

Distributionsbasierte Beschaffungsplanung im Flüssiggashandel

Ein robuster Ansatz zur Entscheidungsunterstützung

Vom Fachbereich Wirtschaftswissenschaften
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades
Doctor rerum politicarum (Dr. rer. pol.)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Kffr. Lydia Badel

Tag der mündlichen Prüfung:	24. Februar 2014
Dekan:	Prof. Dr. Michael Hassemer
Vorsitzender:	Prof. Dr. Stefan Roth
1. Berichterstatter:	Prof. Dr. Hans Corsten
2. Berichterstatter:	Prof. Dr. Volker Lingnau

D 386

2014

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XII
Symbolverzeichnis	XIII
Verzeichnis der Anhänge	XVI
1 Problemstellung und Gang der Untersuchung	1
2 Charakteristika des Flüssiggashandels.....	14
2.1 Eigenschaften des Produktes Flüssiggas.....	14
2.2 Struktur der Versorgungskette	17
2.3 Beschaffungsplanung im Flüssiggashandel	23
2.3.1 Beschaffungsplanung auf Unternehmungsebene	27
2.3.2 Beschaffungsplanung auf Netzwerkebene	31
3 Grundmodell zur distributionsbasierten Beschaffungsplanung	33
3.1 Konzeption des Grundmodells.....	33
3.2 Modellierung des Grundmodells.....	39
3.3 Kritische Analyse des Grundmodells.....	52
4 Erweiterung des Grundmodells um die Berücksichtigung von Unsicherheiten.....	63
4.1 Ansätze zur Abbildung der Unsicherheit.....	63
4.1.1 Einwertige Abbildung der Unsicherheit.....	65
4.1.1.1 Sensitivitätsanalyse.....	66
4.1.1.2 Risikoanalyse.....	68

4.1.2	Mehrwertige Abbildung der Unsicherheit.....	69
4.1.2.1	Stochastische Optimierung.....	69
4.1.2.2	Robuste Optimierung.....	71
4.2	Konzeption eines robusten Modells für die distributionsbasierte Beschaffungsplanung	77
4.2.1	Kriterien zur Messung der Robustheit.....	77
4.2.2	Klassifikation der Ansätze zur robusten Optimierung	80
4.3	Modellierung des robusten Modells für die distributions- basierte Beschaffungsplanung	85
5	Numerische Ergebnisanalyse des robusten Modells.....	91
5.1	Spezifikation der Analyse	91
5.1.1	Datenlage	91
5.1.2	Untersuchte Konstellationen.....	93
5.2	Vergleich der Ergebnisse	95
5.2.1	Konstellationspezifische Untersuchung.....	96
5.2.1.1	Einkriterielle Ergebnisanalyse.....	98
5.2.1.2	Mehrkriterielle Ergebnisanalyse.....	104
5.2.2	Konstellationsübergreifende Untersuchung	109
5.2.2.1	Simultane Schwankungen der Merkmale	110
5.2.2.2	Singuläre Schwankungen einzelner Merkmale ...	116
5.2.2.2.1	Schwankungen des Bedarfs.....	116
5.2.2.2.2	Schwankungen des Anteils unsicherer Aufträge	119
5.2.2.2.3	Schwankungen des Transportkostenfaktors	122

5.3	Parametrisierung	126
5.3.1	Untersuchung des Einflusses der Parameter.....	127
5.3.1.1	Einfluss von positiven und negativen Abweichungen der Bedarfsmengen.....	127
5.3.1.2	Einfluss von Optimalitätsforderung und negativer Abweichung der Bedarfsmengen.....	131
5.3.1.3	Einfluss von Optimalitätsforderung und positiver Abweichung der Bedarfsmengen	134
5.3.2	Entscheidungsunterstützung zur Parametrisierung	137
6	Abschließende Bemerkungen und Ausblick	139
	Literatur	144
	Anhänge.....	167

