt werden, da es sich bei der Lagerstandortentscheidung um Entscheidung der ersten Stufe handelt.

In Abbildung 6.12 sind des Weiteren die aus den Anpassungsmaßnahmen der zweiten Stufe resultierenden szenariospezifischen Belieferungsmengen durch die Beschriftung der Transportpfeile zwischen den Lagern und den Kundengruppen dargestellt. Ein Vergleich mit den Nachfragemengen verdeutlicht, dass lediglich in Szenario 2 bei Kundengruppe 4 eine unerfüllte Nachfrage von 3.000 ME auftritt.



**Abbildung 6.12: Struktur der robusten Supply Chain bei einem Ziel**

Bei einer Festlegung der Struktur der Supply Chain, bei der die Zulieferer lediglich auf Basis der Kosten für die verschiedenen Rohstoffe ausgewählt werden, zeigt sich, dass bei den robusten Lösungen die Zulieferer  $z_1$  und  $z_2$  für die Belieferung mit den erforderlichen Rohstoffen ausgewählt werden. Die Ausführungen in Kapitel 4 haben gezeigt, dass neben den Kosten weitere Ziele zur Auswahl von Schlüsselzulieferern in Erwägung zu ziehen sind. Daher wird im Folgenden als zweite Zielsetzung die erweiterte Bewertung der Zulieferer in diese Auswahlentscheidung einbezogen. Um beide Zielsetzungen angemessen berücksichtigen zu können, werden die in Abschnitt 5.4.2 entwickelten Modelle zur Erzeugung einer zielrobusten Lösung auf die vorliegende Problemstruktur angewandt und hinsichtlich Optimalitäts-, Zulässigkeits-, Ergebnis- und Zielrobustheit sowie den resultierenden Strukturen der Supply Chain analysiert.

## 6.3 Robustheit im Supply Chain Design mit erweiterter Zuliefererbewertung

### 6.3.1 Erweiterte Ausgangssituation und verwendete Ersatzmodelle

Neben den Daten, die bereits zur Ermittlung eines robusten Supply Chain Design bei der Zielsetzung der Deckungsbeitragsmaximierung verwendet wurden, sind jetzt Angaben zur Bewertung der Zulieferer erforderlich. Ausgehend von einer ermittelten, kardinal messbaren Zuliefererbewertung, bei der die Bewertung einer Unternehmung umso besser ist, je größer die zwischen null und eins liegende Bewertung ist, sind den unterschiedlichen Zulieferern die in Tabelle 6.15 dargestellten Schätzungen von Experten zugeordnet.

Zulieferer	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	$z_5$
Bewertung	0,60	0,76	0,83	0,75	0,67

Tabelle 6.15: Bewertungen der Zulieferer bei einer Maximierungsziel­funktion

Um zu gewährleisten, dass Zulieferer 1, der große Mengen der benötigten Rohstoffe liefern kann, jedoch eine schlechte Bewertung aufweist, nicht einer Kombination der Zulieferer 2 und 3 vorgezogen wird, die eine kleinere Kapazität, jedoch eine wesentlich bessere Bewertung haben, wird die Gesamtbewertung in der Zielfunktion als Summe aus den Bewertungen der ausgewählten Zulieferer multipliziert mit den von diesen beschafften Gesamtmengen der Rohstoffe erfasst.<sup>15</sup> Eine auf diese Weise ermittelte Bewertung der Zulieferer als zu maximierende Zielfunktion kann insbesondere bei einer Berücksichtigung der Robustheit der Zuliefererbewertung als Anspruchsniveau oder gleicher relativer Abweichungen dazu führen, dass mehr als die erforderlichen Rohstoffe beschafft werden. Eine zu minimierende Zielfunktion hat demgegenüber den Vorteil, dass eine Erhöhung der Beschaffungsmengen keine verbesserte Bewertung zur Folge hat. Die Subtraktion der in Tabelle 6.15 dargestellten Zuliefererbewertungen von der maximal möglichen Bewertung in Höhe von eins, multipliziert mit der zu beschaffenden Menge als Minimierungsziel­funktion ist folglich dazu geeignet, die Bewertung der Zulieferer zu erfassen und eine Überbeschaffung zur Verbesserung des Zielfunktionswertes zu vermeiden. Die in dieser zu minimierenden Zielfunktion zu verwendenden Bewertungen der Zulieferer sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

Zulieferer	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	$z_5$
Bewertung	0,40	0,24	0,17	0,25	0,33

Tabelle 6.16: Bewertungen der Zulieferer bei einer Minimierungsziel­funktion

<sup>15</sup> Vgl. die Ausführungen in Abschnitt 4.4.2.

Ausgehend von diesen Zuliefererbewertungen, bei denen ein Zulieferer umso besser ist, je kleiner seine Bewertung ist, können für jedes Nachfrageszenario die besten erzielbaren Gesamtbewertungen ermittelt werden. Die vollständige Erfüllung der Nachfrage wird zur Ermittlung der in Tabelle 6.17 dargestellten szenariooptimalen Zielfunktionswerte der aggregierten Zuliefererbewertung vorausgesetzt.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Zielfunktionswert Zuliefererbewertung	35.625	43.660	29.868	38.675
Beschaffungsmenge [ME]	157.500	189.000	141.750	172.500
durchschn. Bewertung	0,226	0,231	0,211	0,224
ausgewählte Zulieferer	2,3,4,5	2,3,4,5	2,3,5	2,3,5

**Tabelle 6.17: Szenariooptima der Zielsetzung Zuliefererbewertung**

Bei den szenariooptimalen Zielfunktionswerten dieser zweiten Zielsetzung zeigt sich auf Grund der Multiplikation mit den zu beschaffenden Rohstoffmengen, die zwischen 141.750 Einheiten für Szenario 3 und 189.000 Einheiten für Szenario 2 liegen, eine relativ große Bandbreite von 29.868 bis 43.660 Einheiten. Die Division dieser Zielfunktionswerte durch die Beschaffungsmengen führt zu einer Art durchschnittlicher Bewertung der ausgewählten Zulieferer, die zwischen 0,211 und 0,231 liegt. Wie in Tabelle 6.17 dargestellt, umfassen die ausgewählten Zulieferer die Zulieferer 2, 3 und 5 sowie für die Szenarien 1 und 2 mit einer kleinen zusätzlichen Menge von 7.500 bzw. 8.000 Mengeneinheiten den Zulieferer 4. Zulieferer 3 wird als Zulieferer mit der besten Bewertung ausgewählt, kann jedoch lediglich geringe Mengen der erforderlichen Rohstoffe liefern. Die Rohstoffe  $r_3$  und  $r_4$  werden darüber hinaus von Zulieferer 2 mit der nächst schlechteren Bewertung geliefert. Die Rohstoffe  $r_1$  und  $r_2$  können neben Zulieferer 3 von Zulieferer 1 und Zulieferer 5 beschafft werden, wobei Zulieferer 5 über die bessere Bewertung verfügt und somit zur Belieferung herangezogen wird. Zulieferer 4 mit einer geringfügig schlechteren Bewertung als Zulieferer 2 wird in den Szenarien 1 und 2 zusätzlich herangezogen, da lediglich geringe zusätzliche Mengen von  $r_3$  erforderlich sind und Zulieferer 2 eine hohe Mindestbestellmenge hat, die dann die Bestellmenge dieses Rohstoffs von Zulieferer 3 mit der besseren Bewertung vermindert. Ausgehend von diesen szenariooptimalen Zielfunktionswerten für die erweiterte Zuliefererbewertung kann im Folgenden die in Kapitel 5 entwickelte Zielrobustheit auf die Fragestellung der Ermittlung eines robusten Supply Chain Design angewandt werden.

In Tabelle 6.18 sind die unterschiedlichen, nachfolgend zu untersuchenden Modelle mit ihren charakteristischen Bezeichnungen dargestellt. Die ersten zwei Buchstaben stehen dabei für die Art der Berücksichtigung der zweiten Zielsetzung. So bezeichnet AN die Erfassung der zweiten Zielsetzung als Anspruchsniveau, GA die Modelle mit gleicher relativer Abweichung hinsichtlich beider Zielsetzungen und ZG die Zielge-

wichtungsansätze. Das Anspruchsniveau wird in der ersten Gruppe der Modelle als maximale relative Abweichung von den szenariooptimalen Zielfunktionswerten mit 20% festgelegt. Die Modelle der gleichen relativen Abweichung erfordern keine zusätzlichen Angaben des Entscheiders und bei den Zielgewichtungsansätzen wird unterstellt, dass der Deckungsbeitrag dreimal so wichtig wie die Bewertung der Zulieferer ist. Daraus resultiert bei Normierung der Gewichte auf 1 ein Gewicht von 0,75 für den Gesamtdeckungsbeitrag und ein Gewicht von 0,25 für die erweiterte Zuliefererbewertung.

Zuliefererbewertung als Anspruchsniveau	Gleiche relative Abweichung	Zielgewichtung
AN-K-MMB (200) AN-K-MMB (150) AN-K-MMB (100)		ZG-K-MMB (200) ZG-K-MMB (150) ZG-K-MMB (100) ZG-C-MMB (0,75)
AN-K-MMRB (200) AN-K-MMRB (150) AN-K-MMRB (100)	GA-K-MMRB (200) GA-K-MMRB (150) GA-K-MMRB (100) GA-C-MMRB (0,75)	ZG-K-MMRB (200) ZG-K-MMRB (150) ZG-K-MMRB (100) ZG-C-MMRB (0,75)
AN-K-MERB (200) AN-K-MERB (150) AN-K-MERB (100)	GA-K-MERB (200) GA-K-MERB (150) GA-K-MERB (100) GA-C-MERB (0,75)	ZG-K-MERB (200) ZG-K-MERB (150) ZG-K-MERB (100) ZG-C-MERB (0,75)

**Tabelle 6.18: Darstellung der verwendeten Modelle bei Mehrfachzielsetzung**

Entsprechend der Benennung der Modelle bei der einzigen Zielsetzung der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags werden die unterschiedlichen Modelle nach den verwendeten Ersatzzielfunktionen zur Ermittlung optimalitätsrobuster Lösungen mit MMB für die Minimierung des maximalen Bedauerns, mit MMRB für die Minimierung des maximalen relativen Bedauerns und mit MERB für die Minimierung des erwarteten relativen Bedauerns gekennzeichnet. Die Zulässigkeitsrobustheit wird einerseits mit Strafkosten in Anlehnung an Kompensationsmodelle und andererseits in Form von Chance-Constraints erfasst. Dies ist bei der Bezeichnung der Modelle mit K und C kenntlich gemacht. An Tabelle 6.18 ist auffällig, dass es bei den Modellen zum Anspruchsniveau keine Modelle mit Chance-Constraints gibt. Dies liegt darin begründet, dass es bei einer Zulässigkeitswahrscheinlichkeit von 0,75, wie sie auch bei der Einfachzielsetzung der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags zugrunde liegt, keine dem Anspruchsniveau von 20% entsprechenden zulässigen Lösungen gibt. Des Weiteren werden bei den Modellen der gleichen Abweichungen die Modelle, die das gleiche absolute Bedauern aufweisen, nicht betrachtet, da abhängig von den Ausprägungen der verschiedenen Zielsetzungen ein Vergleich auf Grund der unterschiedlichen Höhe und Einheiten der Zielfunktionswerte nicht sinnvoll ist. Bei den hier betrachteten Zielsetzungen der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags und der



Minimierung der mit der Menge gewichteten Bewertung der Zulieferer führt eine Forderung nach gleichem maximalen absoluten Bedauern nicht zu sinnvollen Ergebnissen, da die szenariooptimalen Deckungsbeiträge zwischen 4.025.500 und 5.544.000 schwanken, während die szenariooptimalen Gesamtbewertungen zwischen 29.868 und 43.660 liegen.

Im Folgenden werden die in Tabelle 6.18 dargestellten Modelle bei a priori bekannten Präferenzen des Entscheiders, wie bereits bei einer Zielsetzung, hinsichtlich Zulässigkeits-, Optimalitäts- und Ergebnisrobustheit sowie darüber hinaus hinsichtlich der Zielrobustheit und der resultierenden Struktur der Supply Chain analysiert. Die Auswertung der Ergebnisse der verschiedenen Ansätze erfolgt wie im vorherigen Abschnitt bei einer Zielsetzung anhand der unerfüllten Nachfrage, des erzielbaren Gesamtdeckungsbeitrags und des absoluten und relativen Bedauerns hinsichtlich der szenariooptimalen Deckungsbeiträge. Darüber hinaus wird die mit der Menge gewichtete Bewertung der Zulieferer sowie das absolute und relative Bedauern hinsichtlich der szenariooptimalen Gesamtbewertung dieser Zielfunktion betrachtet. Die Analyse der Ergebnisse der verschiedenen Ersatzmodelle erfolgt für jede Modellgruppe getrennt, da den verschiedenen Modellgruppen unterschiedliche Präferenzannahmen des Entscheiders zu Grunde liegen. So entsprechen beispielsweise die Präferenzen bei gleicher maximaler relativer Abweichung beider Zielsetzungen nicht den Präferenzen einer Zielgewichtung von 0,75 bzw. 0,25 für die Zielsetzungen.

### 6.3.2 Analyse der Ergebnisse bei gegebenem Anspruchsniveau

Zunächst werden die Modelle mit einem Anforderungsniveau von 20% hinsichtlich der maximalen relativen Abweichung von den szenariooptimalen Werten bei der erweiterten Zulieferbewertung betrachtet. Diese Abweichung von maximal 20% führt zu einer einheitlichen Gesamtbewertung von 35.841 mit einem maximalen Bedauern von 5.973,5 und einem erwarteten Bedauern von 1.547 Einheiten. Das maximale relative Bedauern beträgt annahmegemäß 20% und das erwartete relative Bedauern 5,15%. Da diese Werte unabhängig von dem verwendeten Optimalitätsrobustheitsmaß und der Art der Berücksichtigung der Zulässigkeitsrobustheit sind, werden diese in Tabelle 6.19 nicht dargestellt.

Tabelle 6.19 zeigt, dass die Minimierung des erwarteten relativen Bedauerns mit Strafkosten von 150 (AN-K-MERB (150)) zu den besten Ergebnissen hinsichtlich der Analysemaße der Optimalitätsrobustheit der Zielsetzung Gesamtdeckungsbeitrag führt. Lediglich das maximale Bedauern nimmt den kleinsten und damit besten Wert bei Modell AN-K-MMRB (150) an. Von einer zulässigkeitsrobusten Lösung, bewertet

durch die erwartete und maximale unerfüllte Nachfrage, kann am ehesten bei der Minimierung des erwarteten relativen Bedauerns und Strafkosten von 200 (AN-K-MERB (200)) gesprochen werden.

	unerf. Nachfrage		GDB		Bedauern GDB		rel. Bed. GDB	
	erw.	max.	min.	erw.	erw.	max.	erw.	max.
AN-K-MMB (200)	6.048	11.691	3.339.218	3.898.680	731.820	1.077.282	16,00%	24,18%
AN-K-MMB (150)	6.148	12.092	3.344.985	3.898.332	732.168	1.071.515	15,98%	24,05%
AN-K-MMB (100)	6.311	12.742	3.354.328	3.897.763	732.738	1.062.172	15,96%	23,84%
AN-K-MMRB (200)	6.758	14.533	3.380.074	3.896.063	734.438	1.036.426	15,89%	23,26%
AN-K-MMRB (150)	6.885	15.021	3.387.055	3.895.065	735.435	1.029.446	15,88%	23,11%
AN-K-MMRB (100)	6.841	15.406	3.356.437	3.855.100	775.400	1.033.575	16,73%	23,20%
AN-K-MERB (200)	<b>5.534</b>	<b>10.000</b>	3.306.772	3.897.603	732.897	1.109.729	16,15%	24,91%
AN-K-MERB (150)	7.485	23.000	<b>3.678.388</b>	<b>4.107.062</b>	<b>523.438</b>	1.226.368	<b>10,59%</b>	<b>22,12%</b>
AN-K-MERB (100)	7.485	23.000	3.678.379	4.107.056	523.444	1.226.372	<b>10,59%</b>	<b>22,12%</b>
<b>Best</b>	<b>5.534</b>	<b>10.000</b>	<b>3.678.388</b>	<b>4.107.062</b>	<b>523.438</b>	<b>1.029.446</b>	<b>10,59%</b>	<b>22,12%</b>

Tabelle 6.19: Ergebnisse der Modelle mit Anspruchsniveau

Um einen Vergleich der Modellergebnisse miteinander zu ermöglichen, werden im Folgenden Balkendiagramme eingesetzt. Diese Diagramme gestatten eine Veranschaulichung der Ergebnisse der verschiedenen Analysemaße. Um ein Maß für die Zielrobustheit zu erhalten, welches simultan Analysemaße für die Optimalitätsrobustheit beider Zielsetzungen beinhaltet, werden die erwarteten und maximalen relativen Abweichungen von den jeweiligen szenariooptimalen Zielfunktionen betrachtet. Dabei werden die relativen Abweichungen beider Zielsetzungen addiert, um auf diese Weise ein aggregiertes Analysemaß für die Zielrobustheit zu erhalten.<sup>16</sup>

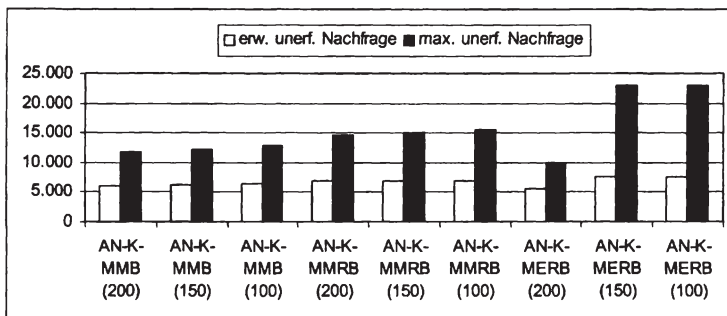


Abbildung 6.13: Unerfüllte Nachfrage der Modelle mit Anspruchsniveau

Die in Abbildung 6.13 visualisierte maximale und erwartete unerfüllte Nachfrage zeigt den erwarteten Effekt, dass die unerfüllte Nachfrage mit sinkenden Strafkosten steigt. Lediglich bei der Minimierung des erwarteten relativen Bedauerns ist die unerfüllte

<sup>16</sup> Da keine zusätzlichen Präferenzen des Entscheiders bekannt sind, ist in diesem Modellierungskontext eine von eins abweichende Gewichtung des relativen Bedauerns beider Zielsetzungen nicht sinnvoll.

Nachfrage bei Strafkosten von 150 und 100 gleich. Darüber hinaus ist die unerfüllte Nachfrage bei der Minimierung des maximalen relativen Bedauerns höher als bei der Minimierung des maximalen absoluten Bedauerns. Da die Modelle AN-K-MERB mit Strafkosten von 150 und 100 sehr schlechte Werte bei der maximal möglichen unerfüllten Nachfrage aufweisen, werden diese Modelle in die Robustheitsbetrachtungen nicht einbezogen. In einem nächsten Schritt kann dann das Bedauern als Maß für die Optimalitätsrobustheit hinsichtlich der Zielsetzung der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags betrachtet werden.

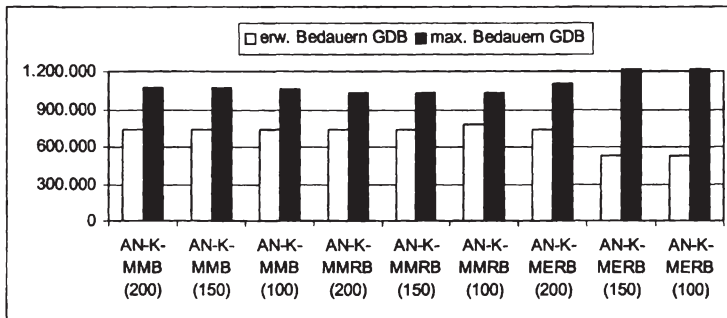


Abbildung 6.14: Absolutes Bedauern der Modelle mit Anspruchsniveau

Das absolute Bedauern, dargestellt in Abbildung 6.14, ist bei den Modellen, die das erwartete relative Bedauern minimieren, am größten und bei den Modellen, die das maximale relative Bedauern minimieren, am geringsten. Mit Ausnahmen der Modelle AN-K-MERB zeigt sich der Effekt, dass das erwartete Bedauern mit sinkenden Strafkosten leicht steigt.

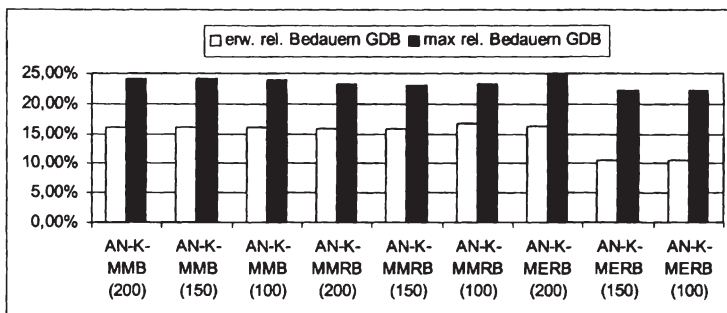


Abbildung 6.15: Relatives Bedauern der Modelle mit Anspruchsniveau

Den schlechtesten Wert hinsichtlich des maximal möglichen relativen Bedauerns weist das Modell AN-K-MERB (200) mit nahezu 25% auf. Das erwartete relative Bedauern ist bei diesem Modell mit fast 16% ebenfalls schlecht. Die schlechteste Ausprägung bei diesem Analysemaß mit nahezu 17% zeigt jedoch das Modell AN-K-MMRB (100). Die besten Werte haben die Modelle AN-K-MERB mit Strafkosten von 150 und 100, die jedoch eine unakzeptable hohe unbefriedigte Nachfrage aufweisen.