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Strukturmodell eines Entscheidungsprozesses	1
Abbildung 2: Phasen des Beschaffungsprozesses	3
Abbildung 3: Der Handel als Teil der Versorgungskette	6
Abbildung 4: Aufgabenverteilung einer Versorgungskette mit erweiterter Leistungstiefe des Handels	7
Abbildung 5: Abgrenzung des zugrundeliegenden Beschaffungsbegriffs	10
Abbildung 6: Beispielhafte Darstellung zweier Touren zur Versorgung der Nachfrager mit Flüssiggas	22
Abbildung 7: Darstellung der Inputdaten für die Modellierung	44
Abbildung 8: Vergleich modellgenerierter und beobachteter Transport- und Bestellkosten	54
Abbildung 9: Preis-Bestellmengenfunktion für einen gewählten Lieferanten	58
Abbildung 10: Vergleich unterschiedlicher Preis-Bestellmengen-Funktionen	59
Abbildung 11: Darstellung der Gesamtkosten in Abhängigkeit der Mengen und Preise	60
Abbildung 12: Preis-Bestellmengenfunktionen zur Verhandlung von Minimal- und Maximalabnahmemengen	61
Abbildung 13: Vorgehensweise der robusten Optimierung	72
Abbildung 14: Beziehung der Robustheit zu verwandten Termini	74
Abbildung 15: Robustheitskriterien und deren Zusammenhang	78
Abbildung 16: Bestellkosten der robusten Modellierung im Vergleich zum deterministischen Ersatzwertmodell (DEM)	98

Abbildung 17: Transportkosten der robusten Modellierung im Vergleich zum deterministischen Ersatzwertmodell (DEM) .	100
Abbildung 18: Gesamtkosten der robusten Modellierung im Vergleich zum deterministischen Ersatzwertmodell (DEM)	101
Abbildung 19 Absolute und relative Fehlmengen als Ergebnis der robusten Modellierung im Vergleich zum deterministischen Ersatzwertmodell (DEM).....	102
Abbildung 20: Absolute und relative Anzahl unvollständig befriedigter Kunden als Ergebnis der robusten Modellierung im Vergleich zum deterministischen Ersatzwertmodell	104
Abbildung 21: Kosten der robusten Modellierung in Abhängigkeit von der Risikoeinstellung	106
Abbildung 22: Fehlmengen der robusten Modellierung in Abhängigkeit von der Risikoeinstellung	107
Abbildung 23: Abwägung von Optimalitäts- und Zulässigkeitsrobustheit in Abhängigkeit von der Risikoeinstellung	108
Abbildung 24: Auswirkungen der steigenden Unsicherheit auf die Optimalität und die Zulässigkeit der robusten Lösungen mit leichter Risikoaversion	111
Abbildung 25: Auswirkungen der steigenden Unsicherheit auf die Optimalität und die Zulässigkeit der robusten Lösungen mit starker Risikoaversion	112
Abbildung 26: Auswirkungen der Risikoeinstellung auf die Optimalität und die Zuverlässigkeit der robusten Lösungen in den verschiedenen Konstellationen	113
Abbildung 27: Detaillierte Betrachtung der Auswirkungen der Risikoeinstellung auf die Optimalität (Gesamtkosten, GK) und die Zulässigkeit (Fehlmengen, FM) der robusten Lösungen in den verschiedenen Konstellationen	114

Abbildung 28: Einfluss der Höhe der Unsicherheit auf die Möglichkeiten zur Kostensenkung	115
Abbildung 29: Auswirkungen der Bedarfsschwankungen auf die Optimalität und die Zulässigkeit der robusten Lösungen mit leichter Risikoaversion	117
Abbildung 30: Auswirkungen der Bedarfsschwankungen auf die Optimalität und die Zulässigkeit der robusten Lösungen mit starker Risikoaversion	118
Abbildung 31: Einfluss der Höhe der Bedarfsschwankungen auf die Möglichkeiten zur Kostensenkung	119
Abbildung 32: Auswirkungen der Bedarfsschwankungen auf die Optimalität und die Zulässigkeit der robusten Lösungen mit leichter Risikoaversion	120
Abbildung 33: Auswirkungen der Bedarfsschwankungen auf die Optimalität und die Zulässigkeit der robusten Lösungen mit starker Risikoaversion	121
Abbildung 34: Einfluss der Höhe der Bedarfsschwankungen auf die Möglichkeiten zur Kostensenkung	122
Abbildung 35: Auswirkungen der Bedarfsschwankungen auf die Optimalität und die Zulässigkeit der robusten Lösungen mit leichter Risikoaversion	123
Abbildung 36: Auswirkungen der Bedarfsschwankungen auf die Optimalität und die Zulässigkeit der robusten Lösungen mit starker Risikoaversion	124
Abbildung 37: Einfluss der Höhe der Bedarfsschwankungen auf die Möglichkeiten zur Kostensenkung	125
Abbildung 38: Einfluss der Gewichtungsfaktoren für positive und negative Abweichungen der Bedarfsmengen auf die Lösung der robusten Optimierung	128