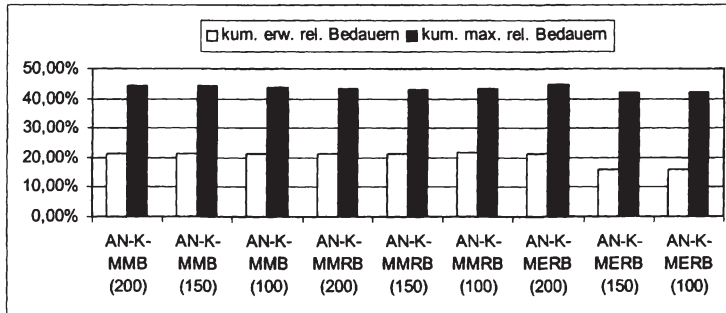


Abbildung 6.16: Kumuliertes relatives Bedauern der Modelle mit Anspruchsniveau

Das kumulierte relative Bedauern als Analysemaß für die Zielrobustheit der betrachteten Lösungen der Modelle mit Anspruchsniveau ist in Abbildung 6.16 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Modelle AN-K-MERB mit Strafkosten von 150 und 100 hier ebenfalls die besten Ergebnisse aufweisen, wohingegen das entsprechende Modell mit Strafkosten von 200 die schlechtesten Werte hinsichtlich des kumulierten maximalen relativen Bedauerns zeigt. Da dieses Modell bei dem maximalen relativen Bedauern des Gesamtdeckungsbeitrags ebenfalls die schlechtesten Werte hat, wird dieses Modell bei den folgenden Analysen nicht weiter berücksichtigt.

	unerf. Nachfrage		GDB		Bedauern GDB		rel. Bed. GDB		kum. rel. Bed.	
	erw.	max.	min.	erw.	erw.	max.	erw.	max.	erw.	max.
AN-K-MMB (200)	0,00%	0,00%	1,41%	0,00%	0,00%	4,65%	0,74%	4,65%	0,56%	2,49%
AN-K-MMB (150)	1,66%	3,43%	1,24%	0,01%	0,05%	4,09%	0,64%	4,09%	0,48%	2,19%
AN-K-MMB (100)	4,34%	8,99%	0,97%	0,02%	0,13%	3,18%	0,48%	3,18%	0,36%	1,70%
AN-K-MMRB (200)	11,75%	24,31%	0,21%	0,07%	0,36%	0,68%	0,05%	0,68%	0,03%	0,36%
AN-K-MMRB (150)	13,84%	28,48%	0,00%	0,09%	0,49%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
AN-K-MMRB (100)	13,12%	31,78%	0,90%	1,12%	5,96%	0,40%	5,35%	0,40%	4,04%	0,22%

Tabelle 6.20: Relative Abweichungen von den besten möglichen Ausprägungen (AN)

Die Analyse der verbleibenden Ergebnisse der Ersatzmodelle mit Anspruchsniveau erfolgt ähnlich wie bei einer zu beachtenden Zielsetzung anhand der Abweichung von den besten möglichen Ausprägungen eines Analysemaßes. Diese relativen Abweichungen sind in Tabelle 6.20 dargestellt.

*Zulässigkeitsrobustheit*

Die erwartete und maximale unerfüllte Nachfrage als Maß für die Zulässigkeitsrobustheit weist bei dem Modell AN-K-MMB (200) die besten Werte auf. Ausgehend von diesen besten Werten der verbleibenden Modelle kann das Modell AN-K-MMB (150) ebenfalls als zulässigkeitsrobust bezeichnet werden, da die relative Abweichung von den besten möglichen Werten nicht mehr als 3,5% beträgt. Alle weiteren Modelle weisen insbesondere hinsichtlich der maximalen Nachfrage deutlich höhere relative Abweichung von mindestens 8,99% und maximal 31,78% auf. Diese als zulässigkeitsrobust charakterisierten Modelle sind in Tabelle 6.20 fett gekennzeichnet.

*Optimalitätsrobustheit GDB*

Der minimale und erwartete Gesamtdeckungsbeitrag als Maß für die Optimalitätsrobustheit hinsichtlich der Zielsetzung der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags hat bei den hier betrachteten Ersatzmodellen eine maximale relative Abweichung von den besten möglichen Werten von 1,5%, so dass gemäß diesem Maß alle Lösungen als optimalitätsrobust charakterisiert werden können. Wird darüber hinaus jedoch das absolute und relative maximale und erwartete Bedauern herangezogen, so ist die Lösung des Modells AN-K-MMRB (100) mit einer relativen Abweichung von mehr als 5% nicht optimalitätsrobust.

*Ergebnisrobustheit GDB*

Die Ergebnisrobustheit, als hier ex post zu beobachtende Schwankungen der Zielfunktionswerte in den verschiedenen Szenarien, kann wie bereits erläutert in einem Zielkonflikt zur Optimalitätsrobustheit stehen und wird hier aus Gründen der Vollständigkeit bei diesen Mehrfachzielsetzungsansätzen nur kurz dargestellt. Die Werte der Streuungsmaße der Lösungen der Modelle mit einem Anspruchsniveau von 20% sind in Tabelle 6.21 dargestellt. Es zeigt sich, dass die als zulässigkeits- und optimalitätsrobust fett gekennzeichneten Modelle die höchsten Werte bei den Streuungsmaßen aufweisen, was die These unterstützt, dass hier ein Zielkonflikt zwischen Optimalitäts- und Ergebnisrobustheit vorliegt.

	Spannweite	Standardabweichung	Variationskoeffizient
<b>AN-K-MMB (200)</b>	<b>1.465.849</b>	<b>1.198.426</b>	<b>30,74%</b>
<b>AN-K-MMB (150)</b>	<b>1.441.388</b>	<b>1.179.971</b>	<b>30,27%</b>
AN-K-MMB (100)	1.401.738	1.150.256	29,51%
AN-K-MMRB (200)	1.291.954	1.069.427	27,45%
AN-K-MMRB (150)	1.261.698	1.047.216	26,89%
AN-K-MMRB (100)	1.235.672	1.008.997	26,17%

**Tabelle 6.21: Streuungsmaße des Gesamtdeckungsbeitrags (AN)**

### Zielrobustheit

Als Analysemaß für die Zielrobustheit wird das kumulierte maximale und erwartete relative Bedauern gewählt. Wie in Tabelle 6.20 dargestellt, betragen die relativen Abweichungen von den besten möglichen Ausprägungen maximal 4,04%. Davon ausgehend, dass eine Abweichung von bis zu 5% als akzeptabel gilt, können alle Modelle als zielrobust bezeichnet werden. Bei einer Grenze von 2,5% relativer Abweichung ist das Modell AN-K-MMRB (100) nicht mehr als zielrobust zu bezeichnen.

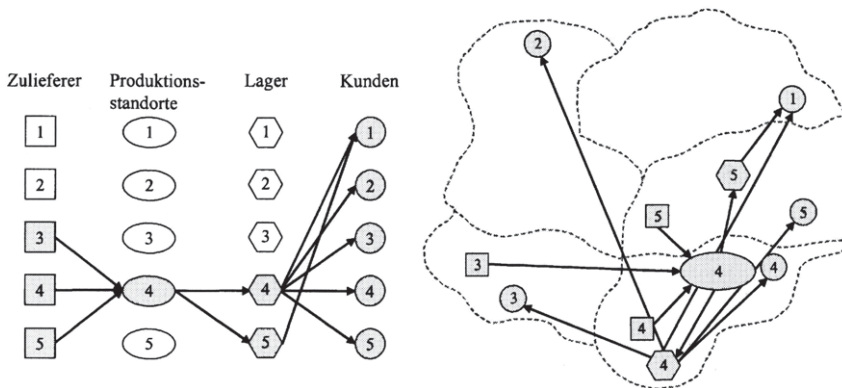
Zusammengefasst können die Modelle AN-K-MMB (200) und AN-K-MMB (150) sowohl als zulässigkeitsrobust als auch als optimalitätsrobust hinsichtlich der Zielsetzung der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags und als zielrobust bei simultaner Berücksichtigung beider Zielsetzungen bezeichnet werden. Die aus diesen Modellen resultierende Struktur wird im Folgenden dargestellt.

	AN-K-MMB (200)	AN-K-MMB (150)
<b>Produktionsstandorte</b>	Standort 4 im Modus 5	Standort 4 im Modus 5
<b>Lager</b>	Standort 4 im Modus 18	Standort 4 im Modus 18
	Standort 5 im Modus 1	Standort 5 im Modus 1
<b>Beschaffungsmengen <math>z_3</math></b>	$r_1$ : 25.000	$r_1$ : 25.000
	$r_2$ : 25.000	$r_2$ : 25.000
	$r_3$ : 19.388	$r_3$ : 17.733
	$r_4$ : 25.000	$r_4$ : 25.000
<b>Beschaffungsmengen <math>z_4</math></b>	$r_3$ : 28.612	$r_3$ : 30.267
<b>Beschaffungsmengen <math>z_5</math></b>	$r_1$ : 38.309	$r_1$ : 37.908

**Tabelle 6.22: Struktur der robusten Supply Chain bei Mehrfachzielsetzung (AN)**

Tabelle 6.22 zeigt, dass sich die Strukturen der Supply Chains lediglich durch die Beschaffungsmengen unterscheiden. So werden bei dem Modell mit Strafkosten in Höhe von 200 von dem Rohstoff  $r_3$  1.655 Einheiten zusätzlich von Zulieferer  $z_3$  beschafft, während bei dem Modell mit Strafkosten in Höhe von 150 diese 1.655 Einheiten zusätzlich von Zulieferer  $z_4$  beschafft werden. Die insgesamt beschaffte Menge des Rohstoffs  $r_3$  beträgt folglich bei beiden Modellen insgesamt 48.000 Einheiten. Ein weiterer Unterschied zwischen diesen Lösungen betrifft die Beschaffungsmenge des Rohstoffs  $r_1$ . So werden bei AN-K-MMB (200) 401 Einheiten dieses Rohstoffs mehr von Zulieferer  $z_5$  beschafft als bei AN-K-MMB (150). Diese unterschiedlichen Beschaffungsmengen haben neben den daraus resultierenden unterschiedlichen Gesamtdeckungsbeiträgen lediglich Auswirkungen auf die Höhe der unbefriedigten Nachfrage in Szenario 2. So bleiben bei AN-K-MMB (200) 9.691 Einheiten der gesamten Nachfrage unerfüllt, wohingegen bei AN-K-MMB (150) 10.092 Einheiten nicht erfüllt werden. Bei den weiteren Szenarien sind die Lösungen identisch.

Die einheitliche Struktur der beiden Lösungen ist in Abbildung 6.17 veranschaulicht. Das zusätzliche Lager 5, welches lediglich bei der hohen Nachfrage des zweiten Szenarios erforderlich ist, wird auf Grund der räumlichen Anordnung nicht verwendet, um Kundengruppe 5, sondern um Kundengruppe 1 zu beliefern. Dies ist auf die im Vergleich zu den Lagerkosten hohen Transportkosten zurückzuführen, die bei einer Belieferung der Kundengruppe 1 von Lager 4 und Kundengruppe 5 von Lager 5 zu höheren Kosten führen als bei einer Belieferung der Kundengruppe 1 von Lager 5 und Kundengruppe 5 von Lager 4.



**Abbildung 6.17: Struktur der robusten Lösung (AN)**

Die Präferenzen des Entscheiders, abgebildet durch ein Anspruchsniveau für die Optimalitätsrobustheit der Zielsetzung der erweiterten Zuliefererbewertung, führen zu einer robusten Supply Chain mit der in Abbildung 6.17 dargestellten Struktur. Können die Präferenzen stattdessen durch gleiche relative Abweichungen adäquat erfasst werden, so sind alternativ die im folgenden Abschnitt erläuterten Auswertungen zur Ermittlung einer robusten Supply Chain relevant.

### 6.3.3 Analyse der Ergebnisse bei gleicher relativer Abweichung

Im Folgenden werden die Robustheitsanalysen für die Ersatzmodelle mit gleicher relativer Abweichung durchgeführt. Bei diesen Modellen ist auf Grund der aus den verschiedenen Modellen resultierenden aggregierten Zuliefererbewertungen ebenfalls die Optimalitätsrobustheit dieser Zielfunktion zu betrachten, was bei den vorherigen Modellen auf Grund des festgelegten Anspruchsniveaus hinsichtlich der relativen Abweichungen dieser Zielsetzung nicht erforderlich ist.

Bei den in Tabelle 6.23 dargestellten Ansätzen mit gleicher relativer Abweichung bei der Zielsetzungen weisen die Kompensationsmodelle im Gegensatz zu den Chance-Constrained-Modellen bei der erwarteten und insbesondere bei der maximalen unerfüllten Nachfrage die deutlich besseren Ergebnisse auf. Des Weiteren ist bei diesen Ansätzen die Zielsetzung der Minimierung des erwarteten relativen Bedauerns bei den Kompensationsmodellen (GA-K-MERB) besser geeignet, zulässigkeitsrobuste Lösungen zu erzeugen, da die erwartete und maximale unerfüllte Nachfrage bei diesen Lösungen deutlich kleiner ist als bei der Minimierung des maximalen relativen Bedauerns.

	unerf. Nachfrage		GDB		Bedauern GDB		rel. Bed. GDB		GBZ
	erw.	max.	min.	erw.	erw.	max.	erw.	max.	
GA-K-MMRB (200)	2.964	7.177	3.345.017	4.103.892	526.608	680.483	11,67%	16,90%	40.261
GA-K-MMRB (150)	3.425	8.390	3.351.160	4.081.270	549.230	<b>674.340</b>	12,10%	16,75%	39.646
GA-K-MMRB (100)	4.044	10.090	3.353.008	4.044.194	586.306	726.888	12,83%	<b>16,71%</b>	38.821
GA-C-MMRB (0,75)	5.125	20.500	3.212.000	3.867.000	763.500	1.440.500	16,01%	25,98%	<b>38.675</b>
GA-K-MERB (200)	<b>1.685</b>	<b>4.239</b>	3.343.484	<b>4.182.023</b>	<b>448.477</b>	682.017	<b>10,09%</b>	16,94%	41.971
GA-K-MERB (150)	1.940	5.259	3.345.518	4.168.758	461.742	679.982	10,32%	16,89%	41.635
GA-K-MERB (100)	2.277	6.608	3.348.216	4.151.221	479.279	677.284	10,62%	16,82%	41.189
GA-C-MERB (0,75)	4.334	17.335	<b>3.376.844</b>	4.055.942	574.558	1.105.262	12,05%	19,94%	39.836
<b>Best</b>	<b>1.685</b>	<b>4.239</b>	<b>3.376.844</b>	<b>4.182.023</b>	<b>448.477</b>	<b>674.340</b>	<b>10,09%</b>	<b>16,71%</b>	<b>38.675</b>

	GBZ	Bedauern GBZ		rel. Bed. GBZ	
		erw.	max.	erw.	max.
GA-K-MMRB (200)	40.261	4.154	10.394	12,98%	34,80%
GA-K-MMRB (150)	39.646	3.693	9.778	11,63%	32,74%
GA-K-MMRB (100)	38.821	3.074	8.954	9,83%	29,98%
GA-C-MMRB (0,75)	<b>38.675</b>	<b>2.964</b>	<b>8.808</b>	<b>9,51%</b>	<b>29,49%</b>
GA-K-MERB (200)	41.971	5.437	12.104	16,72%	40,52%
GA-K-MERB (150)	41.635	5.184	11.767	15,98%	39,40%
GA-K-MERB (100)	41.189	4.850	11.322	15,01%	37,91%
GA-C-MERB (0,75)	39.836	3.835	9.969	12,05%	33,38%
<b>Best</b>	<b>38.675</b>	<b>2.964</b>	<b>8.808</b>	<b>9,51%</b>	<b>29,49%</b>

**Tabelle 6.23: Ergebnisse der Modelle mit gleicher Abweichung**

Die kleinsten Werte bei der unerfüllten Nachfrage weist das Modell GA-K-MERB (200) auf, welches ebenfalls die besten Werte hinsichtlich des erwarteten Gesamtdeckungsbeitrags und des erwarteten absoluten und relativen Bedauerns des Gesamtdeckungsbeitrags zeigt. Im Gegensatz dazu weist dieses Modell (GA-K-MERB (200)) die schlechtesten Werte hinsichtlich der Optimalitätsrobustheit der Zielsetzung der aggregierten Zuliefererbewertung auf. Die besten Ergebnisse der Analysemaße der erweiterten Zuliefererbewertung hat das Modell GA-C-MMRB (0,75), welches die schlechtesten Werte bei der unerfüllten Nachfrage und bei den Analysemaßen zur Bewertung der Optimalitätsrobustheit hinsichtlich der Zielsetzung der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags hat. Dies zeigt deutlich, dass die Zulässigkeitsrobustheit und die Optimalitätsrobustheit hinsichtlich des Gesamtdeckungsbeitrags in einem Zielkonflikt zur Optimalitätsrobustheit der Zielsetzung der aggregierten Zuliefererbewertung stehen. Ziel dieser Untersuchung ist daher die Ermittlung einer Kompromiss-



lösung, die als zulässigkeitsrobust und für beide Zielsetzungen als optimalitätsrobust und damit insgesamt als zielrobust bezeichnet werden kann.

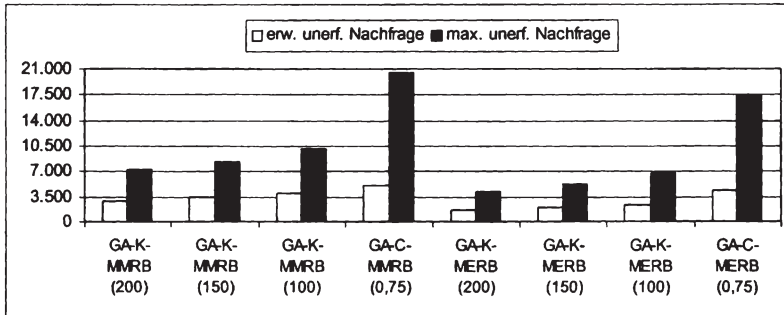


Abbildung 6.18: Unerfüllte Nachfrage der Modelle mit gleicher Abweichung

Die in Abbildung 6.18 visualisierte unerfüllte Nachfrage steigt erwartungsgemäß mit sinkenden Strafkosten und ist bei den Chance-Constrained-Modellen mit einer Zulässigkeitswahrscheinlichkeit von 0,75 am größten. Darüber hinaus ist sowohl die maximale als auch die erwartete unerfüllte Nachfrage bei den Modellen, die das erwartete relative Bedauern minimieren, kleiner als bei den entsprechenden Modellen, die das maximale relative Bedauern minimieren. Da die maximale unerfüllte Nachfrage bei den Chance-Constrained-Modellen deutlich über 15.000 Einheiten liegt, werden diese Modelle im Rahmen der Robustheitsbetrachtungen nicht weiter berücksichtigt.

Das absolute Bedauern als Maß für die Abweichung von den szenariooptimalen Werten und damit für die Optimalitätsrobustheit ist für die Zielsetzung der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags in Abbildung 6.19 und für die Zielsetzung der aggregierten Zuliefererbewertung in Abbildung 6.20 dargestellt.

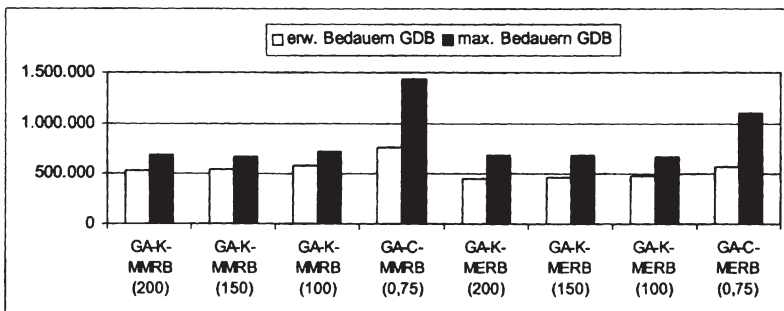
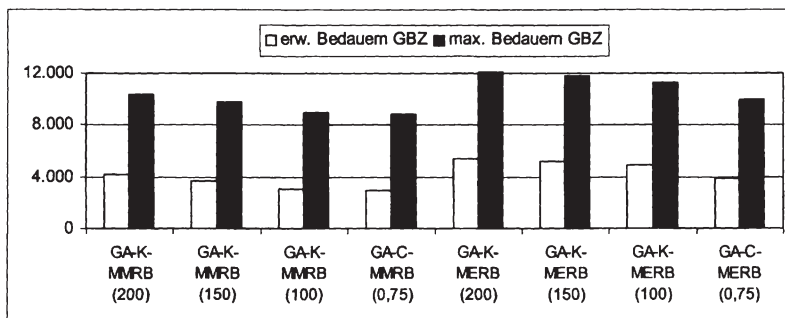


Abbildung 6.19: Absolutes Bedauern der Modelle mit gleicher Abweichung (GDB)

Das erwartete absolute Bedauern hinsichtlich der Zielsetzung der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags steigt leicht mit sinkenden Strafkosten. Sowohl das erwartete als auch das maximale absolute Bedauern der Chance-Constrained-Modelle liegt deutlich über den Werten der jeweiligen Kompensationsmodelle. Dies unterstützt die These, dass diese Modelle für die Erzeugung einer robusten Lösung bei Mehrfachzielsetzung und der hier vorliegenden Datenstruktur eher ungeeignet sind.

Im Gegensatz zu den Betrachtungen hinsichtlich der Zielsetzung der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags weisen die Chance-Constrained-Modelle mit einer Zulässigkeitswahrscheinlichkeit von 0,75 auf Grund der hohen unerfüllten Nachfrage und der damit verbundenen geringeren zu beschaffenden Mengen einen guten Wert hinsichtlich des Bedauerns bei der zweiten Zielsetzung auf.

Die Darstellung in Abbildung 6.20 zeigt, dass die besten Werte bei den Modellen GA-C-MMRB (0,75) und GA-K-MMRB (100) zu finden sind, wobei sich die Ergebnisse dieser Modelle nur geringfügig unterscheiden. Darüber hinaus kann festgestellt werden, dass die Modelle, die das erwartete relative Bedauern minimieren, tendenziell schlechter abschneiden als die entsprechenden Modelle, die das maximale relative Bedauern minimieren.



**Abbildung 6.20: Absolutes Bedauern der Modelle mit gleicher Abweichung (GBZ)**

Das kumulierte relative Bedauern, das die jeweiligen Analysemaße beider Zielsetzungen integriert, ist in Abbildung 6.21 visualisiert. Es zeigt sich, dass das Modell GA-K-MMRB (100) sowohl für das erwartete als auch für das maximale kumulierte Bedauern die besten Werte aufweist und das, obwohl dieses Modell lediglich beim maximalen relativen Bedauern der Zielsetzung der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags den besten Wert aufweist. Die schlechtesten Werte erzeugt das Modell GA-K-MERB (200) mit einem maximalen kumulierten Bedauern von etwa 58% und einem erwarteten kumulierten Bedauern von nahezu 27%.