Abbildung 39: Einfluss der Gewichtungsfaktoren für negative Abweichungen der Bedarfsmengen und Optimalitäts- forderung auf die Lösung der robusten Optimierung	133
Abbildung 40: Einfluss der Gewichtungsfaktoren für positive Abweichungen der Bedarfsmengen und Optimalitäts- forderung auf die Lösung der robusten Optimierung	135
Abbildung 41: Detaillierte Analyse der Gesamtkostenentwicklung bei Variation der Parameterkombination λ und ω^+ für geringe Werte des Parameters ω^-	136
Abbildung 42: Würfel als Entscheidungsunterstützung zur Parametrisierung	138

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kompatibilität verschiedener Qualitätsklassen	16
Tabelle 2:	Systematisierung der Ansätze zur robusten Optimierung ..	81
Tabelle 3:	Merkmale und Merkmalsausprägungen zur Konstellationsgenerierung	94
Tabelle 4:	Varianten simultaner Parametervariation	127

Symbolverzeichnis

Variablen, Parameter, Funktionen und Mengen

A	Schwankungen des Anteils unsicherer Aufträge
a	Angebotsmenge
B	Bedarfsschwankungen
b	Nachfragemenge eines Kunden
c	Kostensatz
d	Länge des Transportweges
e	Hilfsparameter für akzeptierte Produktarten bzw. Qualitätsklassen
F	Menge zulässiger Lösungen
f	Anzahl der Preis- und Mengenstaffeln
g	Kostensatz pro gefahrenem Kilometer
h	Anzahl der betrachteten Perioden
K	Kosten
k	Bestellpreis pro abgenommener Tonne
m	Anzahl der Kunden
min	Minimumfunktion
n	Anzahl der Lieferanten
O	Vereinbarte Maximalabnahmemenge
p	Eintrittswahrscheinlichkeit
Q	Anzahl der Produktarten bzw. Qualitätsklassen
q	Produktart bzw. Qualitätsklasse

S	Anzahl der Szenarien
s	Hilfsvariable zur Linearisierung der Strafkosten
T	Schwankungen des Transportkostensatzes
U	Vereinbarte Minimalabnahmemenge
u	Kostensatz zur Abbildung der durchschnittlichen Lademenge
x	transportierte Menge
y	Binärvariable zur Aktivierung von Strafkosten
Z	Zielfunktion des robusten Modells
z	Binärvariable zur Aktivierung der Preis- und Mengenstaffeln
α	Transportkostenfaktor
δ	Hilfsvariable zur Linearisierung der Bedarfsabweichungen
θ	Hilfsvariable zur Linearisierung der Kostenabweichungen
λ	Gewichtungsfaktor für Kostenabweichungen
μ	Erwartungswert
σ	Standardabweichung
Ω	hinreichend große Zahl
ω	Gewichtungsfaktor für Bedarfsbedingungsverletzungen

Superskripte

be	Bestellkosten
st	Strafkosten
tr	Transportkosten

Indices

i	Lieferant
j	Abnehmer
lin	linearisiert
opt	optimal
q	Produktart bzw. Qualitätsklasse
s	Szenario
t	Periode
zul	zulässig

Markierungen

\circ^*	optimal
\circ^+	positive Abweichung
\circ^-	negative Abweichung
$\bar{\circ}$	Erwartungswert

Verzeichnis der Anhänge

A	Darstellung der Saisonalitäten in verschiedenen Branchen.....	167
B	Modellierung des Grundmodells unter Berücksichtigung der Bedarfsqualitäten.....	168
C	Detaillierte Ergebnisse der Berechnung des Grundmodells	172
D	Quellcode für die Generierung von ergänzenden stochastischen Parametern	173

1 Problemstellung und Gang der Untersuchung

Um ein Modell zur Entscheidungsunterstützung zu konzipieren, wird auf ein Strukturmodell zurückgegriffen, mit dessen Hilfe Entscheidungsprozesse als Interaktionen zwischen einem Subjekt- und einem Objektsystem dargestellt werden¹⁾. Im Rahmen dieses Interaktionsprozesses bildet das Objektsystem das relevante Umfeld des Subjektsystems ab, das nach der Durchführung zielstellungsadäquater Maßnahmen in einen wünschenswerten Zustand überführt wird (vgl. Abbildung 1).

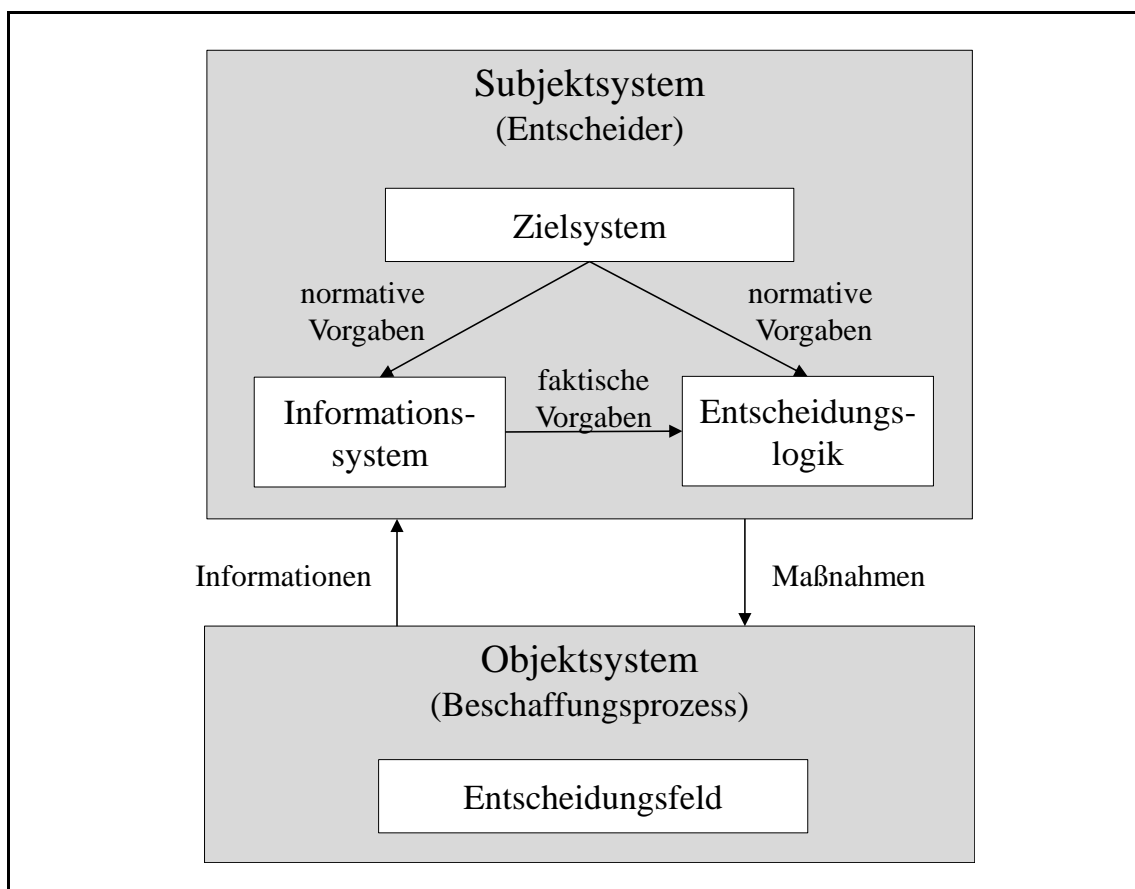


Abbildung 1: Strukturmodell eines Entscheidungsprozesses

Das Subjektsystem umfasst die Komponenten des Entscheidungsprozesses, die durch die Person des Entscheiders bestimmt werden. Dabei gibt das individuelle Zielsystem normative Vorgaben an das Informationssystem und