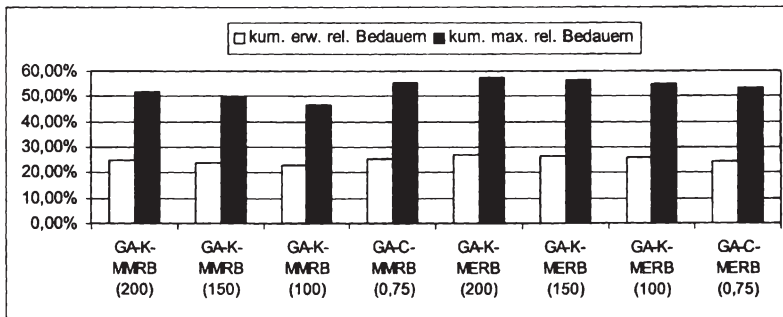


Abbildung 6.21: Kumuliertes relatives Bedauern der Modelle mit gleicher Abweichung

Da die Chance-Constrained-Modelle sehr schlechte Werte bei der unerfüllten Nachfrage aufweisen, werden im Folgenden die verbleibenden Kompensationsmodelle hinsichtlich ihrer Eignung zur Erzeugung robuster Lösungen bei der hier vorliegenden Problemstellung analysiert. Zu diesem Zweck sind in Tabelle 6.24 die relativen Abweichungen vom jeweils besten Wert eines Analysemaßes dargestellt.

	unerf. Nachfrage		GDB		Bedauern GDB		rel. Bed. GDB		GBZ
	erw.	max.	min.	erw.	erw.	max.	erw.	max.	
GA-K-MMRB (200)	75,95%	69,31%	0,24%	1,87%	17,42%	0,91%	15,67%	1,19%	3,71%
GA-K-MMRB (150)	103,29%	97,92%	0,06%	2,41%	22,47%	0,00%	19,99%	0,27%	2,12%
GA-K-MMRB (100)	140,04%	138,03%	0,00%	3,30%	30,73%	7,79%	27,18%	0,00%	0,00%
GA-K-MERB (200)	0,00%	0,00%	0,28%	0,00%	0,00%	1,14%	0,00%	1,42%	8,11%
GA-K-MERB (150)	15,14%	24,06%	0,22%	0,32%	2,96%	0,84%	2,29%	1,11%	7,25%
GA-K-MERB (100)	35,15%	55,89%	0,14%	0,74%	6,87%	0,44%	5,33%	0,71%	6,10%

	Bedauern GBZ		rel. Bed. GBZ		kum. rel. Bed.	
	erw.	max.	erw.	max.	erw.	max.
GA-K-MMRB (200)	35,13%	16,08%	32,00%	16,08%	8,76%	10,75%
GA-K-MMRB (150)	20,13%	9,21%	18,33%	9,21%	4,75%	6,01%
GA-K-MMRB (100)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
GA-K-MERB (200)	76,86%	35,18%	70,02%	35,18%	18,28%	23,10%
GA-K-MERB (150)	68,65%	31,42%	62,53%	31,42%	16,05%	20,58%
GA-K-MERB (100)	57,78%	26,45%	52,64%	26,45%	13,11%	17,24%

Tabelle 6.24: Relative Abweichungen von den besten möglichen Ausprägungen (GA)

### Zulässigkeitsrobustheit

Die einzige Lösung, die als zulässigkeitsrobust bezeichnet werden kann, erzeugt das Modell GA-K-MERB (200). Alle weiteren Modelle weisen mindestens eine relative Abweichung von 15,14% und maximal eine relative Abweichung von 140,04% von dieser besten Lösung auf.

### Optimalitätsrobustheit GDB

Die relative Abweichung von den besten möglichen Ausprägungen hinsichtlich des minimalen und erwarteten Gesamtdeckungsbeitrags liegt bei allen zu analysierenden

Modellen bei maximal 3,3%, so dass hinsichtlich dieses Analysemaßes alle Lösungen als optimalitätsrobust charakterisiert werden können. Wird hinsichtlich des absoluten und relativen Bedauerns eine maximale relative Abweichung von den besten möglichen Werten von 7% zu Grunde gelegt, so sind alle Modelle, die das erwartete relative Bedauern minimieren, als optimalitätsrobust hinsichtlich des Gesamtdeckungsbeitrags zu bezeichnen.

#### *Optimalitätsrobustheit GBZ*

Wird als Maß für die Optimalitätsrobustheit der aggregierten Zuliefererbewertung der Zielfunktionswert dieser Zielfunktion herangezogen, so können die Lösungen der Modelle, die das maximale relative Bedauern minimieren, als optimalitätsrobust bezeichnet werden, wenn die relative Abweichung von der besten möglichen Ausprägung nicht mehr als 4% betragen soll. Bei einer Grenze von 8,5% sind alle Lösungen als optimalitätsrobust zu kennzeichnen. Das Analysemaß des absoluten oder relativen Bedauerns liefert bei diesen Grenzwerten lediglich die Ergebnisse des Modells GA-K-MMRB (100) als optimalitätsrobuste Lösung hinsichtlich dieser Zielsetzung, da alle weiteren Lösungen relative Abweichungen von mindestens 9,21% und maximal 76,86% beinhalten.

Da die einzelnen Betrachtungen der Optimalitätsrobustheit kein gemeinsames Ergebnis liefern, wird im Folgenden das kumulierte relative Bedauern als Analysemaß für die Zielrobustheit herangezogen.

#### *Zielrobustheit*

Das erwartete und maximale kumulierte Bedauern als Maß für die Zielrobustheit liefert bei einer maximalen relativen Abweichung von etwa 6% die Modelle GA-K-MMRB mit Strafkosten von 100 und 150 als zielrobuste Lösungen. Es zeigt sich jedoch, dass gerade diese Modelle über eine sehr hohe erwartete unerfüllte Nachfrage verfügen und deshalb als nicht zulässigkeitsrobust charakterisiert wurden.

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass die Ersatzmodelle mit gleicher relativer Abweichung zu keiner eindeutigen Lösung führen, die sowohl als zulässigkeitsrobust als auch als zielrobust charakterisiert werden kann. Die in Tabelle 6.24 fett gekennzeichneten Modelle sind entweder zulässigkeitsrobust oder zielrobust, d. h. an dieser Stelle müssen weitere Präferenzen des Entscheiders einfließen, beispielsweise in der Form, dass die unerfüllte Nachfrage durch Zukäufe erfüllt werden kann und deshalb die zielrobuste Lösung bevorzugt wird. Da ohne zusätzliche Angaben des Entscheiders keine Lösung zu ermitteln ist, wird an dieser Stelle auf die Darstellung der verschiedenen Lösungen verzichtet.

### 6.3.4 Analyse der Ergebnisse bei Gewichtung der Ziele

Nachfolgend werden die durch Zielgewichtung ermittelten Lösungen analysiert. Bei diesen Modellen ist jedoch zwingend zu beachten, dass es sich bei den Zielgewichten um Substitutionsraten handelt, d. h. die Bewertungen des Entscheiders hinsichtlich der Zulieferer müssen kardinal messbar sein. Für die folgenden Auswertungen werden daher eine kardinale Messung der Zuliefererbewertungen sowie eine Zielgewichtung der Ziele von 0,75 und 0,25 des Entscheiders angenommen. Diese Zielgewichtung impliziert, dass das Ziel der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags dreimal so wichtig ist wie das Ziel der aggregierten Zuliefererbewertung.

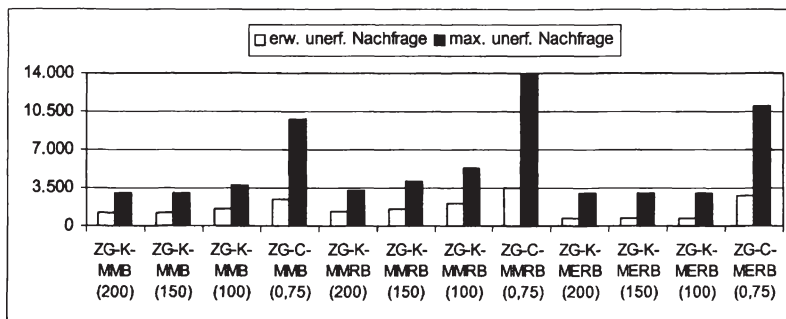
	unerf. Nachfrage		GDB		Bedauern GDB		rel. Bed. GDB		GBZ
	erw.	max.	min.	erw.	erw.	max.	erw.	max.	
ZG-K-MMB (200)	1.228	<b>3.000</b>	3.575.055	4.452.787	182.352	450.445	4,36%	11,19%	56.492
ZG-K-MMB (150)	1.223	<b>3.000</b>	3.603.060	<b>4.476.335</b>	<b>158.555</b>	422.440	<b>3,81%</b>	10,49%	61.510
ZG-K-MMB (100)	1.545	3.763	3.609.280	4.458.745	171.755	416.220	4,06%	10,34%	61.402
ZG-C-MMB (0,75)	2.446	9.783	<b>3.615.283</b>	4.406.913	223.587	<b>410.217</b>	4,81%	<b>10,19%</b>	61.287
ZG-K-MMRB (200)	1.283	3.297	3.349.774	4.213.900	416.600	675.726	9,44%	16,79%	42.897
ZG-K-MMRB (150)	1.583	4.071	3.353.442	4.198.702	431.798	672.058	9,73%	16,70%	42.396
ZG-K-MMRB (100)	2.061	5.350	3.356.412	4.171.885	458.616	669.088	10,25%	16,62%	41.701
ZG-C-MMRB (0,75)	3.493	13.973	3.368.433	4.099.726	530.774	904.894	11,29%	16,32%	<b>40.677</b>
ZG-K-MERB (200)	<b>750</b>	<b>3.000</b>	3.340.000	4.238.875	391.625	685.500	8,89%	17,03%	44.060
ZG-K-MERB (150)	<b>750</b>	<b>3.000</b>	3.340.000	4.238.875	391.625	685.500	8,89%	17,03%	44.060
ZG-K-MERB (100)	<b>750</b>	<b>3.000</b>	3.335.000	4.233.875	396.625	690.500	9,00%	17,15%	43.960
ZG-C-MERB (0,75)	2.750	11.000	3.445.000	4.222.375	408.125	644.000	8,79%	14,42%	43.660
<b>Best</b>	<b>750</b>	<b>3.000</b>	<b>3.615.283</b>	<b>4.476.335</b>	<b>158.555</b>	<b>410.217</b>	<b>3,81%</b>	<b>10,19%</b>	<b>40.677</b>

	Bedauern GBZ		rel. Bed. GBZ	
	erw.	max.	erw.	max.
ZG-K-MMB (200)	19.535	26.624	55,79%	89,14%
ZG-K-MMB (150)	24.553	31.643	69,63%	105,94%
ZG-K-MMB (100)	24.445	31.534	69,33%	105,58%
ZG-C-MMB (0,75)	24.330	31.419	69,02%	105,20%
ZG-K-MMRB (200)	6.131	13.030	18,74%	43,62%
ZG-K-MMRB (150)	5.755	12.528	17,64%	41,95%
ZG-K-MMRB (100)	5.234	11.833	16,12%	39,62%
ZG-C-MMRB (0,75)	<b>4.466</b>	<b>10.809</b>	<b>13,89%</b>	<b>36,19%</b>
ZG-K-MERB (200)	7.103	14.193	21,51%	47,52%
ZG-K-MERB (150)	7.103	14.193	21,51%	47,52%
ZG-K-MERB (100)	7.003	14.093	21,23%	47,18%
ZG-C-MERB (0,75)	6.703	13.793	20,41%	46,18%
<b>Best</b>	<b>4.466</b>	<b>10.809</b>	<b>13,89%</b>	<b>36,19%</b>

Tabelle 6.25: Ergebnisse der Zielgewichtungsmodelle

Die Analyse der in Tabelle 6.25 dargestellten Ergebnisse der Zielgewichtungsansätze verdeutlicht, dass die Kompensationsansätze mit der Ersatzzielfunktion der gewichteten Minimierung des erwarteten relativen Bedauerns (ZG-K-MERB) unabhängig von der Höhe der Strafkosten hinsichtlich der unerfüllten Nachfrage die besten Ergebnisse erzielen. Die besten Ergebnisse bei den Chance-Constrained-Modellen weist das Modell ZG-C-MMB (0,75) auf, wobei die erwartete und die maximale unerfüllte Nachfrage dennoch etwa dreimal so hoch sind wie bei den besten möglichen Ergebnissen der Modelle ZG-K-MERB. Die besten Ergebnisse der Zielsetzung der Gesamtde-

ckungsbeitragsmaximierung sind bei den Modellen, die das maximale Bedauern minimieren, zu finden. Das Modell ZG-K-MMB (150) hat die besten Ausprägungen bei den erwarteten Werten und das Modell ZG-C-MMB (0,75) bei dem minimal erreichbaren Gesamtdeckungsbeitrag und dem erwarteten absoluten und relativen Bedauern. Die besten Ergebnisse hinsichtlich der Zielsetzung der aggregierten Zuliefererbewertung liefert das Modell ZG-C-MMRB (0,75), welches ähnlich wie bei den Modellen der gleichen relativen Abweichung die höchste erwartete und maximale unerfüllte Nachfrage aufweist.



**Abbildung 6.22: Unerfüllte Nachfrage der Zielgewichtungsmodele**

Bei den Zielgewichtungsmodelele ist in Abbildung 6.22 ebenfalls ersichtlich, dass die Chance-Constrained-Modelle mit einer Zulässigkeitswahrscheinlichkeit von 0,75 hinsichtlich der maximalen und der erwarteten unerfüllten Nachfrage deutlich größere Werte aufweisen als die entsprechenden Kompensationsmodelle. Darüber hinaus zeigt sich bei der vorliegenden Problemstruktur, dass die Kompensationsmodelle, welche das erwartete relative Bedauern minimieren, die besten Ergebnisse aufweisen. Bei den Modellen, die das maximale absolute oder relative Bedauern minimieren, zeigt sich der Effekt, dass die unerfüllten Nachfragen mit sinkenden Strafkosten steigen.

Die Modelle ZG-K-MERB, die unabhängig von den Strafkosten die kleinsten unerfüllten Nachfragen aufweisen, haben nach dem Chance-Constrained-Modell ZG-C-MMRB (0,75) das größte maximale Bedauern hinsichtlich der Zielsetzung der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags. Wie in Abbildung 6.23 visualisiert, ist das erwartete Bedauern jedoch kleiner als bei den Kompensationsmodellen ZG-K-MMRB. Die besten Ausprägungen haben die Modelle, die das maximale Bedauern minimieren.

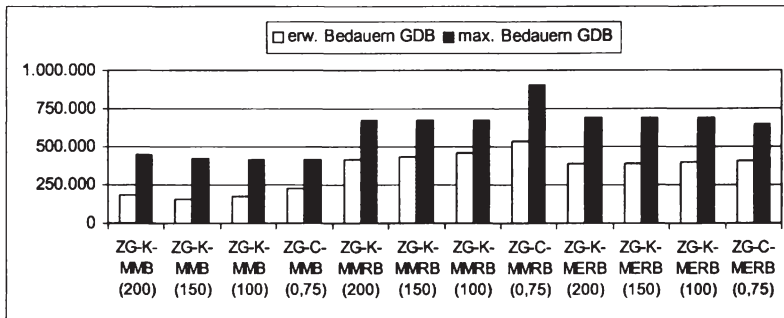


Abbildung 6.23: Absolutes Bedauern der Zielgewichtungsmodele (GDB)

Das erwartete und maximale Bedauern der zweiten Zielsetzung weist, wie in Abbildung 6.24 dargestellt, die größten und damit schlechtesten Werte bei den Modellen auf, die das maximale Bedauern minimieren. Da diese Modelle bei der ersten Zielsetzung der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags die geringsten und damit besten Ausprägungen hinsichtlich des absoluten Bedauerns haben, ist im Folgenden ein Analysemaß für die simultane Betrachtung der Optimalitätsrobustheit beider Zielsetzungen und damit der Zielrobustheit zu betrachten.

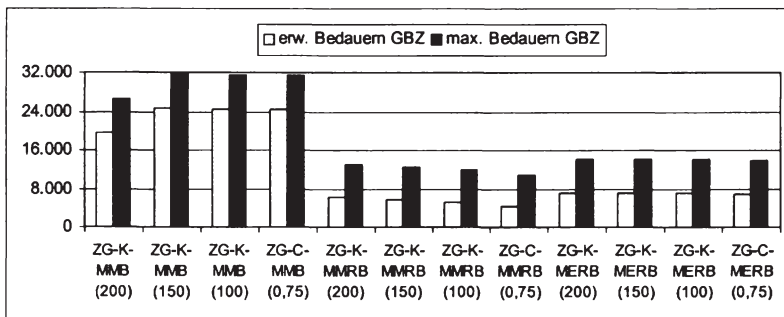


Abbildung 6.24: Absolutes Bedauern der Zielgewichtungsmodele (GBZ)

Um ein Maß für die Zielrobustheit zu erhalten, werden die erwarteten und maximalen relativen Abweichungen von den jeweiligen szenariooptimalen Zielfunktionen betrachtet. Unter der Prämisse, dass die Zielsetzung der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrages als dreimal so wichtig erachtet wird wie die erweiterte Zuliefererbewertung, kann ein Analysemaß für die Bewertung der Zielrobustheit durch die Summe der Multiplikation des maximalen relativen Bedauerns hinsichtlich des Gesamtdeckungsbeitrags mit 0,75 und des maximalen relativen Bedauerns hinsichtlich der aggregierten Zuliefererbewertung mit 0,25 ermittelt werden. Analog ist eine Berech-

nung des kumulierten erwarteten relativen Bedauerns möglich. Die auf diese Weise errechneten Werte für die verschiedenen Modelle sind in Abbildung 6.25 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Modelle, die das maximale Bedauern minimieren, trotz der guten Ausprägungen bei dem absoluten Bedauern der Zielsetzung der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags bei den Analysemaßen für die Zielrobustheit die schlechtesten Werte aufweisen. Hinsichtlich des erwarteten kumulierten relativen Bedauerns haben die verbleibenden Modelle ähnliche Ausprägungen. Bei dem maximalen kumulierten relativen Bedauern sind die Modelle ZG-K-MERB leicht schlechter.

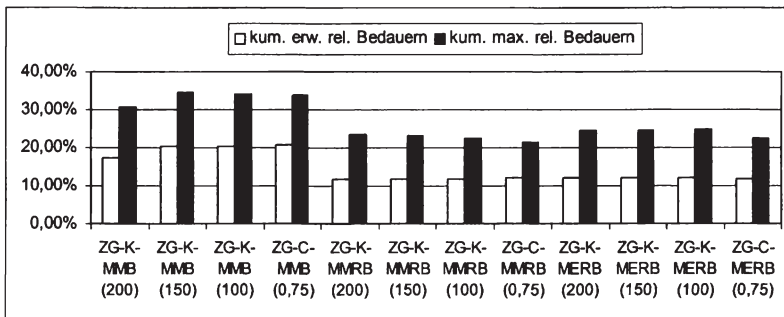


Abbildung 6.25: Gewichtetes kumuliertes relatives Bedauern (ZG)

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass die Chance-Constrained-Modelle auf Grund der hohen unerfüllten Nachfrage und die Kompensationsmodelle ZG-K-MMB auf Grund des hohen kumulierten relativen Bedauerns bei den folgenden Analysen zur Ermittlung einer robusten Supply Chain nicht weiter betrachtet werden. Die relativen Abweichungen von den besten möglichen Werten eines Analysemaßes der verbleibenden Modelle sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

	unerf. Nachfrage		GDB		Bedauern GDB		rel. Bed. GDB		GBZ
	erw.	max.	min.	erw.	erw.	max.	erw.	max.	
ZG-K-MMRB (200)	71,10%	9,90%	0,20%	0,59%	6,38%	0,99%	6,14%	0,99%	2,87%
ZG-K-MMRB (150)	111,03%	35,70%	0,09%	0,95%	10,26%	0,44%	9,42%	0,44%	1,67%
ZG-K-MMRB (100)	174,80%	78,33%	0,00%	1,58%	17,11%	0,00%	15,28%	0,00%	0,00%
ZG-K-MERB (200)	0,00%	0,00%	0,49%	0,00%	0,00%	2,45%	0,00%	2,45%	5,66%
ZG-K-MERB (150)	0,00%	0,00%	0,49%	0,00%	0,00%	2,45%	0,00%	2,45%	5,66%
ZG-K-MERB (100)	0,00%	0,00%	0,64%	0,12%	1,28%	3,20%	1,23%	3,20%	5,42%

	Bedauern GBZ		rel. Bed. GBZ		kum. rel. Bed.	
	erw.	max.	erw.	max.	erw.	max.
ZG-K-MMRB (200)	17,15%	10,11%	16,22%	10,11%	0,48%	5,03%
ZG-K-MMRB (150)	9,96%	5,88%	9,42%	5,88%	0,00%	2,85%
ZG-K-MMRB (100)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,10%	0,00%
ZG-K-MERB (200)	35,72%	19,94%	33,40%	19,94%	2,89%	10,20%
ZG-K-MERB (150)	35,72%	19,94%	33,40%	19,94%	2,89%	10,20%
ZG-K-MERB (100)	33,81%	19,09%	31,69%	19,09%	3,00%	10,24%

Tabelle 6.26: Relative Abweichungen von den besten möglichen Ausprägungen (ZG)



### *Zulässigkeitsrobustheit*

Die Zulässigkeitsrobustheit wird wie bei den Ansätzen, die lediglich eine Zielsetzung berücksichtigen, durch die erwartete und maximale unerfüllte Nachfrage abgebildet. Es zeigt sich, dass die relativen Abweichungen von den besten Ausprägungen der Modelle ZG-K-MERB mit 3.000 für die maximale unerfüllte Nachfrage und 750 für die erwartete unerfüllte Nachfrage insbesondere bei der erwarteten unerfüllten Nachfrage teilweise sehr groß sind. So weist das Modell ZG-K-MMRB (200) eine relative Abweichung von 71,1% hinsichtlich der kleinsten erwarteten unerfüllten Nachfrage auf. Ein Wert, der sehr hoch ist, obwohl es sich absolut lediglich um eine erwartete unerfüllte Nachfrage von etwa 1.300 Einheiten handelt, so dass alle Modelle mit einer Abweichung von der besten erwarteten unerfüllten Nachfrage sehr hohe relative Abweichungen aufweisen. Es scheint somit sinnvoll, trotz der hohen relativen Abweichung die Modelle ZG-K-MMRB (200) und ZG-K-MMRB (150) ebenfalls als zulässigkeitsrobust zu charakterisieren.

### *Optimalitätsrobustheit GDB*

Als Maß der Optimalitätsrobustheit für die Zielsetzung der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags werden der minimale und der erwartete Gesamtdeckungsbeitrag betrachtet. Wird die maximale relative Abweichung von den besten Werten auf etwa 1,6% festgelegt, so können alle Modelle als optimalitätsrobust hinsichtlich des Gesamtdeckungsbeitrags bezeichnet werden. Wird darüber hinaus das Bedauern als Maß für die Optimalitätsrobustheit hinsichtlich dieser Zielsetzung verwendet, so können die Modelle ZG-K-MERB (200) und ZG-K-MERB (150) als optimalitätsrobust bezeichnet werden, da diese über eine maximale relative Abweichung hinsichtlich der besten Ausprägungen von 2,5% verfügen.

### *Optimalitätsrobustheit GBZ*

Die Optimalitätsrobustheit der aggregierten Zuliefererbewertung wird auf Grund der Unabhängigkeit dieser Zielsetzung von den Entscheidungen der zweiten Stufe nicht mittels des erwarteten und schlechtesten möglichen Wert, sondern auf Grund des erwarteten und des maximalen absoluten und relativen Bedauerns analysiert. Wird dann wie bei einer Zielsetzung in Abschnitt 6.2.2 eine maximale relative Abweichung von 5% zugelassen, so kann lediglich die Lösung des Modells ZG-K-MMRB (100) als optimalitätsrobust hinsichtlich dieser Zielsetzung bezeichnet werden. Da diese einzelnen Betrachtungen der Optimalitätsrobustheit der verschiedenen Zielsetzungen zu keiner eindeutigen Lösung führen, werden die Analysen zur Optimalitätsrobustheit durch die nachfolgenden Analysen der Zielrobustheit ersetzt.

### Zielrobustheit

Als aggregiertes Optimalitätsrobustheitsmaß für die simultane Berücksichtigung beider Zielsetzungen kann das gewichtete kumulierte relative Bedauern herangezogen werden. Wird dann die Abweichung von den besten möglichen Ausprägungen auf etwa 5% festgelegt, so sind die Modelle, die das maximale relative Bedauern minimieren, als zielrobust zu charakterisieren. Die Modelle ZG-K-MMRB (200) und ZG-K-MMRB (150) können dann zusammenfassend sowohl als zulässigkeits- als auch als zielrobust charakterisiert werden. Im Folgenden wird die Struktur der Supply Chain der als zulässigkeitsrobust und zielrobust charakterisierten Lösungen der Modelle ZG-K-MMRB (200) und ZG-K-MMRB (150) dargestellt.

	ZG-K-MMRB (200)	ZG-K-MMRB (150)
<b>Produktionsstandorte</b>	Standort 4 im Modus 5	Standort 4 im Modus 5
<b>Lager</b>	Standort 3 im Modus 1 Standort 4 im Modus 18 Standort 5 im Modus 1	Standort 3 im Modus 1 Standort 4 im Modus 18 Standort 5 im Modus 1
<b>Beschaffungsmengen <math>z_3</math></b>	$r_1$ : 25.000 $r_2$ : 25.000 $r_3$ : 25.000 $r_4$ : 25.000	$r_1$ : 25.000 $r_2$ : 25.000 $r_3$ : 25.000 $r_4$ : 25.000
<b>Beschaffungsmengen <math>z_4</math></b>	$r_3$ : 23.000 $r_4$ : 8.164	$r_3$ : 23.000 $r_4$ : 7.740
<b>Beschaffungsmengen <math>z_5</math></b>	$r_1$ : 46.703 $r_2$ : 8.164	$r_1$ : 45.929 $r_2$ : 7.740

**Tabelle 6.27: Struktur der robusten Supply Chain bei Mehrfachzielsetzung (ZG)**

Als Produktionsstandort wird der Standort 4 festgelegt, der im Modus 5 betrieben werden soll. Darüber hinaus werden an den Standorten 3, 4 und 5 Lager errichtet und die Zulieferer 3, 4 und 5 zur Belieferung mit Rohstoffen ausgewählt. Die aus den verschiedenen Lösungen resultierende Struktur der Supply Chain ist in Tabelle 6.27 dargestellt.

Es ist ersichtlich, dass die Lösungen sich lediglich in den zu beschaffenden Mengen unterscheiden. So werden bei der Lösung des Modells mit Strafkosten in Höhe von 200 von den Rohstoffen  $r_2$  und  $r_4$  424 Einheiten und von dem Rohstoff  $r_1$  774 Einheiten mehr beschafft als bei der Lösung des Modells mit Strafkosten in Höhe von 150. Dies führt bei Realisierung der Nachfrage des zweiten Szenarios bei dem Modell mit Strafkosten in Höhe von 150 zu einer zusätzlichen unerfüllten Nachfrage von 514 Einheiten von  $p_1$  und 260 Einheiten von  $p_2$  sowie je 164 Einheiten weniger der zu viel bestellten Einheiten der Rohstoffe  $r_2$  und  $r_4$  gegenüber der Lösung des anderen Modells. Darüber hinaus resultiert in Szenario 4 bei der Lösung des Modells ZG-K-

MMRB (150) von Produkt  $p_2$  424 Einheiten zusätzliche unerfüllte Nachfrage und von Rohstoff  $r_1$  eine zusätzliche Menge zu viel beschaffter Rohstoffe von 350.

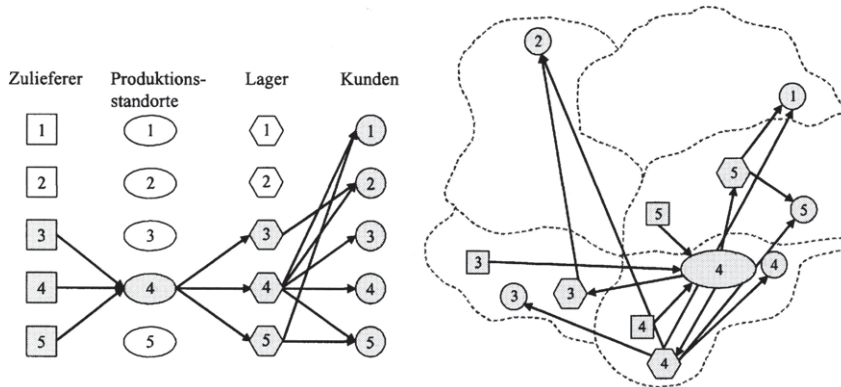


Abbildung 6.26: Struktur der robusten Lösung (ZG)

Im Vergleich mit der robusten Struktur der Supply Chain, die aus der Lösung der Modelle mit Anspruchsniveau resultiert, weisen die als robust charakterisierten Lösungen der Zielgewichtungsmodele, die in Abbildung 6.26 dargestellt sind, ein zusätzliches Lager und deutlich höhere Beschaffungsmengen auf, die jedoch ebenfalls von den Zulieferern  $z_3$ ,  $z_4$  und  $z_5$  beschafft werden. Die geringeren Beschaffungsmengen der robusten Lösungen der Modelle mit Anspruchsniveau führen jedoch im Gegensatz zu den robusten Lösungen der Zielgewichtungsmodele zu deutlich höheren möglichen unerfüllten Nachfragen.

Im Vergleich mit der robusten Lösung bei der einzelnen Zielsetzung der Maximierung des gesamten Deckungsbeitrags werden nicht nur andere Zulieferer ausgewählt, sondern ebenfalls ein anderer Produktionsstandort und andere Lager. Ein Vergleich von Tabelle 6.22 und Tabelle 6.27 mit Tabelle 6.14 veranschaulicht, dass lediglich der Lagerstandort 5 mit einem Kapazitätsmodus von 1 in beiden robusten Lösungen zu finden ist. Dieses Beispiel illustriert folglich, dass die für eine Unternehmung wichtige Zielsetzung der Deckungsbeitragsmaximierung alleine nicht ausreicht, um weitreichende strategische Entscheidungen zu treffen. Die langfristige Zusammenarbeit, die mit strategischen Zulieferern geboten ist und eine fundierte Zuliefererauswahl voraussetzt, kann die Struktur einer Supply Chain entscheidend beeinflussen. Wird die Struktur allein auf Grund des maximalen Gesamtdeckungsbeitrags festgelegt und daran anschließend doch andere Zulieferer auf Grund einer erweiterten Zielsetzung ausgewählt, so kann dies zu einer deutlichen Verschlechterung des Gesamtdeckungsbeitrags führen, die bei einer simultanen Planung vermieden werden kann.

### 6.3.5 Analyse der Ergebnisse bei a posteriori bekannten Präferenzen

Bei der a posteriori Integration der Präferenzen des Entscheiders kann durch eine visualisierte Darstellungen der Zusammenhänge etwa in Form von Trade-Off-Kurven die Entscheidungsfindung unterstützt werden. Um ausgesuchte Zusammenhänge zu verdeutlichen, wird das Kompensationsmodell, welches das maximale Bedauern bei Strafkosten von 200 minimiert, ausgewählt. Das Anspruchsniveau erfasst wie im vorherigen Abschnitt die maximale relative Abweichung von den szenariooptimalen Werten bei der Zielsetzung der erweiterten Zuliefererbewertung.

Die Festlegung eines Anspruchsniveaus kann beispielsweise durch die Visualisierung des Zusammenhangs zwischen dem Anspruchsniveau und dem damit verbundenen minimalen Gesamtdeckungsbeitrag unterstützt werden. So zeigt sich in Abbildung 6.27, dass der mindestens erreichte Gesamtdeckungsbeitrag bis zu einem Anspruchsniveau von 20% steigt, um dann bis zu einem Anspruchsniveau von 40% relativ konstant bei etwa 3.300.000 GE zu bleiben und dann wieder leicht anzusteigen. Dies zeigt dem Entscheider, dass eine Variation des Anspruchsniveaus zwischen 20% und 40% keine großen Auswirkungen auf den minimal erreichbaren Gesamtdeckungsbeitrag hat.

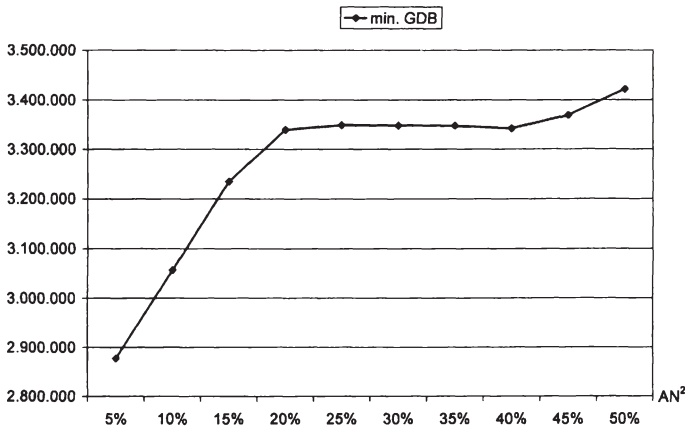


Abbildung 6.27: Minimaler Gesamtdeckungsbeitrag bei variierenden Anspruchsniveaus

Die erwartete und maximale unerfüllte Nachfrage in Abhängigkeit des Anspruchsniveaus ist in Abbildung 6.28 dargestellt. In dieser Abbildung zeigen sich nicht so deutlich verschiedene Nachfragebereiche. Dennoch ist ersichtlich, dass sowohl die maximale als auch die erwartete unerfüllte Nachfrage zwischen einem Anspruchsniveau von 5% und 15% stärker sinken als zwischen 20% und 25%. Darüber hinaus zeigt sich, dass die maximale und erwartete unerfüllte Nachfrage bis zu einem Anspruchsniveau von 35% etwa gleich stark fallen und zwischen 35% und 40% die

maximale unerfüllte Nachfrage deutlich stärker sinkt als die erwartete unerfüllte Nachfrage. Für den Entscheider heißt dies, dass Präferenzunsicherheiten zwischen 20% und 25% geringere Auswirkungen haben als zwischen 25% und 30%.

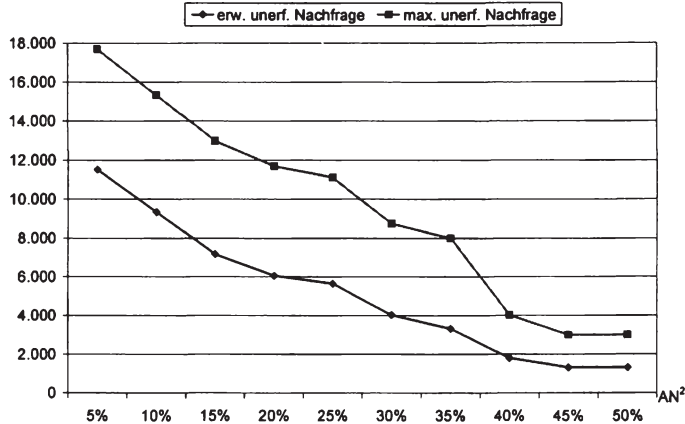


Abbildung 6.28: Unerfüllte Nachfrage bei variierenden Anspruchsniveaus

Das Vorgehen bei a posteriori Integration der Präferenzen des Entscheiders kann ferner exemplarisch anhand schwankender Zielgewichte verdeutlicht werden. Dafür wird eine Analyse zum Trade-Off der Zielsetzungen bei Verwendung des Optimalitätsrobustheitsmaßes Minimierung des maximalen relativen Bedauerns und schwankenden Zielgewichten durchgeführt. Die Zulässigkeitsrobustheit wird dabei durch Strafkosten in Höhe von 150 berücksichtigt.

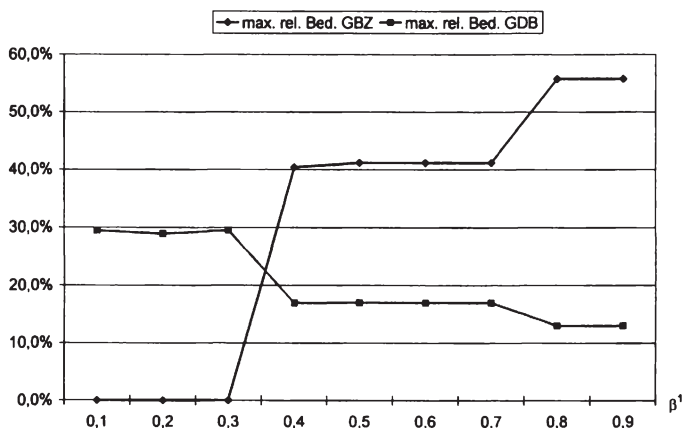
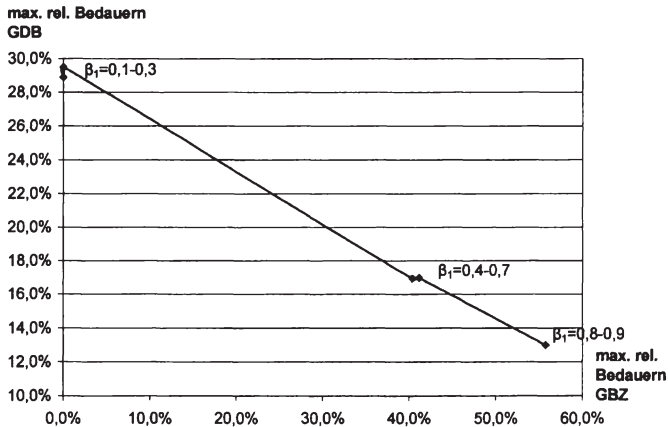


Abbildung 6.29: Trade-Off-Kurve Typ 1 zum maximalen relativen Bedauern

In Abbildung 6.29 und Abbildung 6.30 sind zwei Arten der Visualisierung des Zusammenhangs zwischen den Ausprägungen der Optimalitätsrobustheitsmaße der verschiedenen Zielsetzungen in Abhängigkeit von dem Gewicht des Optimalitätsrobustheitsmaßes des Gesamtdeckungsbeitrags  $\beta^1$  dargestellt. Die Summe der Zielgewichte beträgt eins, so dass das entsprechende Gewicht der Optimalitätsrobustheit der erweiterten Zuliefererbewertung gedanklich leicht ergänzt werden kann.



**Abbildung 6.30: Trade-Off-Kurve Typ 2 zum maximalen relativen Bedauern**

Es wird deutlich, dass die Optimalitätsrobustheitsmaße bis zu einem Gewicht von 0,3 für die Zielsetzung der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags konstant sind, zwischen 0,3 und 0,4 vermutlich schwanken und ab 0,4 bis 0,7 nur leichte Veränderungen des maximalen relativen Bedauerns verursachen. Erst bei einem Zielgewicht von 0,8 sind wieder deutliche Veränderungen zu beobachten, die bei 0,9 gleich bleiben. Ist der Entscheider hinsichtlich der Wichtigkeit der hier betrachteten Ziele unentschlossen, so sind aus der Betrachtung des maximalen relativen Bedauerns als Maß für die Optimalitätsrobustheit drei Gewichtungsbereiche ablesbar, zwischen denen der Entscheider wählen sollte.

Hinsichtlich der in Abbildung 6.31 dargestellten unerfüllten Nachfrage sind die Auswirkungen der variierten Zielgewichte lediglich zwischen 0,3 und 0,4 deutlich zu beobachten. Die maximale unerfüllte Nachfrage sinkt von etwa 23.000 Einheiten auf etwa 4.000 Einheiten und die erwartete unerfüllte Nachfrage von etwa 14.000 auf etwa 1.500 Einheiten. Die hinsichtlich des relativen Bedauerns zu beobachtenden Veränderungen zwischen 0,7 und 0,8 sind bei der unerfüllten Nachfrage fast nicht zu erkennen.

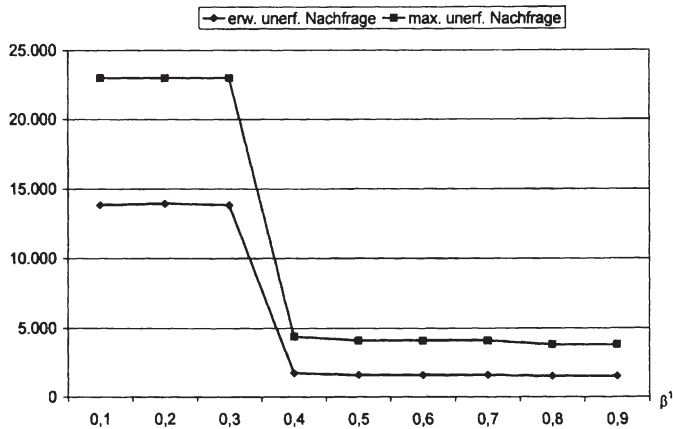


Abbildung 6.31: Unerfüllte Nachfrage bei schwankenden Zielgewichten

Insgesamt ist an dieser Stelle ersichtlich, dass ein iteratives Vorgehen in enger Abstimmung mit dem Entscheider die Ermittlung einer robusten Lösung erleichtert. Für ein solches iteratives Vorgehen sind beispielsweise zunächst die Bereiche der Zielgewichte zu ermitteln, in denen die Lösungen lediglich unwesentlich schwanken. Eine solche Trade-Off-Analyse kann den Entscheider bei der Bestimmung seiner Präferenzen unterstützen. Daran anschließend sind dann die Lösungen in dem ausgewählten Zielgewichtungsbereich zu analysieren und erneut dem Entscheider zu präsentieren. Auf diese Weise kann die Ermittlung einer robusten Lösung erleichtert, die Auswirkungen der Präferenzen des Entscheiders aufgezeigt und eine ggf. erforderliche Korrektur dieser ermöglicht werden.

#### 6.4 Kritische Würdigung

Die Ermittlung einer robusten Lösung hat das Ziel, eine Lösung zu finden, die für alle möglichen Umweltzustände zu guten Ergebnissen führt. Zu diesem Zweck sind zunächst die Optimalitätsrobustheit und die Zulässigkeitsrobustheit näher zu betrachten. Es hat sich gezeigt, dass bei einer einzelnen zu berücksichtigenden Zielfunktion bei der hier vorliegenden Problemstellung insbesondere die Kompensationsmodelle und die Chance-Constrained-Modelle mit einer Zulässigkeitswahrscheinlichkeit von 0,75 geeignet sind, robuste Lösungen zu erzeugen. Dies unterstützt zunächst die These, dass Modelle, die die Unsicherheit explizit berücksichtigen, einer Planung mit Modellen, die auf einzelnen Szenarien oder Erwartungswerten basieren, vorzuziehen sind. Des Weiteren wurden verschiedene Ersatzzielfunktionen, die die Abweichung von den szenariooptimalen Zielfunktionswerten betrachten, hinsichtlich ihrer Eignung zur Erzeugung robuster Lösungen bei der vorliegenden Problemstellung analysiert. Bei

der einfachen Zielsetzung der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags erzeugten vorrangig die Modelle, die das erwartete relative Bedauern minimieren, gute Ergebnisse. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass diese Modelle die Ausprägungen aller Szenarien in der Zielfunktion erfassen, wohingegen bei den anderen Zielfunktionen lediglich die schlechteste Ausprägung und damit ein Szenario die Lösung determiniert.

Die vorgestellten Ansätze zur Erfassung der Robustheit bei Mehrfachzielsetzung wurden neben der Zielsetzung der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags auf eine Hilfszielfunktion zur Erfassung der Zuliefererbewertung angewandt. Das für mehrfache Zielsetzungen entwickelte Konzept der Zielrobustheit erfasst simultan die Optimalitätsrobustheit beider Zielsetzungen und ersetzt auf diese Weise die einzelnen Analysen zur Optimalitätsrobustheit, die bei der vorliegenden Problemstruktur zu keinem gemeinsamen Ergebnis geführt haben. Die Anwendung der Ansätze gleicher relativer Abweichung war bei der vorgestellten Problemstellung nicht geeignet, eine insgesamt als robust zu bezeichnende Lösung zu erzeugen, da keine Lösung sowohl als zulässigkeits- als auch als zielrobust charakterisiert werden konnte. An dieser Stelle sind weitere Präferenzen des Entscheiders erforderlich, was wiederum die Vorteilhaftigkeit eines iterativen Vorgehens unterstreicht. Eine Übertragung des Konzeptes der Zielrobustheit auf andere Anwendungsbereiche mit Mehrfachzielsetzung ist insbesondere bei auf kardinaler Messung beruhenden Zielfunktionen möglich.

Neben dem Konzept der Zielrobustheit und der Entwicklung eines Robustheitsmaßes für die Zielrobustheit ist ein generelles Vorgehen zur Ermittlung robuster Lösungen vorgestellt worden. Ausgehend von den mit Hilfe der verschiedenen Ersatzmodelle generierten Lösungen erfolgt zunächst eine Verringerung der Anzahl zu analysierender Lösungen, indem die Lösungen, die besonders schlechte Werte bei einzelnen Analysemaßen aufweisen, von den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen werden. Die verbleibenden Lösungen sind dann hinsichtlich der relativen Abweichungen von den besten Ausprägungen eines Analysemaßes zu untersuchen. Es werden Grenzen festgelegt, die die maximalen relativen Abweichungen bestimmen, bis zu welchen eine Lösung hinsichtlich des mit dem Analysemaß verbundenen Robustheitskonzeptes als robust zu charakterisieren ist. Die Lösungen, die sowohl zulässigkeits- als auch zielrobust sind, werden daran anschließend auf Gemeinsamkeiten und Unterschiede untersucht, um dem Entscheider die endgültige Auswahl zu erleichtern.

Die umfangreichen durchgeführten Untersuchungen im Rahmen des neu eingeführten Konzeptes der Zielrobustheit sind für die Erzeugung einer robusten Lösung im Rahmen einer realen Problemstellung nicht alle erforderlich. So reicht es aus, entweder die



Modelle mit einem vorgegebenen Anspruchsniveau oder die Modelle mit gleicher relativer Abweichung oder die Zielgewichtungsmodelle zu Ermittlung einer robusten Lösung auszuwählen. Welcher der entwickelten Ansätze für eine konkrete Problemstellung geeignet ist, hängt von den Präferenzen des Entscheiders ab und in welcher Form diese angegeben werden können.

Insgesamt wurden zur Ermittlung einer robusten Lösung bei einer Zielsetzung 20 verschiedene Ersatzmodelle betrachtet, die für die Entscheidungen der ersten Stufe die Lösung je eines gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsmodells erfordern. Für die Entscheidung der zweiten Stufe sind je vier weitere gemischt-ganzzahlige lineare Optimierungsmodelle zu lösen, so dass insgesamt 100 Optimierungsmodelle gelöst wurden. Die Laufzeit der Modelle liegt auf einem Computer mit einem Pentium Prozessor mit 1,8GHz und 512 MB RAM für die deterministischen Modelle und die Entscheidungen der zweiten Stufe bei allen Modellen unter einer Sekunde. Insbesondere die Modelle für die Entscheidungen der ersten Stufe haben teilweise eine deutlich längere Laufzeit mit beispielsweise etwa 13 Minuten bei dem Modell K-MERB (100). Diese Laufzeiten sind jedoch auf Grund des strategischen Charakters der hier zu unterstützenden Planung zu rechtfertigen. Bei den Modellen zur Erzeugung einer robusten Lösung bei Mehrfachzielsetzung sind dann erneut ca. 150 Modelle gelöst worden, bei denen die Laufzeit der Modelle für die Entscheidungen der zweiten Stufe ebenfalls unter einer Sekunde liegt. Die Laufzeit der Modelle der ersten Stufe liegt beispielsweise bei dem Modell AN-K-MMRB (100) bei etwa 40 Sekunden, bei dem Modell GA-C-MMRB (0,75) bei 30 Sekunden und bei ZG-K-MERB (200) bei 10 Sekunden. Das Modell ZG-K-MERB beinhaltet inklusive aller Auswertungsvariablen etwa 700 ganzzahlige, 200 binäre und 1.000 reelle Variablen sowie etwa 850 Restriktionen. Das Laufzeitverhalten der Modelle ist neben der Modellstruktur von der Datenstruktur abhängig, so dass an dieser Stelle keine generellen Aussagen über das Laufzeitverhalten größerer Modelle gemacht werden können.



## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde die Planungs- und Entscheidungsunterstützung im Rahmen der Konfiguration einer Supply Chain untersucht. Die Konfiguration einer Supply Chain beinhaltet einerseits die Festlegung der räumlichen Struktur der Supply Chain und damit die Planung der Standorte und Kapazitäten sowie die Planung der damit verbundenen Materialflüsse und andererseits die Auswahl geeigneter Zulieferer. Auf Grund der mit einigen Zulieferern, etwa den Zulieferern von Schlüsselprodukten, angestrebten langfristigen Zusammenarbeit ist bereits während der Konfiguration der Supply Chain eine fundierte Auswahl dieser Zulieferer erforderlich. Die Auswahl sollte angesichts der Bedeutung wichtiger Zulieferer für den Unternehmungserfolg nicht ausschließlich auf den Preisen der zu beschaffenden Produkte beruhen.

Auf Grund der vielfältigen Interdependenzen zwischen den verschiedenen Ebenen einer Supply Chain kann die Planungsunterstützung während des Prozesses des Supply Chain Design mit Hilfe quantitativer Modelle erfolgen. Für die Auswahl bedeutender Zulieferer, mit denen eine langfristige Zusammenarbeit angestrebt wird, ist dann eine weitere Zielfunktion in die mathematischen Modelle zum Supply Chain Design zu integrieren. Eine weitere Anforderung an die Planungsunterstützung ist, eine Supply Chain derart zu gestalten, dass diese auch bei Unsicherheit möglichst gut den Zielvorstellungen des Entscheiders entspricht. Diese Eigenschaft, dass die zu ermittelnde Supply Chain bei verschiedenen Umweltentwicklungen gut geeignet ist, kann mit Hilfe des Robustheitskonzeptes berücksichtigt werden. Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Ermittlung einer robusten Supply Chain, die bei unterschiedlichen möglichen Umweltentwicklungen sowohl das Ziel der Maximierung des gesamten Deckungsbeitrags als auch das Ziel der erweiterten Zuliefererbewertung gut erfüllt.

Einen Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit bildete daher eine Analyse, welche Aspekte der Konfiguration einer Supply Chain in mathematischen Modellen zum Supply Chain Design abgebildet werden. Eine Untersuchung der in der Literatur vorhandenen Modelle hat gezeigt, dass vielfältige unterschiedliche Aspekte in den Modellen erfasst werden, jedoch kein Modell alle relevanten Aspekte erfasst, so dass die Neuformulierung eines umfassenden Modells zum Supply Chain Design erforderlich war. Zahlreiche vorgestellte Detaillierungen dieses neu formulierten Modells ermöglichen die Anpassung an weitere anwendungsspezifische Anforderungen. Die Analyse der in der Literatur vorhandenen Modelle hat des Weiteren gezeigt, dass die Auswahl der Zulieferer, falls eine Ebene der Zulieferer in den untersuchten Modellen zum Supply Chain Design berücksichtigt wird, lediglich auf Basis der Preise der zu beschaffenden Rohstoffe erfolgt. Es ist jedoch im Rahmen einer langfristigen partnerschaftlichen Zusammenarbeit sinnvoll, weitere Kriterien für die Auswahl von Zulieferern zu verwenden.

Daher wurde eine Analyse verschiedener Ansätze zur Bewertung und Auswahl von Zulieferern durchgeführt, bei der gezeigt werden konnte, dass zwar vielfältige Kriterien zur Auswahl von Zulieferern bei praktischen Fragestellungen genutzt und in der Literatur vorgestellt werden, jedoch eine Differenzierung dieser Kriterien etwa hinsichtlich der Produktkategorie des zu beschaffenden Produktes nicht erfolgt. Da der Aufwand, der mit einer umfassenden Auswahl von Zulieferern verbunden ist, nicht für jedes Produkt gerechtfertigt ist, wurden Auswahlkriterien für Zulieferer in Abhängigkeit von der Beschaffungssituation entwickelt. So sollte etwa bei den Schlüsselprodukten, die insbesondere von kritischen Zulieferern beschafft werden, auf Grund der langfristig anzustrebenden Zusammenarbeit die wirtschaftliche Lage, das Forschungs- und Entwicklungspotenzial, die technische Ausstattung sowie das Interesse an einer intensiven Zusammenarbeit und das gegenseitige Vertrauen im Vordergrund stehen. Die Modellierung derartiger Auswahlkriterien als Zielfunktionen erlaubt deren Berücksichtigung in den entwickelten Modellen zum Supply Chain Design.

Der zweite Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit betrifft die Konfiguration einer Supply Chain unter Unsicherheit und die damit verbundene Forderung nach einer Supply Chain, die für verschiedene Umweltentwicklungen gut geeignet und damit robust ist. Da bereits unterschiedliche Robustheitskonzepte in der Literatur existieren, wurde zunächst eine Analyse der den verschiedenen Konzepten zugrunde liegenden Entscheidungssituationen durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass vorrangig die Zulässigkeits- und die Optimalitätsrobustheit für die vorliegende Entscheidungssituation des Supply Chain Design bei einer Zielsetzung relevant sind. Da keine Robustheitskonzepte bei Mehrfachzielsetzung in der Literatur vorhanden sind, erfolgte die Einführung der Zielrobustheit, die vorliegt, wenn eine Lösung hinsichtlich aller Zielfunktionen als optimalitätsrobust zu bezeichnen ist. Darüber hinaus wurden verschiedene Modelle zur Ermittlung zielrobuster Lösungen sowie ein Analysemaß zur Beurteilung der Zielrobustheit einer Lösung vorgeschlagen.

Anhand einer Anwendung zum Supply Chain Design, die auf einer realen Problemstellung basiert, wurde abschließend ein Vorgehen zur Bestimmung einer robusten Supply Chain bei Einfach- und Mehrfachzielsetzung vorgestellt. Dies umfasst neben der Ermittlung verschiedener Lösungen mit Hilfe der Modelle zur Erzeugung robuster Lösungen die Analyse der Lösungen mit unterschiedlichen Analysemaßen. Es konnte gezeigt werden, dass bei der vorliegenden Problemstruktur je nach Art der Erfassung der Präferenzen des Entscheiders verschiedene Ersatzmodelle geeignet sind, eine robuste Supply Chain zu ermitteln. Des Weiteren lässt sich erkennen, dass die Integration der Zulieferbewertung als zusätzliche Zielsetzung zu einer anderen robusten Supply Chain führt als bei der ausschließlichen Maximierung des Gesamtdeckungs-

beitrags, was die Bedeutung der frühzeitigen Beachtung weiterer Zielsetzungen innerhalb des Planungsprozesses unterstreicht.

Zusammengefasst analysiert die vorliegende Arbeit die Problemstellung des Supply Chain Design, wodurch Entscheidungsträger bei der Abbildung der realen Problemstellung in einem Modell sowie der Analyse der Ergebnisse unterstützt werden. Es wird ein Kriterienkatalog für die fundierte Auswahl der Zulieferer entwickelt, der dem Entscheider in Abhängigkeit von der Beschaffungssituation die Auswahl geeigneter Kriterien erleichtert. Ferner wird ein neues Robustheitskonzept bei Mehrfachzielsetzung vorgestellt, dessen Übertragung auf andere Anwendungsgebiete analog möglich ist.

Es ist zu erwarten, dass die Bedeutung der robusten Planung in der Anwendung auf reale Problemstellungen zukünftig zunehmen wird, da Entscheider vermehrt bereits bei der Planung unsichere Umweltentwicklungen antizipieren. Darüber hinaus ist insbesondere im Rahmen des Supply Chain Management eine Integration der robusten Planung in die unternehmensübergreifenden entscheidungsunterstützenden Systeme wünschenswert. Aus der Übertragung der vorgeschlagenen Modelle zur Ermittlung zielrobuster Lösungen auf andere Anwendungsgebiete können sich Anregungen für Weiterentwicklungen der vorgestellten Planungsansätze ergeben. Dies kann einerseits die Untersuchung zusätzlicher Ersatzmodelle zur Erzeugung zielrobuster Lösungen und andererseits die Entwicklung weiterer Analysemaße zur Bewertung der Lösungen beinhalten.



**Literaturverzeichnis**

- Adam, Dietrich (1996): *Planung und Entscheidung: Modelle - Ziele - Methoden*, 4., vollst. überarb. und wes. erw. Aufl., Wiesbaden 1996.
- Ahmed, Shabbir; Sahinides, Nikolaos V. (1998): *Robust process planning under uncertainty*, in: *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 37, No. 5, 1998, S. 1883-1892.
- Alicke, Knut (2003): *Planung und Betrieb von Logistiknetzwerken: Unternehmensübergreifendes Supply Chain Management*, Berlin, Heidelberg u. a. 2003.
- Allen, Katrin (2002): *Messung ökologischer Effizienz mittels Data Envelopment Analysis*, Wiesbaden 2002, zugl. Diss. RWTH Aachen 2002.
- Allen, R.; Athanassopoulos, A.; Dyson, R. G.; Thanassoulis, E. (1997): *Weights restrictions and value judgements in data envelopment analysis: Evolution, development and future directions*, in: *Annals of Operations Research*, Vol. 73, 1997, S. 13-34.
- Alonso-Ayuso, A.; Escudero, L.F.; Garin, A.; Ortuno, M.T.; Pérez, G. (2003): *An approach for strategic supply chain planning under uncertainty based on stochastic 0-1 programming*, in: *Journal of Global Optimization*, Vol. 26, No. 1, 2003, S. 91-124.
- Anderson, David R.; Sweeney, Dennis J.; Williams, Thomas A. (2003): *An Introduction to Management Science: Quantitative Approaches to Decision Making*, 10. Aufl., Mason u. a. 2003.
- Angulo-Meza, Lidia; Lins, Marcos Pereira Estellita (2002): *Review of methods for increasing discrimination in data envelopment analysis*, in: *Annals of Operations Research*, Vol. 116, No. 1-4, 2002, S. 225-242.
- Arndt, Holger (2004): *Supply Chain Management: Optimierung logistischer Prozesse*, Wiesbaden 2004.
- Arnold, Ulli (1997): *Beschaffungsmanagement*, 2., überarb. und erw. Aufl., Stuttgart 1997.
- Arntzen, Bruce C.; Brown, Gerald G.; Harrison, Terry P.; Trafton, Linda L. (1995): *Global supply chain management at digital equipment corporation*, in: *Interfaces*, Vol. 25, No. 1, 1995, S. 69-93.
- Ayers, James B. (2000): *Handbook of Supply Chain Management*, Boca Raton, London u. a. 2000.

- Baetge, Jörg; Kirsch, Hans-Jürgen; Thiele, Stefan (2004): Bilanzanalyse, 2., vollst. überarb. und erw. Aufl., Düsseldorf 2004.
- Bai, Dawei; Carpenter, Tamra; Mulvey, John (1997): Making a case for robust optimization models, in: *Management Science*, Vol. 43, No. 7, 1997, S. 895-907.
- Ballou, Ronald H. (2001): Unresolved issues in supply chain network design, in: *Information Systems Frontiers*, Vol. 3, No. 4, 2001, S. 417-426.
- Bamberg, Günter; Baur, Franz (2002): Statistik, 12., überarb. Aufl., München, Wien 2002.
- Bamberg, Günter; Coenenberg, Adolf G. (2002): Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre, 11., überarb. Aufl., München 2002.
- Barbarosoglu, Gülay; Yazgac, Tülin (1997): An application of the analytic hierarchy process to the supplier selection problem, in: *Production and Inventory Management Journal*, Vol. 38, No. 1, 1997, S. 14-21.
- Batt, Peter J.; Purchase, Sharon (2004): Managing collaboration within networks and relationships, in: *Industrial Marketing Management*, Vol. 33, No. 3, 2004, S. 169-174.
- Beamon, Benita M. (1999): Measuring supply chain performance, in: *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 19, No. 3, 1999, S. 275-292.
- Beamon, Benita M. (1998): Supply chain design and analysis: Models and methods, in: *International Journal of Production Economics*, Vol. 55, 1998, S. 281-294.
- Bechtel, Christian; Jayaram, Jayanth (1997): Supply chain management: A strategic perspective, in: *The International Journal of Logistics Management*, Vol. 8, No. 1, 1997, S. 15-34.
- Beckmann, Holger (2004): Supply Chain Management: Grundlagen, Konzept und Strategien, in: Beckmann, Holger (Hrsg.): *Supply Chain Management: Strategien und Entwicklungstendenzen in Spitzenunternehmen*, Berlin, Heidelberg u. a. 2004, S. 1-97.
- Behrens, Sven; Varmaz, Armin (2004): Data Envelopment Analysis als Instrument für Zeitvergleiche, in: *Zeitschrift für Planung und Unternehmenssteuerung*, 15. Jg., 2004, S. 93-108.
- Belton, Valerie; Gear, Tony (1983): On a short-coming of saaty's method of analytic hierarchies, in: *Omega*, Vol. 11, No. 3, 1983, S. 228-230.



- Bensaou, M. (1999): Portfolios of buyer-supplier relationships, in: *Sloan Management Review*, Vol. 40, No. 4, 1999, S. 35-44.
- Berens, Wolfgang; Delfmann, Werner (2002): *Quantitative Planung*, 3., überarb. Aufl., Stuttgart 2002.
- Bhushan, Navneet; Rai, Kanwal (2004): *Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierarchy Process*, London, Berlin u. a. 2004.
- Bhutta, Khurram S.; Huq, Faizul (2002): Supplier selection problem: A comparison of the total cost of ownership and analytic hierarchy process approaches, in: *Supply Chain Management: An International Journal*, Vol. 7, No. 3, 2002, S. 126-135.
- Birge, John R.; Louveaux, Francois (1999): *Introduction to Stochastic Programming*, 2., korrig. Aufl., New York, Berlin u. a. 1999.
- Bloech, Jürgen; Bogaschewsky, Ronald; Götze, Uwe; Roland, Folker (2004): *Einführung in die Produktion*, 5., überarb. Aufl., Berlin, Heidelberg u. a. 2004.
- Bogalschewski, Ronald (2003): Historische Entwicklung des Beschaffungsmanagement, in: Bogalschewski, Ronald; Götze, Uwe (Hrsg.): *Management und Controlling von Einkauf und Logistik: Festschrift für Jürgen Bloech*, Gernsbach 2003, S. 13-42.
- Bok, Jin-Kwang; Lee, Heeman; Park, Sunwon (1998): Robust investment model for long-range capacity expansion of chemical processing networks under uncertain demand forecast scenarios, in: *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 22, No. 7-8, 1998, S. 1037-1049.
- Boutellier, Roman; Wagner, Stephan M. (2001): Strategische Partnerschaften mit Lieferanten, in: Belz, Christian; Mühlmeier, Joachim (Hrsg.): *Key Supplier Management*, St. Gallen 2001, S. 38-60.
- Boutellier, Roman; Wagner, Stephan M. (2000): Zielgerichtetes Lieferantenmanagement durch Lieferantenstrategien, in: *iommanagement*, Vol. 69, No. 7/8, 2000, S. 27-33.
- Boutellier, Roman; Wagner, Stephan M.; Wehrli, Hans Peter (2003): *Handbuch Beschaffung: Strategien – Methoden – Umsetzung*, München, Wien 2003.
- Bowen, Ken (2004): Sixty years of operational research, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 153, No. 3, 2004, S. 618-623.
- Braglia, Marcello; Petroni, Alberto (2000): A quality assurance-oriented methodology for handling trade-offs in supplier selection, in: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 30, No. 2, 2000, S. 96-111.

- Brauers, Jutta; Weber, Martin (1986): Szenarioanalyse als Hilfsmittel der strategischen Planung: Methodenvergleich und Darstellung einer neuen Methode, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 56. Jg., Nr. 7, 1986, S. 631-652.
- Bronstein, Ilja N.; Semendjajew, Konstantin A.; Musiol, Gerhard; Mühlig, Heiner (1993): Taschenbuch der Mathematik, Frankfurt am Main 1993.
- Brown, Gerald G.; Graves, Glenn W.; Honczarenko, Maria D. (1987): Design and operation of a multicommodity production/distribution system using primal goal decomposition, in: Management Science, Vol. 33, No. 11, 1987, S. 1469-1480.
- Bruhn, Manfred (2002): Customer-Relationship-Management – Die personellen und organisatorischen Anforderungen, in: Zeitschrift für Organisation, 71. Jg., Nr. 3, 2002, S. 132-140.
- Buffa, Frank P.; Jackson, Wade M. (1983): A goal programming model for purchase planning, in: Journal of Purchasing and Materials Management, Vol. 19, No. 3, 1983, S. 27-34.
- Bunn, Derek W.; Salo, Athi A. (1993): Forecasting with scenarios, in: European Journal of Operational Research, Vol. 68, 1993, S. 291-303.
- Busch, Axel; Dangelmaier, Wilhelm (2004): Integriertes Supply Chain Management - ein koordinationsorientierter Überblick, in: Busch, Axel; Dangelmaier, Wilhelm (Hrsg.): Integriertes Supply Chain Management: Theorie und Praxis effektiver unternehmensübergreifender Geschäftsprozesse, 2. Aufl., Wiesbaden 2004, S. 1-21.
- Busch, Axel; Dangelmaier, Wilhelm; Pape, Ulrich; Rüther, Michael (2003): Marktspiegel Supply Chain Management Systeme: Potenziale – Konzepte – Anbieter im Vergleich, Wiesbaden 2003.
- Busse von Colbe, Walther; Hammann, Peter; Laßmann, Gert (1992): Betriebswirtschaftstheorie, Bd. 2: Absatztheorie, 4., verb. und erw. Aufl., Berlin, Heidelberg u. a. 1992.
- Busse von Colbe, Walther; Laßmann, Gert (1991): Betriebswirtschaftstheorie, Bd. 1: Grundlagen, Produktions- und Kostentheorie, 5., durchges. Aufl., Berlin, Heidelberg u. a. 1991.
- Butler, Renee J. (2003): Supply chain design for new products, Dissertation Georgia Institute of Technology 2003.

- Cantner, Uwe; Hanusch, Horst (1998): Effizienzanalyse mit Hilfe der Data-Envelope-Analysis, in: *WiSt Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, 27. Jg., Nr. 5, 1998, S. 228-237.
- Cakravastia, Andi; Toha, Isa S.; Nakamura, Nobuto (2002): A two-stage model for the design of supply chain networks, in: *International Journal of Production Economics*, Vol. 80, No. 3, 2002, S. 231-248.
- Chan, F. T. S. (2003): Interactive selection model for supplier selection process: An analytical hierarchy process approach, in: *International Journal of Production Research*, Vol. 41, No. 15, 2003, S. 3549-3580.
- Charnes, Abraham; Cooper, William W. (1961): *Management Models and Industrial Applications of Linear Programming*, New York, London u. a. 1961.
- Charnes, Abraham; Cooper, William W. (1959): Chance-Constrained Programming, in: *Management Science*, Vol. 6, No. 1, 1959, S. 73-79.
- Charnes, Abraham; Cooper, William; Lewin, Arie Y.; Seiford, Lawrence M. (1994): *Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology and Applications*, Boston, Dordrecht, London 1994.
- Charnes, A.; Cooper, W.; Rhodes, E. (1978): Measuring the efficiency of decision making units, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 2, 1978, S. 429-444.
- Chaudry, Sohail S.; Forst, Frank G.; Zydiak, James L. (1993): Vendor selection with price breaks, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 70, No. 1, 1993, S. 52-66.
- Chen, I. J.; Paulraj, A. (2004): Understanding supply chain management: Critical research and a theoretical framework, in: *International Journal of Production Research*, Vol. 42, No. 1, 2004, S. 131-164.
- Cho, Keun Tae (2003): Multicriteria decision methods: An attempt to evaluate and unify, in: *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 37, No. 9-10, 2003, S. 1099-1119.
- Choi, Thomas Y.; Hartley, Janet L. (1996): An exploration of supplier selection practices across the supply chain, in: *Journal of Operations Management*, Vol. 14, No. 4, 1996, S. 333-343.
- Chopra, Sunil; Meindl, Peter (2004): *Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operation*, Upper Saddle River 2004.

- Christopher, Martin (1998): *Logistics and Supply Chain Management: Strategies for Reducing Cost and Improving Service*, 2. Aufl., London, San Francisco u. a. 1998.
- Cohen, Morris A.; Fisher, Marshall; Jaikumar, Ramchandran (1989): *International manufacturing and distributions networks: A normative model framework*, in: Ferdows, Kasra (Hrsg.): *Managing International Manufacturing*, Amsterdam, New York u. a. 1989.
- Cohen, Morris A.; Lee, Hau L. (1989): *Resource deployment analysis of global manufacturing and distribution networks*, in: *Journal of Manufacturing and Operations Management*, Vol. 2, 1989, S. 81-104.
- Collette, Yann; Siarry, Patrick (2003): *Multiobjective Optimization: Principles and Case Studies*, Berlin, Heidelberg u. a. 2003.
- Cooper, Martha C.; Lambert, Douglas M.; Pagh, Janus D. (1997): *Supply chain management: More than a new name for logistics*, in: *The International Journal of Logistics Management*, Vol. 8, No. 1, 1997, S. 1-14.
- Cooper, William W.; Seiford, Lawrence M.; Tone, Kaoru (2000): *Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA Solver Software*, Boston, Dordrecht u. a. 2000.
- Corsten, Daniel (2000a): *Gestaltungsprinzipien des Supply Chain Managements*, in: *iommanagement*, Vol. 69, No. 4, 2000, S. 26-41.
- Corsten, Hans (2000b): *Produktionswirtschaft – Einführung in das industrielle Produktionsmanagement*, 9., vollst. überarb. und wes. erw. Aufl., München, Wien u. a. 2000.
- Corsten, Hans; Gössinger, Ralf (2001): *Einführung in das Supply Chain Management*, München, Wien 2001.
- Corsten, Daniel; Hofstetter, Jörg S. (2001): *Supplier Relationship Management: Prozessmanagement in Lieferantenbeziehungen*, in: Belz, Christian; Mühlmeier, Joachim (Hrsg.): *Key Supplier Management*, St. Gallen 2001, S. 130-147.
- Cox, Andrew; Lonsdale, Chris; Watson, Glyn; Qiao, Hong (2003): *Supplier relationship management: A framework for understanding managerial capacity and constraints*, in: *European Business Journal*, Vol. 15, No. 3, 2003, S. 135-145.
- Croom, Simon; Romano, Pietro; Giannakis, Mihalis (2000): *Supply chain management: An analytical framework for critical literature review*, in: *European Journal of Purchasing & Supply Management*, Vol. 6, No. 1, 2000, S. 67-83.