1) Vgl. z. B. Bamberg/Coenberg/Krapp (2012, S. 2 ff.).

an die Entscheidungslogik. Diese Vorgaben beziehen sich auf die Auswahl relevanter Informationen und deren Bedeutung für die Entscheidung. Das Informationssystem liefert eine Entscheidungsgrundlage im Rahmen faktischer Vorgaben für die Entscheidungslogik. Die Entscheidungslogik integriert die normativen und faktischen Vorgaben und bietet so die Möglichkeit, die Handlungsalternativen zu bewerten. Diese Handlungsalternativen sind im Objektsystem angesiedelt, das während des Entscheidungsprozesses mit dem Subjektsystem interagiert.

Das Objektsystem enthält das Entscheidungsfeld, in dem Alternativen, mögliche Umweltzustände, Wirkungszusammenhänge und die entsprechenden Ergebnismatrizen (z. B. des Beschaffungsprozesses) abgebildet sind. Hiermit werden die Grenzen des Handlungsspielraums abgebildet. Die Entscheidung wird somit im Rahmen des dargestellten Modells unter Beachtung der Vorgaben in einem Interaktionsprozess aus Subjekt- und Objektsystem abgeleitet¹⁾.

Aufbauend auf dieser abstrakten Darstellung ist in einem nächsten Schritt der Beschaffungsprozess als Entscheidungsobjekt im Kontext der vorliegenden Arbeit zu konkretisieren. In der Literatur ist es üblich, den Beschaffungsprozess in einzelne Phasen zu untergliedern, wobei unterschiedliche Einteilungen vorgeschlagen werden²⁾. Gemeinsam ist diesen Vorschlägen, dass der Beschaffungsprozess durch die Bedarfsermittlung eingeleitet wird und mit der Kontrolle endet. Ohne auf diese unterschiedlichen Vorschläge einzugehen, werden in dieser Arbeit die in Abbildung 2 dargestellten Phasen des Beschaffungsprozesses unterschieden³⁾:

-
- 1) Es liegt somit die normative (präskriptive) Entscheidungstheorie zugrunde (vgl. Bamberg/Coenenberg/Krapp (2012, S. 3 ff.)).
 - 2) Vgl. z. B. Hammann/Lohrberg (1986, S. 7); Koppelman (2004, S. 37 f.); Sandig (1935, S. 177).
 - 3) Vgl. z. B. Arnold (1997, S. 3); Sandig (1935, S. 176).