- Dangelmeier, Wilhelm; Pape, Ulrich; Rüther, Michael (2004): Agentensysteme für das Supply Chain Management: Grundlagen, Konzepte, Anwendungen, Wiesbaden 2004.
- Dantzig, George B. (1955): Linear programming under uncertainty, in: *Management Science*, Vol. 1, No. 3-4, 1955, S. 197-206.
- Darby-Dowman, K.; Barker, S.; Audsley, E.; Parsons, D. (2000): A two-stage stochastic programming with recourse model for determining robust planting plans in horticulture, in: *Journal of Operational Research Society*, Vol. 51, 2000, S. 83-89.
- Dasci, Abdullah; Verter, Vedat (2001): A continuous model for production-distribution system design, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 129, 2001, S. 287-298.
- de Boer, Luitzen; Labro, Eva; Morlacchi, Pierangela (2001): A review of methods supporting supplier selection, in: *European Journal of Purchasing & Supply Management*, Vol. 7, No. 2, 2001, S. 75-89.
- Degraeve, Zeger; Labro, Eva; Roodhooft, Filip (2000): An evaluation of vendor selection models from a total cost of ownership perspective, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 125, No. 1, 2000, S. 34-58.
- Degraeve, Zeger; Roodhooft, Filip (2000): A mathematical programming approach for procurement using activity based costing, in: *Journal of Business Finance & Accounting*, Vol. 27, No. 1/2, 2000, S. 69-98.
- Dembo, Ron S. (1991): Scenario optimization, in: *Annals of Operations Research*, Vol. 30, 1991, S. 63-80.
- Dickson, Gary W. (1966): An Analysis of vendor selection systems and decisions, in: *Journal of Purchasing*, Vol. 2, No. 1, 1966, S. 5-17.
- Dinkelbach, Werner; Kleine, Andreas (1996): *Elemente einer betriebswirtschaftlichen Entscheidungslehre*, Berlin, Heidelberg u. a. 1996.
- Dogan, Koray; Goetschalckx, Marc (1999): A primal decomposition method for the integrated design of multi-period production-distribution systems, in: *IIE Transactions*, Vol. 31, 1999, S. 1027-1036.
- Domschke, Wolfgang; Drexl, Andreas (2005): *Einführung in Operations Research*, 6., überarb. und erw. Aufl., Berlin, Heidelberg u. a. 2005.
- Domschke, Wolfgang; Drexl, Andreas (1996): *Logistik: Standorte*, 4., überarb. und erw. Aufl., München, Wien 1996.

- Domschke, Wolfgang; Scholl, Armin (2003): Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre: Eine Einführung aus entscheidungstheoretischer Sicht, 2., verb. Aufl., Berlin, Heidelberg u. a. 2003.
- Doyle, John; Green, Rodney (1994): Efficiency and cross-efficiency in DEA: Derivations, meanings and uses, in: *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 45, No. 5, 1994, S. 567-578.
- Dyer, James S. (1990): Remarks on the analytic hierarchy process, in: *Management Science*, Vol. 36, No. 3, 1990, S. 249-258.
- Eisenführ, Franz; Weber, Martin (2003): Rationales Entscheiden, 4., neu bearb. Aufl., Berlin, Heidelberg u. a. 2003.
- Ellinger, Theodor; Beuermann, Günter; Leisten, Rainer (2003): *Operations Research: Eine Einführung*, 6., durchges. Aufl., Berlin, Heidelberg u. a. 2003.
- Ellram, Lisa M. (1995): Total cost of ownership: An analysis approach for purchasing, in: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 25, No. 8, 1995, S. 4-23.
- Erengüc, Selcuk S.; Simpson, N. C.; Vakharia, Asoo J. (1999): Integrated production/distribution planning in supply chains: An invited review, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 115, No. 2, 1999, S. 219-236.
- Escudero, Laureano F. (1994): Robust decision making as a decision making aid under uncertainty, in: Rios, Sixto (Hrsg.): *Decision Theory and Decision Analysis: Trends and Challenges*, Boston, Dordrecht u. a. 1994, S. 127-138.
- Eßig, Michael (2001): E-Procurement and Supplier Relationship Management: Neubewertung von Lieferantenbeziehungen durch elektronischen Einkauf?, in: *IM Die Fachzeitschrift für Information Management & Consulting*, 16. Jg., Heft 4, 2001, S. 67-72.
- Fandel, G.; Stammen, M. (2004): A general model for extended strategic supply chain management with emphasis on product life cycles including development and recycling, in: *International Journal of Production Economics*, Vol. 89, No. 3, 2004, S. 293-308.
- Fleischmann, Bernhard; Meyr, Herbert (2003): Planning Hierarchy, Modeling and Advanced Planning Systems, in: de Kok, A. G.; Graves, Stephen C. (Hrsg.): *Supply Chain Management: Design, Coordination and Operation*, Handbooks in Operations Research and Management Science, Vol. 11, Amsterdam u. a. 2003, S. 457-523.

- Fleischmann, Bernhard; Meyr, Herbert (2001): Supply Chain Planning, in: Sebastian, Hans-Jürgen; Grünert, Tore (Hrsg.): Logistik Management, Supply Chain Management und e-Business, Stuttgart, Leipzig u. a. 2001, S. 13-29.
- Fleischmann, Bernhard; Meyr, Herbert; Wagner, Michael (2002): Advanced Planning, in: Stadler, Hartmut; Kilger, Christoph (Hrsg.): Supply Chain Management and Advanced Planning: Concepts, Models, Software and Case Studies, 2. Aufl., Berlin, Heidelberg u. a. 2002, S. 71-96.
- Forman, Ernest H.; Gass, Saul I. (2001): The analytic hierarchy process – An exposition, in: Operations Research, Vol. 49, No. 4, 2001, S. 469-486.
- Forrester, Jay W. (1958): Industrial dynamics: A major breakthrough for decision makers, in: Harvard Business Review, Vol. 36, No. 4, 1958, S. 37-66.
- Friedrich, Sebastian (2004): Stand der IT-Unterstützung für das Supply Chain Management in der Prozessindustrie, in: Spengler, Thomas; Voss, Stefan; Kopfer, Herbert (Hrsg.): Logistik Management: Prozesse, Systeme, Ausbildung, Heidelberg 2004, S. 145-159.
- Gabriel, Christoph (2003): Strategisches Supply Chain Design, Dissertation Universität St. Gallen 2003.
- Gaiser, Bernd (1998): Prozeßkostenrechnung und Activity Based Costing (ABC), in: Horvath & Partner (Hrsg.): Prozesskostenmanagement: Methodik und Anwendungsfelder, 2., völlig neu bearb. Aufl., München 1998, S. 65-77.
- Gao, Zhen; Tang, Lixin (2003): A multi-objective model for purchasing of bulk raw materials of a large-scale integrated steel plant, in: International Journal of Production Economics, Vol. 83, No. 3, 2003, S. 325-334.
- Geunes, Joseph; Chang, Byung Man (2001): Operations research models for supply chain management and design, in: Floudas, C. A.; Pardalos, P. M. (Hrsg.): Encyclopedia of Optimization, Vol. 4, Dordrecht 2001, S. 133-144.
- Ghodsypour, S. H.; O'Brian, C. (2001): The total cost of logistics in supplier selection, under conditions of multiple sourcing, multiple criteria and capacity constraints, in: International Journal of Production Economics, Vol. 73, No. 1, 2001, S. 15-27.
- Ghodsypour, S. H.; O'Brian, C. (1998): A decision support system for supplier selection using an integrated analytic hierarchy process and linear programming, in: International Journal of Production Economics, Vol. 56/57, No. 1-3, 1998, S. 199-212.

- Göpfert, Ingrid (2004): Einführung, Abgrenzung und Weiterentwicklung des Supply Chain Managements, in: Busch, Axel; Dangelmeier, Wilhelm (Hrsg.): Integriertes Supply Chain Management: Theorie und Praxis effektiver unternehmensübergreifender Geschäftsprozesse, 2. Aufl., Wiesbaden 2004, S. 25-45.
- Götze, Uwe (1993): Szenario-Technik in der strategischen Unternehmensplanung, 2., aktual. Aufl., Wiesbaden 1993.
- Götze, Uwe (1991): Szenario-Technik, in: Zeitschrift für Planung, 2. Jg., Nr. 4, 1991, S. 355-358.
- Golden, Bruce L.; Wasil, Edward A.; Levy, Doug E. (1989): Applications of the analytic hierarchy process: A categorized, annotated bibliography, in: Golden, Bruce L.; Wasil, Edward A.; Harker, Patrick T. (Hrsg.): The Analytic Hierarchy Process: Applications and Studies, Berlin, Heidelberg u. a. 1989, S. 37-58.
- Gregory, Robert E. (1986): Source selection: A matrix approach, in: Journal of Purchasing and Materials Management, Vol. 22, Summer 1986, S. 24-29.
- Günther, Hans-Otto; Tempelmeier, Horst (2003): Produktion und Logistik, 5. Aufl., Berlin, Heidelberg u. a. 2003.
- Gunasekaran, A.; Ngai, E. W. T. (2004): Information systems in supply chain integration and management, in: European Journal of Operational Research, Vol. 159, No. 2, 2004, S. 269-295.
- Gupta, Anshuman; Maranas, Costas D. (2003): Managing demand uncertainty in supply chain planning, in: Computers and Chemical Engineering, Vol. 27, No. 8-9, 2003, S. 1219-1227.
- Gupta, Shiv K.; Rosenhead, Jonathan (1968): Robustness in sequential investment decisions, in: Management Science, Vol. 15, No. 2, 1968, S. 18-29.
- Gutiérrez, Genaro J.; Kouvelis, Panagiotis (1995): A robustness approach to international sourcing, in: Annals of Operations Research, Vol. 59, 1995, S. 165-193.
- Gutiérrez, Genaro J.; Kouvelis, Panagiotis; Kurawarwala, Abbas A. (1996): A robustness approach to uncapacitated network design problems, in: European Journal of Operational Research, Vol. 94, No. 2, 1996, S. 362-376.
- Hahn, Dietger (2000): Problemfelder des Supply Chain Management, in: Wildemann, Horst (Hrsg.): Supply Chain Management, München 2000, S. 9-19.
- Hale, Trevor S.; Moberg, Christopher R. (2003): Location science research: A review, in: Annals of Operations Research, Vol. 123, Nr. 1-4, 2003, S. 21-35.



- Handfield, Robert B.; Krause, Daniel R.; Scannell, Thomas V.; Monczka, Robert M. (2000): Avoid the pitfalls in supplier development, in: Sloan Management Review, Vol. 41, No. 2, 2000, S. 37-49.
- Handfield, Robert B.; Nichols, Ernest L. (1999): Introduction to Supply Chain Management, Upper Saddle River 1999.
- Handfield, Robert; Walton, Steven V.; Sroufe, Robert; Melnyk, Steven A. (2002): Applying environmental criteria to supplier assessment: A study in the application of the analytical hierarchy process, in: European Journal of Operational Research, Vol. 141, No. 1, 2002, S. 70-87.
- Hanssmann, Friedrich (1989): Robuste Planung, in: Szyperski, Norbert (Hrsg.): Handwörterbuch der Planung, Stuttgart 1989, Sp. 1758-1764.
- Harker, Patrick T.; Vargas, Luis G. (1990): Reply to "Remarks on the analytic hierarchy process" by J. S. Dyer, in: Management Science, Vol. 36, No. 3, 1990, S. 269-275.
- Harrison, Terry P. (2001): Global supply chain design, in: Information Systems Frontiers, Vol. 3, No. 4, 2001, S. 413-416.
- Hartmann, Horst (2002): Materialwirtschaft: Organisation, Planung, Durchführung, Kontrolle, 8., überarb. und erw. Aufl., Gernsbach 2002.
- Hartmann, Horst (1997): Lieferantenbewertung - aber wie?: Lösungsansätze und erprobte Verfahren, 2. Aufl., Gernsbach 1997.
- Hillier, Frederick S.; Lieberman, Gerald J. (2001): Introduction to Operations Research, 7. Aufl., Boston, Burr Ridge u. a. 2001.
- Hillier, Frederick S.; Lieberman, Gerald J. (1997): Operations Research: Einführung, 5. Aufl. (unveränd. Nachdr. der 4. Aufl.), München, Wien u. a. 1997.
- Hinojosa, Y.; Puerto, J.; Fernández, F. R. (2000): A multiperiod two-echelon multi-commodity capacitated plant location problem, in: European Journal of Operational Research, Vol. 123, 2000, S. 271-291.
- Hippner, Hajo; Wilde, Klaus (2001): CRM – Ein Überblick, in: Helmke, Stefan; Dangelmaier, Wilhelm (Hrsg.): Effektives Customer Relationship Management: Instrumente – Einführungskonzepte – Organisation, Wiesbaden (2001), S. 3-38.
- Hoberg, Richard (2003): Clusteranalyse, Klassifikation und Datentiefe, Lohmar, Köln 2003, zugl. Diss. Universität Köln 2002.

- Hodder, James E.; Dincer, M. Cemal (1986): A multifactor model for international plant location and financing under uncertainty, in: *Computers & Operations Research*, Vol. 13, No. 5, 1986, S. 601-609.
- Hoffmeister, Wolfgang (2000): *Investitionsrechnung und Nutzwertanalyse: Eine entscheidungsorientierte Darstellung mit vielen Beispielen und Übungen*, Stuttgart, Berlin u. a. 2000.
- Hoitsch, Hans-Jörg (1993): *Produktionswirtschaft*, 2., völlig überarb. und erw. Aufl., München 1993.
- Homburg, Christian (2000): *Quantitative Betriebswirtschaftslehre*, 3., überarb. Aufl., Wiesbaden 2000.
- Horváth, Péter (2001): *Controlling*, 8., vollst. überarb. Aufl., München 2001.
- Hüls, Dagmar (1995): *Früherkennung insolvenzgefährdeter Unternehmen*, Düsseldorf 1995, zugl. Diss. Westfälische Wilhelms-Universität Münster 1995.
- Hummel, Siegfried; Männel, Wolfgang (1995): *Kostenrechnung: Grundlagen, Aufbau und Anwendung*, 4., völlig neu bearb. und erw. Aufl., Nachdr., Wiesbaden 1995.
- Humphreys, P. K.; Li, W. L.; Chan, L. Y. (2004): The impact of supplier development on buyer-supplier performance, in: *Omega*, Vol. 32, No. 2, 2004, S. 131-143.
- Humphreys, P. K.; Wong, Y. K.; Chan, F. T. S. (2003): Integrating environmental criteria into the supplier selection process, in: *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 138, No. 1-3, 2003, S. 349-356.
- Hwang, Heung-Suk (2002): Design of supply-chain logistics system considering service level, in: *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 43, No. 1-2, 2002, S. 283-297.
- Infanger, Gerd (1994): *Planning under Uncertainty: Solving Large-Scale Stochastic Linear Programs*, Danvers 1994.
- Jang, Y. J.; Jang, S. Y.; Chang, B. M.; Park, J. (2002): A combined model of network design and production/distribution planning for a supply network, in: *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 43, No. 1-2, 2002, S. 263-281.
- Jayaraman, Vaidyanathan (1998): Transportation, facility location and inventory issues in distribution network design - An investigation, in: *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 18, No. 5, 1998, S. 471-494.

- Jayaraman, Vaidyanathan; Pirkul, Hasan (2001): Planning and coordination of production and distribution facilities for multiple commodities, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 133, 2001, S. 394-408.
- Jayaraman, Vaidyanathan; Srivastava, Rajesh; Benton, W. C. (1999): Supplier selection and order quantity allocation: A comprehensive model, in: *The Journal of Supply Chain Management: A Global Review of Purchasing and Supply*, Vol. 35, No. 2, 1999, S. 50-58.
- Jehle, Egon (2000): Steuerung von großen Netzen in der Logistik unter besonderer Berücksichtigung von Supply Chains, in: Wildemann, Horst (Hrsg.): *Supply Chain Management*, München 2000, S. 205-226.
- Junginger, Stefan; Lindemann, Marcus; Karagiannis, Dimitris (2002): Prozessorientiertes Supply-Chain-Design, in: *Industrie Management*, Vol. 18, No. 5, 2002, S. 39-42.
- Kaliszewski, Ignacy (2000): Using trade-off information in decision-making algorithms, in: *Computers & Operations Research*, Vol. 27, No. 2, 2000, S. 161-182.
- Kall, Peter; Wallace, Stein W. (1994): *Stochastic Programming*, Chichester, New York u. a. 1994.
- Kallrath, Josef (2004): *Modeling Languages in Mathematical Optimization*, Boston, Dordrecht u. a. 2004.
- Kallrath, Josef (2002): *Gemischt-ganzzahlige Optimierung: Modellierung in der Praxis*, Braunschweig, Wiesbaden 2002.
- Kallrath, Josef; Wilson, John M. (1997): *Business Optimisation using mathematical Programming*, Basingstoke, Hampshire 1997.
- Kaluza, Bernd; Dullnig, Herwig; Malle, Franz (2003): *Principal-Agent-Probleme in der Supply Chain – Problemanalyse und Diskussion von Lösungsvorschlägen*, Diskussionsbeiträge des Instituts für Wirtschaftswissenschaft, Klagenfurt 2003.
- Karpak, Birsan; Kumcu, Erdogan; Kasuganti, Rammohan R. (2001): Purchasing materials in the supply chain: Managing a multi-objective task, in: *European Journal of Purchasing & Supply Management*, Vol. 7, 2001, S. 209-216.
- Kaufman, Leon; Vanden Eede, Marc; Hansen, Pierre (1977): A plant and warehouse location problem, in: *Operational Research Quarterly*, Vol. 28, No. 3, 1977, S. 547-554.

- Kaufmann, Lutz (2002): Purchasing and supply management – A conceptual framework, in: Hahn, Dietger; Kaufmann, Lutz (Hrsg.): Handbuch Industrielles Beschaffungsmanagement: Internationale Konzepte - Innovative Instrumente - Aktuelle Praxisbeispiele, 2., überarb. und erw. Auflage, Wiesbaden 2002, S. 3-34.
- Khattree, Ravindra; Naik, Dayanand (2000): Multivariate Data Reduction and Discrimination with SAS Software, Cary 2000.
- Kilger, Christoph; Reuter, Boris (2002): Collaborative Planning, in: Stadler, Hartmut; Kilger, Christoph (Hrsg.): Supply Chain Management and Advanced Planning – Concepts, Models, Software and Case Studies, 2. Aufl., Berlin, Heidelberg u. a. 2002, S. 223-237.
- Killmer, K. A.; Anandalingam, G.; Malcolm, S. A. (2001): Siting noxious facilities under uncertainty, in: European Journal of the Operational Research Society, Vol. 133, No. 3, 2001, S. 596-607.
- Kistner, Klaus-Peter (2003): Optimierungsmethoden: Einführung in die Unternehmensforschung für Wirtschaftswissenschaftler, 3., vollst. überarb. und erw. Aufl., Heidelberg 2003.
- Kistner, Klaus-Peter; Steven, Marion (2001): Produktionsplanung, 3., vollst. überarb. Aufl., Heidelberg 2001.
- Kleine, Andreas (2001): Data Envelopment Analysis aus entscheidungstheoretischer Sicht, in: OR Spektrum, Vol. 23, No. 2, 2001, S. 223-242.
- Knolmayer, Gerhard; Mertens, Peter; Zeier, Alexander (2000): Supply Chain Management auf Basis von SAP-Systemen: Perspektiven der Auftragsabwicklung für Industriebetriebe, Berlin, Heidelberg u. a. 2000.
- Kodweiss, Joachim; Nadjmabadi, Keywan (2001): Supply Chain Management als strategische Herausforderung, in: Lawrenz, Oliver; Hildebrand, Knut; Nenninger, Michael; Hillinger, Thomas (Hrsg.): Supply Chain Management: Konzepte, Erfahrungsberichte und Strategien auf dem Weg zu digitalen Wertschöpfungsnetzen, 2., überarb. und erw. Aufl., Braunschweig, Wiesbaden 2001, S. 71-87.
- Koppelman, Udo (2004): Beschaffungsmarketing, 4., neu bearb. Auflage, Berlin, Heidelberg u. a. 2004.
- Korhonen, Pekka; Moskowitz, Herbert; Wallenius, Jyrki (1992): Multiple criteria decision support – A review, in: European Journal of Operational Research, Vol. 63, No. 3, 1992, S. 361-375.

- Korpela, Jukka; Lehmusvaara, Antti; Tuominen, Markku (2001): Customer service based design of the supply chain, in: *International Journal of Production Economics*, Vol. 69, No. 2, 2001, S. 193-204.
- Korpela, Jukka; Kyläheiko, Kalevi; Lehmusvaara, Antti; Tuominen, Markku (2002): An analytic approach to production capacity allocation and supply chain design, in: *International Journal of Production Economics*, Vol. 78, No. 2, 2002, S. 187-195.
- Kotzab, Herbert (2000): Zum Wesen von Supply Chain Management, in: Wildemann, Horst (Hrsg.): *Supply Chain Management*, München 2000, S. 21-47.
- Kotzab, Herbert; Skjoldager, Niels; Vinum, Thorkil (2003): The development and empirical validation of an e-based supply chain strategy optimization model, in: *Industrial Management & Data Systems*, Vol. 103, No. 5, 2003, S. 347-360.
- Kouvelis, Panos; Yu, Gang (1997): *Robust Discrete Optimization and its Applications*, Dordrecht, Boston u. a. 1997.
- Kraljic, Peter (1988): Zukunftsorientierte Beschaffungs- und Versorgungsstrategie als Element der Unternehmensstrategie, in: Henzler, Herbert A. (Hrsg.): *Handbuch Strategische Führung*, Wiesbaden 1988, S. 477-497.
- Kraljic, Peter (1985): Versorgungsmanagement statt Einkauf, in: *Harvard Manager*, 7. Jg., Nr. 1, 1985, S. 6-14.
- Kraljic, Peter (1983): Purchasing must become supply management, in: *Harvard Business Review*, Vol. 61, No. 5, 1983, S. 109-117.
- Krüger, Rolf; Steven, Marion (2002): Funktionalitäten von Advanced Planning Systems, in: *WiSt Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, 31. Jg., Nr. 10, 2002, S. 591-595.
- Krüger, Rolf; Steven, Marion (2000): Supply Chain Management im Spannungsfeld von Logistik und Management, in: *WiSt Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, 29. Jg., Nr. 9, 2000, S. 501-507.
- Kütting, Karlheinz; Weber, Claus-Peter (2001): *Die Bilanzanalyse: Lehrbuch zur Beurteilung von Einzel- und Konzernabschlüssen*, 6., erw. und aktual. Aufl., Stuttgart 2001.
- Kuhn, Axel; Hellingrath, Bernd (2002): *Supply Chain Management: Optimierte Zusammenarbeit in der Wertschöpfungskette*, Berlin, Heidelberg u. a. 2002.
- Kumar, Sameer; Bragg, Richard (2003): Managing supplier relationships, in: *Quality Progress*, Vol. 36, No. 9, 2003, S. 24-30.