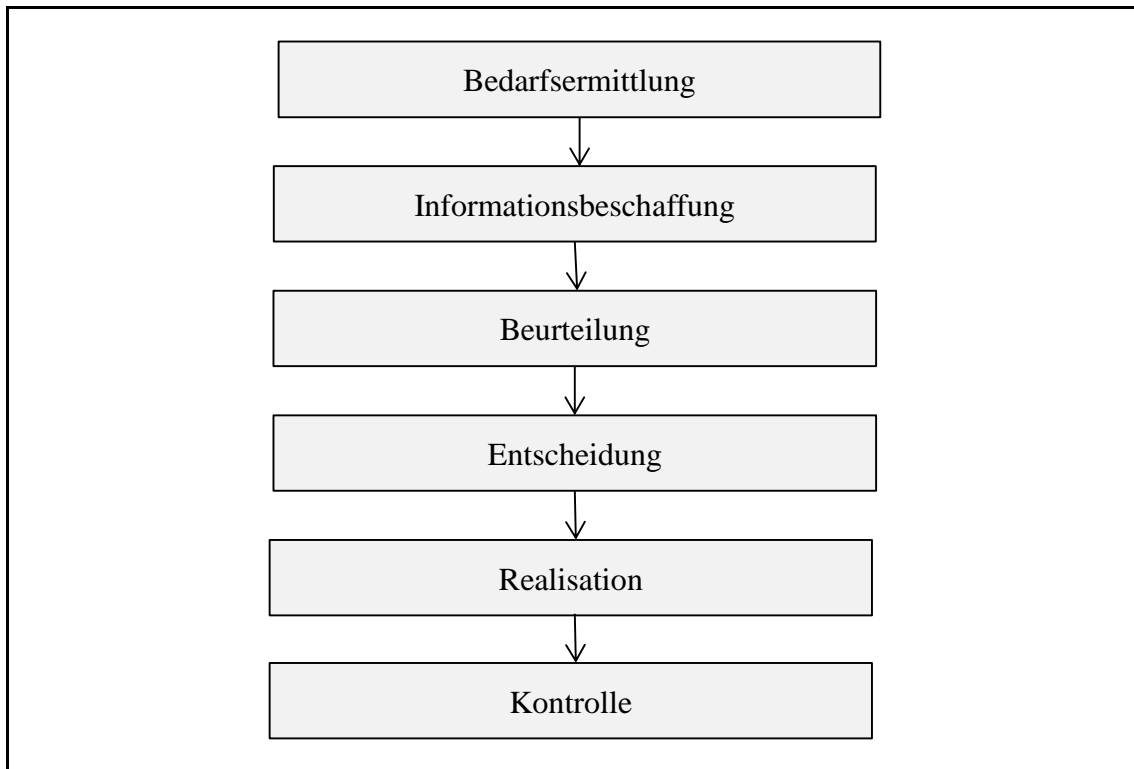


Abbildung 2: Phasen des Beschaffungsprozesses

Um die in der Planungsperiode zu deckenden Bedarfe zu bestimmen, sind diese nach Quantität, Qualität, zeitlichen und räumlichen Anforderungen zu spezifizieren. Die quantitative Bedarfsermittlung erfolgt durch den Rückgriff auf Vergangenheitsdaten (verbrauchsorientiert) oder auf Basis des kurzfristigen Produktionsprogramms (programmorientiert). Für die qualitative Bedarfsermittlung sind Vorgaben aus den Bereichen Absatz oder Produktion zu beachten. Die zeitliche und räumliche Spezifikation gibt Auskunft über die Zeitpunkte und geographischen Orte der Bedarfe.

In der Phase der Informationsbeschaffung werden allgemeine ökonomische Daten wie Wachstums- und Konjunkturprognosen sowie detaillierte branchenspezifische Daten über die Beschaffungsobjekte und -quellen erhoben (Beschaffungsmarktforschung). Hierbei werden insbesondere die Lieferfähigkeit und -zuverlässigkeit der Lieferanten, Preise und Preisentwicklungen und Qualitätsinformationen betont¹⁾.

1) Vgl. Barth/Hartmann/Schröder (2007, S. 275 ff.).

Auf dieser Grundlage ist es dann möglich, eine Beurteilung der Beschaffungsalternativen vorzunehmen, so dass der Planer die aus seiner Sicht optimalen Alternativen auswählen und das Beschaffungsprogramm festlegen kann, welches neben der Menge und der Qualität der einzelnen Objekte auch Lieferanten und Abnahmezeitpunkte enthält. Die mengenmäßig und zeitlich gezielte Beschaffung stellt dabei ein Instrument zur Kostenminimierung dar¹⁾.

Die Phase der Realisierung ist durch die Abschlüsse der Lieferantenverträge und die Durchführung der Beschaffungsvorgänge gekennzeichnet. Die individuelle Ausgestaltung der Vertragsinhalte und -arten kann durch verschiedene Vertragsparameter vorgenommen werden. Diese sind in einem Verhandlungsprozess mit den Lieferanten abzustimmen und festzusetzen²⁾.

Die Kontrollphase dient dem Abgleich von Soll- und Istwerten. Basierend auf diesem Vergleich können Rückschlüsse auf die Ursachen von eventuellen Abweichungen gezogen werden (Aufdeckungs- und Erklärungsfunktion der Kontrolle)³⁾.

Die dargestellten Prozesse der Bedarfsermittlung, Informationsbeschaffung und Beurteilung der Alternativen werden unter dem Begriff der Beschaffungsplanung⁴⁾ zusammengefasst, der von der Entscheidung, der Beschaffungsrealisation und -kontrolle abzugrenzen ist. Entscheidungen bezogen auf das Entscheidungsobjekt des Beschaffungsprozesses werden demnach im Rahmen der Beschaffungsplanung vorbereitet, wofür ein wissenschaftlich fundiertes System zur Entscheidungsunterstützung gezielt zum Einsatz gelangen kann. Um dieses System zu konzipieren ist es notwendig, den Aufgabenumfang der Beschaffung zu präzisieren.

1) Vgl. Bogaschewsky (1988, S. 12).

2) Vgl. Monczka et al. (2011, S. 459 ff.) zu einem Rahmenwerk für Verhandlungsprozesse.

3) Vgl. Kloock (1979, Sp. 1536).

4) Die unternehmerische Planung ist dabei ein auf unvollkommenen Informationen basierender, systematischer und rationaler Prozess zur Strukturierung und Eingrenzung von Entscheidungsproblemen (vgl. z. B. Adam (1996, S. 3); Klein/Scholl (2011, S. 2); Voigt (1993, S. 6 ff.); Wild (1974, S. 13)). Sie ist auf die zieladäquate Verteilung knapper Ressourcen gerichtet, wobei ein Abwägen der verschiedenen Entscheidungsalternativen ermöglicht werden soll (vgl. Adam (1996, S. 313) und Schmalenbach (1963, S. 131)).

Der Beschaffungsprozess erfolgt mit der Zielstellung, der Unternehmung alle nicht selbst produzierbaren, jedoch für die Sachzielerfüllung benötigten Produktionsfaktoren bereitzustellen¹⁾. Der Beschaffungsbegriff kann dabei nach den Kriterien des *Phasenumfangs* und des *Objektumfangs* spezifiziert werden. Der *Phasenumfang* der Beschaffung wird in der vorliegenden Arbeit zunächst weit gefasst, d. h. er umfasst die Erlangung der Verfügungsgewalt (Einkauf) und die innerbetriebliche Behandlung der beschafften Objekte (Lagerung und Transport)²⁾. Die Beschaffung ist hierbei einerseits von der Materialwirtschaft, die neben den Materialbeschaffungsaufgaben u. a. die technische Materialprüfung sowie die Entsorgung von Abfällen umfasst³⁾, und andererseits von der Logistik abzugrenzen. Lediglich die Beschaffungslogistik wird im Gegensatz zur innerbetrieblichen Logistik und Absatzlogistik dem Aufgabenbereich der Beschaffung zugeordnet⁴⁾. Es ergeben sich folglich Schnittmengen der Begriffe Materialwirtschaft, Logistik und Beschaffung. In Bezug auf den *Objektumfang* der Beschaffung wird hingegen eine enge Auffassung des Beschaffungsbegriffs verwendet, die sich auf die Beschaffung des Materials beschränkt und weitere Beschaffungsobjekte wie menschliche Arbeitsleistungen, Kapital und Informationen vernachlässigt⁵⁾.

Da sich die vorliegende Arbeit auf die Beschaffung im Handel konzentriert, ist der Handelsbegriff im Rahmen einer weiteren Spezifikation der Problemstellung näher zu betrachten. In einer funktionellen Ordnung⁶⁾ obliegt dem Handel⁷⁾ die Aufgabe, Güter von anderen Marktteilnehmern zu be-

-
- 1) Vgl. z. B. Grochla/Schönbohm (1980, S. 3); Sandig (1935, S. 176); Troßmann (2006, S. 113 ff.).
 - 2) Vgl. z. B. Grochla/Kubicek (1976, S. 259).
 - 3) Vgl. Grochla (1978, S. 16).
 - 4) Vgl. Troßmann (2006, S. 121).
 - 5) Vgl. z. B. Theisen (1970, S. 493 f.).
 - 6) Vgl. z. B. Bellinger (1955, S. 230 ff.).
 - 7) Der Handel als eine spezielle Betriebswirtschaftslehre kann in Deutschland auf eine lange Tradition zurückblicken (vgl. Schär (1911, S. 27 ff.) zu einem geschichtlichen Überblick und einer der ersten wissenschaftlichen Abhandlungen zur Theorie des Handels.). Einigkeit herrscht darüber, dass der wissenschaftliche Ursprung der Betriebswirtschaftslehre in den Handlungswissenschaften als Teil der Kameralwissenschaften zu suchen ist (vgl. Löffelholz (1935, S. 253 ff.); Seyffert (1939, S. 6 ff.)).