- Laguna, Manuel (1998): Applying robust optimization to capacity expansion of one location in telecommunications with demand uncertainty, in: *Management Science*, Vol. 44, No. 11, Part 2, 1998, S. 101-110.
- Langemann, Timo (2004): Collaborative Supply Chain Management (CSCM), in: Busch, Axel; Dangelmeier, Wilhelm (Hrsg.): *Integriertes Supply Chain Management: Theorie und Praxis effektiver unternehmensübergreifender Geschäftsprozesse*, 2. Aufl., Wiesbaden 2004, S. 435-451.
- Laux, Helmut (2003): *Entscheidungstheorie*, 5., verb. Aufl., Berlin, Heidelberg u. a. 2003.
- Lee, Hau L. (2002): Aligning supply chain strategies with product uncertainties, in: *California Management Review*, Vol. 44, No. 3, 2002, S. 105-119.
- Lee, Young Hae; Cho, Min Kwan; Kim, Seo Jin; Kim, Yun Bae (2002): Supply chain simulation with discrete-continuous combined modelling, in: *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 43, No. 1-2, 2002, S. 375-392.
- Lee, Hau L.; Padmanabhan, V.; Whang, Seungjin (1997): Der Peitscheneffekt in der Absatzkette, in: *Harvard Business Manager*, 19. Jg., Nr. 4, 1997, S. 78-87.
- Leenders, Michiel R.; Fearon, Harald A.; Flynn, Anna E.; Johnson, P. Fraser (2002): *Purchasing and Supply Management*, 12. Aufl., Boston, Burr Ridge u. a. 2002.
- Leung, Lawrence C.; Cao, Dong (2001): On the efficacy of modeling multi-attribute decision problems using AHP and sinarchy, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 132, No. 1, 2001, S. 39-49.
- Leung, S. C. H.; Wu, Yue; Lai, K. K. (2002): A robust optimization model for a cross-border logistics problem with fleet composition in an uncertain environment, in: *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 36, No. 11-13, 2002, S. 1221-1234.
- Lillich, Lothar (1992): *Nutzwertverfahren*, Heidelberg 1992.
- List, George F.; Wood, Bryan; Nozick, Linda K.; Turnquist, Mark A.; Jones, Dean A.; Kjeldgaard, Edwin A.; Lawton, Craig R. (2003): Robust optimization for fleet planning under uncertainty, in: *Transportation Research Part E*, Vol. 39, No. 3, 2003, S. 209-227.
- Liu, Baoding (2002): *Theory and Practice of Uncertain Programming*, Heidelberg, New York 2002.

- Liu, Jian; Ding, Fong-Yuen; Lall, Vinod (2000): Using data envelopment analysis to compare suppliers for supplier selection and performance improvement, in: *Supply Chain Management: An International Journal*, Vol. 5, No. 3, 2000, S. 143-150.
- Lucas, C.; MirHassani, S. A.; Mita, G.; Poojari, C. A. (2001): An application of lagrangian relaxation to a capacity planning problem under uncertainty, in: *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 52, No. 11, 2001, S. 1256-1266.
- Lucas, C.; Messina, E.; Mitra, G. (1997): Risk and return analysis of a multi-period strategic planning problem, in: Christer, Anthony H.; Osaki, Shunji; Thomas, Lyn C. (Hrsg.): *Stochastic modelling in innovative manufacturing*, Berlin, Heidelberg u. a. 1997, S. 81-96.
- Lysons, Kenneth; Gillingham, Michael (2003): *Purchasing and Supply Chain Management*, 6. Aufl., Harlow, London u. a. 2003.
- Macha, Roman (2003): *Grundlagen der Kosten- und Leistungsrechnung*, 3., völlig überarb. Aufl., München 2003.
- Mag, Wolfgang (1990): *Grundzüge der Entscheidungstheorie*, München 1990.
- Malcolm, Scott A.; Zenios, Stavros A. (1994): Robust optimization for power systems capacity expansion under uncertainty, in: *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 45, No. 9, 1994, S. 1040-1049.
- Matschke, Manfred Jürgen; Hering, Thomas; Klingelhöfer, Heinz Eckart (2002): *Finanzanalyse und Finanzplanung*, München, Wien u. a. 2002.
- Mentzer, John T.; DeWitt, William; Keebler, James S.; Min, Soonhong; Nix, Nancy W.; Smith, Carlo D.; Zacharia, Zach G. (2001): Defining supply chain management, in: *Journal of Business Logistics*, Vol. 22, No. 2, 2001, S. 1-25.
- Min, Hokey (1994): International Supplier Selection: A multi-attribute utility approach, in: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 24, No. 5, 1994, S. 24-33.
- MirHassani, S. A.; Lucas, C.; Mitra, G.; Messina, E.; Poojari, C. A. (2000): Computational solution of capacity planning models under uncertainty, in: *Parallel Computing*, Vol. 26, 2000, S. 511-538.
- Mißler-Behr, Magdalena (1993): *Methoden der Szenarioanalyse*, Wiesbaden 1993, zugl. Diss. Universität Augsburg 1993.
- Monczka, Robert M.; Trent, Robert J.; Handfield, Robert B. (2005): *Purchasing and Supply Chain Management*, 3. Aufl., Mason 2005.

- Muckstadt, John A.; Murray, David H.; Rapold, James A.; Collins, Dwight E. (2001): Guidelines for collaborative supply chain system design and operation, in: *Information System Frontiers*, Vol. 3, No. 4, 2001, S. 427-453.
- Mulvey, John M.; Vanderbei, Robert J.; Zenios, Stavros A. (1995): Robust optimization of large-scale systems, in: *Operations Research*, Vol. 43, No. 2, 1995, S. 264-281.
- Narasimhan, Ram (1983): An analytical approach to supplier selection, in: *Journal of Purchasing and Materials Management*, Vol. 19, No. 4, 1983, S. 27-32.
- Nauck, Detlef; Kruse, Rudolf (1997): Fuzzy-Systeme und Soft Computing, in: Biethan, Jörg; Hönerloh, Albrecht; Kuhl, Jochen; Nissen, Volker (Hrsg.): *Fuzzy-Set-Theorie in betriebswirtschaftlichen Anwendungen*, München 1997, S. 3-21.
- Nebel, Theodor (2004): *Produktionswirtschaft*, 5., unwes. veränd. Aufl., München, Wien u. a. 2004.
- Nydick, Robert L.; Hill, Ronald Paul (1992): Using the analytic hierarchy process to structure the supplier selection procedure, in: *Journal of Purchasing and Materials Management*, Vol. 28, No. 2, 1992, S. 31-36.
- O'Brian, F. A. (2004): Scenario planning - Lessons for practice from teaching and learning, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 152, No. 3, 2004, S. 709-722.
- Oeldorf, Gerhard; Olfert, Klaus (2004): *Materialwirtschaft*, 11., verb. und aktual. Aufl., Ludwigshafen 2004.
- Ossola-Haring, Claudia (2003): *Das große Handbuch Kennzahlen zur Unternehmensführung, Kennzahlen richtig verstehen, verknüpfen und interpretieren*, 2., überarb. Aufl. München 2003.
- Otto, Andreas; Kotzab, Herbert (2001): Der Beitrag des Supply Chain Management zum Management von Supply Chains – Überlegungen zu einer unpopulären Frage, in: *Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung*, 53. Jg., 2001, S. 157-176.
- Pan, Andrew C. (1989): Allocation of order quantity among suppliers, in: *Journal of Purchasing and Materials Management*, Vol. 25, No. 3, 1989, S. 36-39.
- Patton, W. E. (1996): Use of human judgement models in industrial buyers' vendor selection decisions, in: *Industrial Marketing Management*, Vol. 25, No. 2, 1996, S. 135-149.



- Pedraja-Chaparro, Francisco; Salinas-Jimenez, Javier; Smith, Peter (1997): On the role of weight restrictions in data envelopment analysis, in: *Journal of Productivity Analysis*, Vol. 8, No. 2, 1997, S. 215-230.
- Pérez, Joaquin (1995): Some comments on saaty's AHP, in: *Management Science*, Vol. 41, No. 6, 1995, S. 1091-1095.
- Persson, Fredrik; Olhager, Jan (2002): Performance simulation of supply chain designs, in: *International Journal of Production Economics*, Vol. 77, No. 3, 2002, S. 231-245.
- Petroni, Alberto; Braglia, Marcello (2000): Vendor selection using principal component analysis, in: *The Journal of Supply Chain Management*, Vol. 36, No. 2, 2000, S. 63-69.
- Pfohl, Hans-Christian (2004): *Logistik-Management: Konzeption und Funktionen*, 2., überarb. und erw. Aufl., Berlin, Heidelberg u. a. 2004.
- Pfohl, Hans-Christian (2000): Supply Chain Management: Konzept, Trends, Strategien, in: Pfohl, Hans-Christian (Hrsg.): *Supply Chain Management: Logistik plus? Logistikkette, Marketingkette, Finanzkette*, Berlin 2000, S. 1-42.
- Pirkul, Hasan; Jayaraman, Vaidyanathan (1996): Production, transportation, and distribution planning in a multi-commodity tri-echelon system, in: *Transportation Science*, Vol. 30, No. 4, 1996, S. 291-302.
- Pooley, John (1994): Integrated production and distribution facility planning at Ault Foods, in: *Interfaces*, Vol. 24, No. 4, 1994, S. 113-121.
- Pye, Roger (1978): A formal decision-theoretic approach to flexibility and robustness, in: *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 29, No. 3, 1978, S. 215-227.
- Reichardt, Helmut; Reichardt, Agnes (2002): *Statistische Methodenlehre für Wirtschaftswissenschaftler*, 11., durchgesehene Aufl., Wiesbaden 2002.
- Reiner, Gerald (2004): Supply chain performance measurement with customer satisfaction and uncertainties, in: Spengler, Thomas; Voss, Stefan; Kopfer, Herbert (Hrsg.): *Logistik Management: Prozesse, Systeme, Ausbildung*, Heidelberg 2004, S. 217-233.
- Reith-Ahlemeier, Gabriele (2002): *Ressourcenorientierte Bestellmengenplanung und Lieferantenauswahl: Modelle und Algorithmen für Supply Chain Management und E-Commerce*, Norderstedt 2002, zugl. Diss. Universität Köln 2001.

- Riemer, Kai; Klein, Stefan (2002): Supplier Relationship Management, in: Knut, Hildebrand (Hrsg.): HMD, Praxis der Wirtschaftsinformatik, Nr. 228, 2002, S. 5-22.
- Rohde, Jens; Meyr, Herbert; Wagner, Michael (2000): Die Supply Chain Planning Matrix, in: PPS Management, 5. Jg., Nr. 1, S. 10-15.
- Romero, Carlos (2004): A general structure of achievement function for a goal programming model, in: European Journal of Operational Research, Vol. 153, No. 3, 2004, S. 675-686.
- Rosenblatt, Meir J.; Lee, Hau L. (1987): A robustness approach to facilities design, in: International Journal of Production Research, Vol. 25, No. 4, 1987, S. 479-486.
- Rosenhead, Jonathan; Elton, Martin; Gupta, Shiv K. (1972): Robustness and optimality as criteria for strategic decisions, in: Operational Research Quarterly, Vol. 23, No. 4, 1972, S. 413-431.
- Roth, Britta (1998): Lösungsverfahren für mehrkriterielle Entscheidungsprobleme: Klassische Verfahren, neuronale Netze und Fuzzy Logic, Frankfurt am Main, Berlin u. a. 1998, zugl. Diss. Universität Hamburg 1997.
- Runzheimer, Bodo (1999): Operations Research: Lineare Planungsrechnung, Netzplantechnik, Simulation und Warteschlangentheorie, 7. Aufl., Wiesbaden 1999.
- Saaty, Thomas L. (2004): Decision making – The analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP), in: Journal of Systems Science and Systems Engineering, Vol. 13, No. 1, 2004, S. 1-35.
- Saaty, Thomas L. (2001): Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process, 2. Aufl., Pittsburgh 2001.
- Saaty, Thomas L. (1990a): How to make a decision: The analytic hierarchy process, in: European Journal of Operational Research, Vol. 48, No. 1, 1990, S. 9-26.
- Saaty, Thomas L. (1990b): An exposition of the AHP in reply to the paper “Remarks on the analytic hierarchy process”, in: Management Science, Vol. 36, No. 3, 1990, S. 259-268.
- Saaty, Thomas L. (1980): The analytic hierarchy process, New York, St. Louis u. a. 1980.
- Saaty, Thomas L.; Vargas, Luis G. (2001): Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process, Boston, Dordrecht u. a. 2001.

- Sabri, E. H.; Beamon, Benita M. (2000): A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design, in: OMEGA-International Journal of Management Science, Vol. 28, No. 5, 2000, S. 581-598.
- Sahinidis, Nikolaos V. (2004): Optimization under uncertainty: state-of-the-art and opportunities, in: Computers and Chemical Engineering, Vol. 28, No. 6-7, 2004, S. 971-983.
- Sako, Mari (2004): Supplier development at Honda, Nissan and Toyota: Comparative case studies of organizational capability enhancement, in: Industrial and Corporate Change, Vol. 13, No. 2, 2004, S. 281-308.
- Saliger, Edgar (2003): Betriebswirtschaftliche Entscheidungstheorie, 5., durchges. Aufl., München, Wien 2003.
- Sarkis, Joseph; Talluri, Srinivas (2002): A model for strategic supplier selection, in: The Journal of Supply Chain Management: A Global Review of Purchasing and Supply, Vol. 38, No. 1, 2002, S. 18-28.
- Scherer, Jürgen (1991): Zur Entwicklung und zum Einsatz von Objektmerkmalen als Entscheidungskriterien in der Beschaffung, Köln 1991.
- Scherm, Ewald (1992): Die Szenario-Technik – Grundlage effektiver strategischer Planung, in: WISU, Das Wirtschaftsstudium, 21. Jg., Nr. 2, 1992, S. 95-97.
- Schiemenz, Bernd; Schönert, Olaf (2003): Entscheidung und Produktion, 2., überarb. und erw. Aufl., München, Wien 2003.
- Schmidt, G.; Wilhelm, W.E. (2000): Strategic, tactical and operational decisions in multi-national logistics networks: A review and discussion of modelling issues, in: International Journal of Production Research, Vol. 38, No. 7, 2000, S. 1501-1523.
- Schneeweiß, Christoph (1998): On the applicability of activity based costing as a planning instrument, in: International Journal of Production Economics, Vol. 54, No. 3, 1998, S. 277-284.
- Schneeweiß, Christoph (1992): Planung, Bd. 2: Konzepte der Prozeß- und Modellgestaltung, Berlin, Heidelberg u. a. 1992.
- Schneeweiß, Christoph (1991): Planung, Bd. 1: Systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen, Berlin, Heidelberg u. a. 1991.
- Schneeweiß, Christoph (1990): Kostenwirksamkeitsanalyse, Nutzwertanalyse und Multi-Attributive Nutzentheorie, in: WiSt Wirtschaftswissenschaftliches Studium, 19. Jg., Nr. 1, 1990, S. 13-18.

- Schniederjans, Marc J. (1995): *Goal Programming: Methodology and Applications*, Boston, Dordrecht, London 1995.
- Schoemaker, Paul J. H. (1995): Scenario planning: A tool for strategic thinking, in: *Sloan Management Review*, Vol. 36, No. 2, 1995, S. 25-40.
- Schoemaker, Paul J. H. (1993): Multiple scenario development: Its conceptual and behavioural foundation, in: *Strategic Management Journal*, Vol. 14, 1993, S. 193-213.
- Schoemaker, Paul J. H.; van der Heijden, Cornelius A. J. M. (1992): Integrating scenarios into strategic planning at Royal Dutch/Shell, in: *Planning Review*, Vol. 20, No. 3, 1992, S. 41-46.
- Schönsleben, Paul; Hieber, Ralf (2004): Gestaltung von effizienten Wertschöpfungspartnerschaften im Supply Chain Management, in: Busch, Axel; Dangelmeier, Wilhelm (Hrsg.): *Integriertes Supply Chain Management: Theorie und Praxis effektiver unternehmensübergreifender Geschäftsprozesse*, 2. Aufl., Wiesbaden 2004, S. 47-64.
- Scholl, Armin (2001): *Robuste Planung und Optimierung: Grundlagen – Konzepte und Methoden – Experimentelle Untersuchungen*, Heidelberg 2001, zugl. Habilitationsschrift Technische Universität Darmstadt 2000.
- Schulte, Gerd (2001): *Material- und Logistikmanagement*, 2., wes. erw. und verb. Auflage, München, Wien 2001.
- Schweizerischer Verband Creditreform (2004): Risikobestimmung auf einen Blick, [https://secure.creditreform.ch/struktur/dienstleistungen/pdf/svc\\_1550d.pdf](https://secure.creditreform.ch/struktur/dienstleistungen/pdf/svc_1550d.pdf), abgerufen am: 10.01.2005.
- Sen, Suvrajeet; Higle, Julia L. (1999): An introductory tutorial on stochastic linear programming models, in: *Interfaces*, Vol. 29, No. 2, 1999, S. 33-61.
- Seuring, Stefan (2000): Entscheidungsfelder im Supply-Chain-Management – Nutzung der Produktions-Kooperations-Matrix als Gestaltungsrahmen, in: *Zeitschrift für Organisation*, 72. Jg., Nr. 6, S. 324-329.
- Seuring, Stefan (2001): *Supply Chain Costing: Kostenmanagement in der Wertschöpfungskette mit Target Costing und Prozesskostenrechnung*, München 2001, zugl. Diss. Universität Oldenburg 2001.
- Shapiro, Jeremy F. (2001): *Modeling the Supply Chain*, Pacific Grove 2001.
- Simchi-Levi, David; Kaminsky, Philip; Simchi-Levi, Edith (2003): *Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies, and Case Studies*, 2. Aufl., Boston, Dubuque u. a. 2003.

- Smytka, Daniel L.; Clemens, Michael W. (1993): Total cost supplier selection model: A case study, in: *International Journal of Purchasing and Materials Management*, Vol. 29, No. 1, 1993, S. 42-49.
- Soteriou, Andreas C.; Chase, Richard B. (2000): A robust optimization approach for improving service quality, in: *Manufacturing & Service Operations Management*, Vol. 2, No. 3, 2000, S. 264-286.
- Stadtler, Hartmut (2002): Supply Chain Management – An Overview, in: Stadtler, Hartmut; Kilger, Christoph (Hrsg.): *Supply Chain Management and Advanced Planning – Concepts, Models, Software and Case Studies*, 2. Aufl., Berlin, Heidelberg u. a. 2002, S. 7-28.
- Staehele, Wolfgang H. (1999): *Management: Eine verhaltenswissenschaftliche Perspektive*, 8., überarb. Aufl., München 1999.
- Steinmann, Horst; Schreyögg, Georg (2000): *Management: Grundlagen der Unternehmensführung, Konzepte – Funktionen – Fallstudien*, 5., überarb. Aufl., Wiesbaden 2000.
- Steven, Marion (1998): *Produktionstheorie*, Wiesbaden 1998.
- Steven, Marion; Krüger, Rolf (2004a): Supply Chain Event Management für globale Logistikprozesse: Charakteristika, konzeptionelle Bestandteile und deren Umsetzung in Informationssysteme, in: Spengler, Thomas; Voss, Stefan; Kopfer, Herbert (Hrsg.): *Logistik Management: Prozesse, Systeme, Ausbildung*, Heidelberg 2004, S. 179-195.
- Steven, Marion; Krüger, Rolf (2004b): Advanced Planning Systems – Grundlagen, Funktionalitäten, Anwendungen, in: Busch, Axel; Dangelmeier, Wilhelm (Hrsg.): *Integriertes Supply Chain Management: Theorie und Praxis effektiver unternehmensübergreifender Geschäftsprozesse*, Wiesbaden 2004, S. 169-186.
- Steven, Marion; Krüger, Rolf (2001): Internationale Logistik: Vom internationalen Gütertransfer zum globalen Supply Chain Management, in: Sebastian, Hans-Jürgen; Grünert, Tore (Hrsg.): *Logistik Management, Supply Chain Management und e-Business*, Stuttgart, Leipzig u. a. 2001, S. 31-40.
- Steven, Marion; Krüger, Rolf; Tengler, Sebastian (2000): Informationssysteme für das Supply Chain Management, in: *PPS Management*, Vol. 5, No. 2, 2000, S. 15-23.
- Steven, Marion; Letmathe, Peter (2000): Der Einsatz von Kennzahlen in der Umweltberichterstattung, in: *Zeitschrift für angewandte Umweltforschung*, 13. Jg., Nr. 1/2, 2000, S. 31-49.

- Steven, Marion; Tengler, Sebastian; Krüger, Rolf (2003a): Reverse Logistics (I), in: Das Wirtschaftsstudium, 32. Jg., Heft 5, 2003, S. 643-647.
- Steven, Marion; Tengler, Sebastian; Krüger, Rolf (2003b): Reverse Logistics (II), in: Das Wirtschaftsstudium, 32. Jg., Heft 6, 2003, S. 779-784.
- Stölzle, Wolfgang (1999): Industrial Relationships, München, Wien 1999.
- Stölze, Wolfgang; Heusler, Klaus Felix (2003): Supplier Relationship Management – Entstehung, Konzeptverständnis und methodisch-instrumentelle Anwendung, in: Bogalschewski, Ronald; Götze, Uwe (Hrsg.): Management und Controlling von Einkauf und Logistik: Festschrift für Jürgen Bloech, Gernsbach 2003, S. 167-194.
- Sucky, Eric (2004): Koordination in Supply Chains: Spieltheoretische Ansätze zur Ermittlung integrierter Bestell- und Produktionspolitiken, Wiesbaden 2004, zugl. Diss. Universität Frankfurt a. M. 2003.
- Suh, Min-Ho; Lee, Tai-Yong (2002): Robust optimal design of wastewater reuse network of plating process, in: Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 35, No. 9, 2002, S. 863-873.
- Swaminathan, Jayashankar M.; Tayur, Sridhar R. (2003): Models for supply chains in e-business, in: Management Science, Vol. 49, No. 10, 2003, S. 1387-1406.
- Talluri, Srinivas (2002): Enhancing supply decisions through the use of efficient marginal costs models, in: The Journal of Supply Chain Management, Vol. 38, No. 4, 2002, S. 4-10.
- Talluri, Srinivas; Baker, R.C. (2002): A multi-phase mathematical programming approach for effective supply chain design, in: European Journal of Operational Research, Vol. 141, No. 3, 2002, S. 544-558.
- Talluri, Srinivas; Narasimhan (2002): Vendor evaluation with performance variability: A max-min approach, in: European Journal of Operational Research, Vol. 146, No. 3, 2003, S. 543-552.
- Tan, Keah Choon (2001): A framework for supply chain management literature, in: European Journal of Purchasing & Supply Management, Vol. 7, No. 1, 2001, S. 39-48.
- Tempelmeier, Horst (2003): Material-Logistik: Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung und das Supply Chain Management, 5., neu bearb. Aufl., Berlin, Heidelberg u. a. 2003.

- Tempelmeier, Horst (1993): Beschaffung, Materialwirtschaft, Logistik, in: Wittmann, Waldemar (Hrsg.): Handwörterbuch der Betriebswirtschaft, 5., völlig neu gestalt. Aufl., Stuttgart 1993.
- Theisen, Paul (1987): Beschaffungsplanung – Grundbegriffe und Aufgaben, in: Das Wirtschaftsstudium, 16. Jg., Nr. 8-9, 1987, S. 423-429.
- Thanassoulis, Emmanuel (2001): Introduction to the Theory and Application of Data Envelopment Analysis: A Foundation Text with Integrated Software, Norwell, Dordrecht 2001.
- Thorn, Jens (2002): Taktisches Supply Chain Planning: Planungsunterstützung durch deterministische und stochastische Optimierungsmodelle, Frankfurt am Main, Berlin u. a. 2002, zugl. Diss. Ruhr-Universität Bochum 2001.
- Timmerman, Ed (1986): An approach to vendor performance evaluation, in: Journal of Purchasing and Materials Management, Vol. 22, No. 4, 1986, S. 2-8.
- Timpe, Christian H.; Kallrath, Josef (2000): Optimal planning in large multi-site production networks, in: European Journal of Operational Research, Vol. 126, No. 2, 2000, S. 422-435.
- Triantaphyllou, Evangelos (2000): Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study, Dordrecht, Boston u. a. 2000.
- Tsiakis, P.; Shah, N.; Pantelides, C. C. (2001): Design of multi-echelon supply chain networks under demand uncertainty, in: Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 40, No. 16, 2001, S. 3585-3604.
- Vahrenkamp, Richard (2003): Quantitative Logistik für das Supply Chain Management, München, Wien 2003.
- Vairaktarakis, George L. (2000): Robust multi-item newsboy models with a budget constraint, in: International Journal of Production Economics, Vol. 66, No. 3, 2000, S. 213-226.
- van Landeghem, Hendrik; Vanmaele, Hendrik (2002): Robust planning: A new paradigm for demand chain planning, in: Journal of Operations Management, Vol. 20, No. 6, 2002, S. 769-783.
- van Roy, Tony J. (1989): Multi-level production and distribution planning with transportation fleet optimization, in: Management Science, Vol. 35, No. 12, 1989, S. 1443-1453.
- van Weele, Arjan, J. (2002): Purchasing and Supply Chain Management: Analysis, Planning and Practice, 3. Aufl., London u. a. 2002.

- Vassiadou-Zeniou, Christina; Zenios, Stavros A. (1996): Robust optimization models for managing callable bond portfolios, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 91, No. 2, 1996, S. 264-273.
- Vidal, Carlos J.; Goetschalckx, Marc (2000): Modeling the effect of uncertainties on global logistics systems, in: *Journal of Business Logistics*, Vol. 21, No. 1, 2000, S. 95-120.
- Vidal, Carlos J.; Goetschalckx, Marc (1997): Strategic production-distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 98, No. 1, 1997, S. 1-18.
- Viswanadham, N.; Gaonkar, Roshan S. (2003): Partner selection and synchronized planning in dynamic manufacturing networks, in: *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 19, No. 1, 2003, S. 117-130.
- Vladimirou, Hercules; Zenios, Stavros A. (1997): Stochastic programming and robust optimization, in: Gal, Thomas; Greenberg, Harvey J. (Hrsg.): *Advances in Sensitivity Analysis and Parametric Programming*, Norwell, Dordrecht 1997, S. 12-1-S. 12-53.
- Vonderembse, Mark A.; Tracey, Michael (1999): The impact of supplier selection criteria and supplier involvement on manufacturing performance, in: *The Journal of Supply Chain Management: A Global Review of Purchasing and Supply*, Vol. 35, No. 3, 1999, S. 33-39.
- Walther, Johannes (2001): Konzeptionelle Grundlagen des Supply Chain Managements, in: Walther, Johannes; Bund, Martina (Hrsg.): *Supply Chain Management: Neue Instrumente zur kundenorientierten Gestaltung integrierter Lieferketten*, Frankfurt am Main 2001, S. 11-31.
- Watkins, David W.; McKinney, Daene C. (1997): Finding robust solutions to water resources problems, in: *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 123, No. 1, 1997, S. 49-58.
- Weber, Charles A. (1996): A data envelopment analysis approach to measuring vendor performance, in: *Supply Chain Management: An International Journal*, Vol. 1, No. 1, 1996, S. 28-39.
- Weber, Charles A.; Current, John R. (1993): A multiobjective approach to vendor selection, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 68, No. 1, 1993, S. 173-184.



- Weber, Charles A.; Current, John R.; Benton, W. C. (1991): Vendor selection criteria and methods, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 50, No. 1, 1991, S. 2-18.
- Weber, Charles A.; Current, John; Desai, Anand (2000): An optimization approach to determining the number of vendors to employ, in: *Supply Chain Management: An International Journal*, Vol. 5, No. 2, 2000, S. 90-98.
- Weber, Charles A.; Desai, Anand (1996): Determination of path to vendor market efficiency using parallel coordinates representation: A negotiation tool for buyers, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 90, No. 1, 1996, S. 142-155.
- Weber, Charles A.; Ellram, Lisa M. (1993): Supplier selection using multi-objective programming: A decision support system approach, in: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 23, No. 2, 1993, S. 3-14.
- Weber, Jürgen (2004): *Einführung in das Controlling*, 10., überarb. und aktual. Aufl., Stuttgart 2004.
- Weber, Jürgen; Dehler, Markus; Wertz, Boris (2000): Supply Chain Management und Logistik, in: *WiSt Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, 29. Jg., Nr. 5, 2000, S. 264-269.
- Weber, Karl (1993): *Mehrkriterielle Entscheidungen*, München, Wien 1993.
- Weigand, Matthias (1998): *Die Erschließung von Zuliefererpotenzialen als Aufgabe des strategischen Beschaffungsmarketing*, Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg 1998.
- Welge, Martin K.; Al-Laham, Andreas (2003): *Strategisches Management: Grundlagen – Prozess – Implementierung*, 4., aktual. Aufl., Wiesbaden 2003.
- Werner, Hartmut (2000): *Supply Chain Management: Grundlagen, Strategien, Instrumente und Controlling*, Wiesbaden 2000.
- Werners, Brigitte (1998): *Einführung in die Fuzzy lineare Optimierung*, Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insbes. Unternehmensforschung und Rechnungswesen, Fakultät für Wirtschaftswissenschaft, Ruhr-Universität Bochum, Bochum 1998.
- Werners, Brigitte (1984): *Interaktive Entscheidungsunterstützung durch ein flexibles mathematisches Programmierungssystem*, München 1984.
- Werners, Brigitte; Thorn, Jens (2003): Collaborative Supply Chain Planning, in: *WiSt Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, 32. Jg., Nr. 10, 2003, S. 590-595.

- Werners, Brigitte; Thorn, Jens (2002): Unternehmungsübergreifende Koordination durch Vendor Managed Inventory, in: *WiSt Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, 31. Jg., Nr. 12, 2002, S. 699-704.
- Werners, Brigitte; Thorn, Jens; Freiwald, Stephanie (2003): Performance-Kriterien für das Supply Chain Design, in: *Supply Chain Management*, 3. Jg., 2003, Nr. 3, S. 7-16.
- Westermann, Herbert (1989): Kosten als Beurteilungsmaßstab bei Portfolio-Analysen, in: *Kostenrechnungspraxis*, 33. Jg., Nr. 1, 1989, S. 15-22.
- Wildemann, Horst (2002): *Supply Chain Management: Leitfaden für ein unternehmensübergreifendes Management*, 3. Aufl., München 2002.
- Williams, Paul H. (1999): *Model Building in Mathematical Programming*, 4. Aufl., Chichester, New York u. a. 1999.
- Windischer, Anna; Mathier, Fabienne; Grote, Gudela (2002): Kooperatives Planen im Supply-Chain-Management, in: *Zeitschrift für Organisation*, 71. Jg., Nr. 1, 2002, S. 14-21.
- Wolf, Joachim (2003): *Organisation, Management, Unternehmensführung: Theorien und Kritik*, Wiesbaden 2003.
- Wong, Peter Shek-Pui; Cheung, Sai-On (2004): Trust in constructing partnering: views from parties of the partnering dance, in: *International Journal of Project Management*, Vol. 22, 2004, S. 437-446.
- Wouda, Francisca H. E.; van Beek, Paul; van der Vorst, Jack G. A. J.; Tacke, Heiko (2002): An application of mixed-integer linear programming models on the redesign of the supply network of Nutricia Dairy & Drinks Group in Hungary, in: *OR Spectrum*, Vol. 24, No. 4, 2002, S. 449-465.
- Yahya, S.; Kingsman, B. (1999): Vendor rating for an entrepreneur development programme: A case study using the analytic hierarchy process method, in: *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 50, No. 9, 1999, S. 916-930.
- Yan, Hong; Yu, Zhenxin; Cheng, Edwin T. C. (2003): A strategic model for supply chain design with logical constraints: Formulation and solution, in: *Computers & Operations Research*, Vol. 30, No. 14, 2003, S. 2135-2155.
- Yang, B.; Burns, N. (2003): Implications of postponement for the supply chain, in: *International Journal of Productions Research*, Vol. 41, No. 9, 2003, S. 2075-2090.
- Yoon, Paul K.; Hwang, Ching-Lai (1995): *Multiple Attribute Decision Making: An Introduction*, Thousand Oaks, London, New Delhi 1995.

- Yu, Chian-Son; Li, Han-Lin (2000): A robust optimization model for stochastic logistic problems, in: *International Journal of Production Economics*, Vol. 64, No. 1-3, 2000, S. 385-397.
- Zäpfel, Günther (1982): *Produktionswirtschaft: Operatives Produktions-Management*, Berlin, New York 1982.
- Zäpfel, Günther; Piekarz, Bartosz (1996): *Supply Chain Controlling: Interaktive und dynamische Regelung der Material- und Warenflüsse*, Wien 1996.
- Zanakis, Stelios H.; Solomon, Anthony; Wishart, Nicole; Dubish, Sandipa (1998): Multi-attribute decision making: A simulation comparison of selected methods, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 107, No. 3, 1998, S. 507-529.
- Zeuch, Michael P. (2002): Kennzahlen zur Bewertung von Supply-Chain-Management-Geschäftsmodellen, in: Voegel, Andreas R.; Zeuch, Michael P. (Hrsg.): *Supply Network Management – Mit Best Practice der Konkurrenz voraus*, Wiesbaden 2002, S. 153-169.
- Zimmermann, Hans-Jürgen (2001): *Fuzzy Set Theory and its Application*, 4. Aufl., Boston, Dordrecht u. a. 2001.
- Zimmermann, Hans-Jürgen (2000): An application-oriented view of modelling uncertainty, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 122, 2000, S. 190-198.
- Zimmerman, Hans-Jürgen (1992): *Operations Research Methoden und Modelle*, 2., überarb. Aufl., Braunschweig, Wiesbaden 1992.
- Zimmermann, Hans-Jürgen; Gutsche, Lothar (1991): *Multi-Criteria Analyse: Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen*, Berlin, Heidelberg u. a. 1991.

## **Bochumer Beiträge zur Unternehmensführung**

Herausgegeben vom Direktorium des Instituts  
für Unternehmensführung der Ruhr-Universität Bochum

- Band 1 Busse von Colbe, Walther/Mattessich, Richard (Hrsg.): Der Computer im Dienste der Unternehmensführung (1968)
- Band 2 Busse von Colbe, Walther/Meyer-Dohm, Peter (Hrsg.): Unternehmerische Planung und Entscheidung (1969)
- Band 3 Anthony, Robert N.: Harvard-Fälle aus der Praxis des betrieblichen Rechnungswesens. Herausgegeben von Richard V. Mattessich unter Mitarbeit von Klaus Herrnberger und Wolf Lange (1969)
- Band 4 Mattessich, Richard: Die wissenschaftlichen Grundlagen des Rechnungswesens (1970)
- Band 5 Schweim, Joachim: Integrierte Unternehmensplanung (1969)
- Band 6 Busse von Colbe, Walther (Hrsg.): Das Rechnungswesen als Instrument der Unternehmensführung (1969)
- Band 7 Domsch, Michel: Simultane Personal- und Investitionsplanung im Produktionsbereich (1970)
- Band 8 Leunig, Manfred: Die Bilanzierung von Beteiligungen. Eine bilanztheoretische Untersuchung (1970)
- Band 9 Franke, Reimund: Betriebsmodelle. Rechensystem für Zwecke der kurzfristigen Planung, Kontrolle und Kalkulation (1972)
- Band 10 Wittenbrink, Hartwig: Kurzfristige Erfolgsplanung und Erfolgskontrolle mit Betriebsmodellen (1975)
- Band 11 Lutter, Marcus (Hrsg.): Recht und Steuer der internationalen Unternehmensverbindungen (1972)
- Band 12 Niebling, Helmut: Kurzfristige Finanzrechnung auf der Grundlage von Kosten- und Erlösmodellen (1973)
- Band 13 Perlitz, Manfred: Die Prognose des Unternehmenswachstums aus Jahresabschlüssen deutscher Aktiengesellschaften (1973)
- Band 14 Niggemann, Walter: Optimale Informationsprozesse in betriebswirtschaftlichen Entscheidungssituationen (1973)
- Band 15 Richardt, Harald: Der aktienrechtliche Abhängigkeitsbericht unter ökonomischen Aspekten (1974)
- Band 16 Backhaus, Klaus: Direktvertrieb in der Investitionsgüterindustrie – Eine Marketing-Entscheidung (1974)
- Band 17 Plinke, Wulff: Kapitalsteuerung in Filialbanken (1975)
- Band 18 Steffen, Rainer: Produktionsplanung bei Fließbandfertigung (1977)
- Band 19 Kolb, Jürgen: Industrielle Erlösrechnung – Grundlagen und Anwendungen (1978)
- Band 20 Busse von Colbe, Walther/Lutter, Marcus (Hrsg.): Wirtschaftsprüfung heute: Entwicklung oder Reform? (1977)
- Band 21 Uphues, Peter: Unternehmerische Anpassung in der Rezession (1979)
- Band 22 Gebhardt, Günther: Insolvenzprognosen aus aktienrechtlichen Jahresabschlüssen (1980)
- Band 23 Domsch, Michel: Systemgestützte Personalarbeit (1980)
- Band 24 Schmied, Volker: Alternativen der Arbeitsgestaltung und ihre Bewertung (1982)

- Band 25 Wäscher, Gerhard: Innerbetriebliche Standortplanung bei einfacher und mehrfacher Zielsetzung (1982)
- Band 26 Weber, Martin: Entscheidungen bei Mehrfachzielen – Verfahren zur Unterstützung von Individual- und Gruppenentscheidungen (1983)
- Band 27 Kroesen, Alfred: Instandhaltungsplanung und Betriebsplankostenrechnung (1983)
- Band 28 Plinke, Wulf: Erlösplanung im industriellen Anlagengeschäft (1985)
- Band 29 Chamoni, Peter: Simulation störanfälliger Systeme (1986)
- Band 30 Arning, Andreas: Die wirtschaftliche Bewertung der Zentrenfertigung – Dargestellt am Beispiel einer Fertigungsinsel (1987)
- Band 31 Gebhardt, Günther: Finanzielle Planung und Kontrolle bei internationaler Unternehmenstätigkeit
- Band 32 Markiewicz, Michael: Ersatzteildisposition im Maschinenbau – Betriebswirtschaftliche Methoden der Planung und Überwachung (1988)
- Band 33 Pellens, Bernd: Der Informationswert von Konzernabschlüssen – Eine empirische Untersuchung deutscher Börsengesellschaften (1989)
- Band 34 Mrotzek, Rüdiger: Bewertung direkter Auslandsinvestitionen mit Hilfe betrieblicher Investitionskalküle (1989)
- Band 35 Deppe, Joachim: Quality Circle und Lernstatt – Ein integrativer Ansatz (1989, 3. Auflage 1993)
- Band 36 Rademacher, Michael: Arbeitszeitverkürzung und -flexibilisierung – Formen und betriebliche Auswirkungen (1990)
- Band 37 Kaiser, Klaus: Kosten- und Leistungsrechnung bei automatisierter Produktion (1991, 2. Auflage 1993)
- Band 38 Müller, Hermann: Industrielle Abfallbewältigung – Entscheidungsprobleme aus betriebswirtschaftlicher Sicht (1991)
- Band 39 Schörner, Peter: Gesetzliches Insiderhandelsverbot – Eine ordnungspolitische Analyse (1991)
- Band 40 Bentler, Martin: Grundsätze ordnungsmäßiger Bilanzierung für die Equitymethode (1991)
- Band 41 Brüggerhoff, Jürgen: Management von Desinvestitionen (1992)
- Band 42 Bröker, Erich W.: Erfolgsrechnung im industriellen Anlagengeschäft – Ein dynamischer Ansatz auf Zahlungsbasis – (1993)
- Band 43 Frankenberg, Peter: Transnationale Analyse US-amerikanischer und deutscher Jahresabschlüsse – Eine theoretische und empirische Untersuchung (1993)
- Band 44 Kleinaltenkamp, Michael: Standardisierung und Marktprozeß – Entwicklungen und Auswirkungen im CIM-Bereich (1993)
- Band 45 Pellens, Bernhard: Aktionärsschutz im Konzern – Empirische und theoretische Analyse der Reformvorschläge der Konzernverfassung (1994)
- Band 46 Reckenfelderbäumer, Martin: Marketing-Accounting im Dienstleistungsbereich – Konzeption eines prozeßkostengestützten Instrumentariums (1995)
- Band 47 Knittel, Friedrich: Technikgestützte Kommunikation und Kooperation im Büro. Entwicklungshindernisse – Einsatzstrategien – Gestaltungskonzepte (1995)
- Band 48 Riezler, Stephan: Lebenszyklusrechnung – Instrument des Controlling strategischer Projekte (1996)
- Band 49 Schulte, Jörn: Rechnungslegung und Aktienkursentwicklung – Erklärung und Prognose von Aktienrenditen durch Einzel- und Konzernabschlußdaten (1996)

- Band 50 Muhr, Martin: Zeitsparmodelle in der Industrie – Grundlagen und betriebswirtschaftliche Bedeutung mehrjähriger Arbeitszeitkonten (1996)
- Band 51 Brotte, Jörg: US-amerikanische und deutsche Geschäftsberichte. Notwendigkeit, Regulierung und Praxis jahresabschlußbergänzender Informationen (1997)
- Band 52 Gersch, Martin: Vernetzte Geschäftsbeziehungen. Die Nutzung von EDI als Instrument des Geschäftsbeziehungsmanagement (1998)
- Band 53 Währisch, Michael: Kostenrechnungspraxis in der deutschen Industrie. Eine empirische Studie (1998)
- Band 54 Völkner, Peer: Modellbasierte Planung von Geschäftsprozeßabläufen (1998)
- Band 55 Fülbier, Rolf Uwe: Regulierung der Ad-hoc-Publizität. Ein Beitrag zur ökonomischen Analyse des Rechts (1998)

**Band 1 - 55 erschienen beim Gabler Verlag Wiesbaden**

- Band 56 Ane-Kristin Reif-Mosel: Computergestützte Kooperation im Büro. Gestaltung unter Berücksichtigung der Elemente *Aufgabe, Struktur, Technik und Personal* (2000)
- Band 57 Claude Tomaszewski: Bewertung strategischer Flexibilität beim Unternehmenserwerb. Der Wertbeitrag von Realoptionen (2000)
- Band 58 Thomas Erler: Business Objects als Gestaltungskonzept strategischer Informationssystemplanung (2000)
- Band 59 Joachim Gassen: Datenbankgestützte Rechnungslegungspublizität. Ein Beitrag zur Evolution der Rechnungslegung (2000)
- Band 60 Frauke Streubel: Organisatorische Gestaltung und Informationsmanagement in der lernenden Unternehmung. Bausteine eines Managementkonzeptes organisationalen Lernens (2000)
- Band 61 Andreas von der Gathen: Marken in Jahresabschluß und Lagebericht (2001)
- Band 62 Lars Otterpohl: Koordination in nichtlinearen dynamischen Systemen (2002)
- Band 63 Ralf Schremper: Aktienrückkauf und Kapitalmarkt. Eine theoretische und empirische Analyse deutscher Aktienrückkaufprogramme (2002)
- Band 64 Peter Ruhwedel: Aufsichtsratsplanungssysteme. Theoretische Grundlagen und praktische Ausgestaltung in Publikumsaktiengesellschaften (2002)
- Band 65 Jens Thorn: Taktisches Supply Chain Planning. Planungsunterstützung durch deterministische und stochastische Optimierungsmodelle (2002)
- Band 66 Dirk Beier: Informationsmanagement aus Sicht der Betriebswirtschaftslehre. Theoretische Ansätze und das Beispiel Mobile Business. (2002)
- Band 67 Nils Crasselt: Wertorientierte Managemententlohnung, Unternehmensrechnung und Investitionssteuerung. Analyse unter Berücksichtigung von Realoptionen. (2003)
- Band 68 Franca Ruhwedel: Eigentümerstruktur und Unternehmenserfolg. Eine theoretische und empirische Analyse deutscher börsennotierter Unternehmen. (2003)
- Band 69 Andreas Bonse: Informationsgehalt von Konzernabschlüssen nach HGB, IAS und US-GAAP. Eine empirische Analyse aus Sicht der Eigenkapitalgeber. (2004)
- Band 70 Thorsten Sellhorn: Goodwill Impairment. An Empirical Investigation of Write-Offs under SFAS 142. (2004)

- Band 71 Bernd Slaghuis: Vertragsmanagement für Investitionsprojekte. Quantitative Projektplanung zur Unterstützung des Contract Managements unter Berücksichtigung von Informationsasymmetrie. (2005)
- Band 72 Stephanie Freiwald: Supply Chain Design. Robuste Planung mit differenzierter Auswahl der Zulieferer. (2005)

[www.peterlang.de](http://www.peterlang.de)





Mark Jehle

# Wertorientiertes Supply Chain Management und Supply Chain Controlling

## Modelle, Konzeption und Umsetzung

Frankfurt am Main, Berlin, Bern, Bruxelles, New York, Oxford, Wien, 2005.  
XXI, 253 S., zahlr. Graf.

Controlling und Management. Herausgegeben von Thomas Reichmann und Martin K. Welge. Bd. 28

ISBN 3-631-53507-4 · br. € 51.50\*

Das Management und das Controlling von Netzwerken gewinnen in der betriebswirtschaftlichen Forschung und Praxis zunehmend an Bedeutung. Insbesondere mit der Bildung von Supply Chains versuchen Unternehmen, den Herausforderungen der Internationalisierung der Wirtschaft zu begegnen. Allerdings ist ihr Verbreitungsgrad in der Praxis gegenwärtig als eher niedrig einzuschätzen, insbesondere weil ein effektives und effizientes Supply Chain Management und SC-Controlling fehlt. Der Autor stellt in seiner Schrift eine wertorientierte SC-Management- und SC-Controllingkonzeption vor, die einen wesentlichen Beitrag zur Beseitigung der konzeptionellen und theoretischen Defizite in der Forschung sowie zum Abbau der festgestellten Implementierungslücke in der Praxis leisten kann.

*Aus dem Inhalt:* State of the Art der SCM- und SC-Forschung · Wertorientierte SC-Führungskonzeption · Controllingbausteine des SC-Konfigurations-, SC-Prozess-, SC-Finanz-, SC-Risiko- und SC-Beziehungsmanagements · Vorgehensmodell zum Aufbau einer Supply Chain · EDV-technische Unterstützungsmöglichkeiten



Frankfurt am Main · Berlin · Bern · Bruxelles · New York · Oxford · Wien  
Auslieferung: Verlag Peter Lang AG  
Moosstr. 1, CH-2542 Pieterlen  
Telefax 00 41 (0) 32 / 376 17 27

\*inklusive der in Deutschland gültigen Mehrwertsteuer  
Preisänderungen vorbehalten

Homepage <http://www.peterlang.de>