1 Problemstellung und Gang der Untersuchung

schaffen und diese ohne substantielle Änderungen an Dritte abzusetzen¹⁾. In einer weiten Auffassung des Begriffs Produktion produziert jedoch auch der Handel²⁾. In dieser Interpretation ist die Produktion des Handels darin zu sehen, fremdproduzierte Güter mit (weiteren) Dienstleistungen zu ergänzen und so Handelsleistungen wie die Güterumgruppierung, die Bedarfsanpassung oder die Marktausgleichung zu erbringen. Der Handel kann somit als Dienstleistungsproduzent charakterisiert werden, der in der Regel wie folgt in die Versorgungskette des Abnehmers eingeordnet werden kann (vgl. Abbildung 3)³⁾:

- Zunächst werden die Produktion der Güter und der Transport zum (Groß-)Händler vom Lieferanten übernommen.
- Lagerung, Kommissionierung und Transport zum Abnehmer ist dann die Aufgabe des Handels.
- Der Verbrauch oder der Weiterverkauf der Güter obliegt schließlich dem Abnehmer.

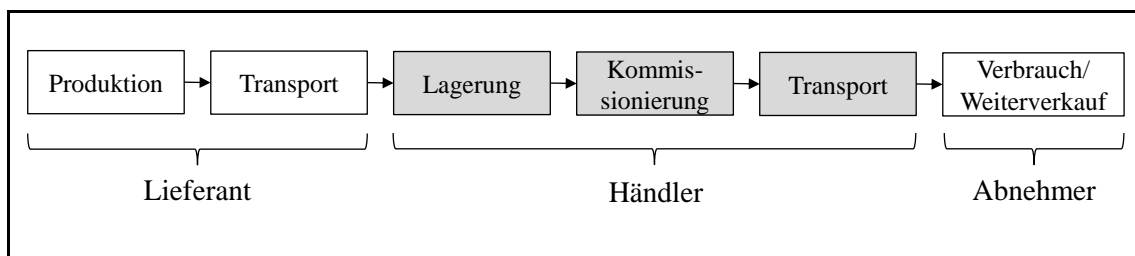


Abbildung 3: Der Handel als Teil der Versorgungskette

Diese als typisch zu bezeichnende Aufteilung der Versorgungskette ist für die vorliegende Problemstellung zu modifizieren, da der Händler zusätzlich zu den dargestellten Leistungen die Abholung der Güter bei den Lieferan-

1) Vgl. Hanhart (1967, S. 12); Müller-Hagedorn/Toporowski/Zielke (2012, S. 39 und S. 756).
2) Vgl. Barth (1979, Sp. 700); Buddeberg (1959, S. 41 ff.).
3) Vgl. z. B. Albers/Peters (1997, S. 69 f.) und darauf aufbauend Peters et al. (2009, S. 86) sowie Müller-Hagedorn/Toporowski/Zielke (2012, S. 784).

ten¹⁾ übernimmt, so dass ihm ein erweitertes Aufgabenspektrum in der Versorgungskette obliegt.

Bei dieser Erweiterung des Einflussbereichs (Upstream Integration) auf zusätzliche Teile der Versorgungskette²⁾ ist der Handel für den Güterfluss vom Lieferanten bis zum Abnehmer zuständig. Dies ist z. B. im Handel von Lebensmitteln, Drogerieartikeln und Chemikalien beobachtbar und führt zu der in Abbildung 4 dargestellten Aufgabenverteilung mit erweiterter Leistungstiefe des Handels³⁾.

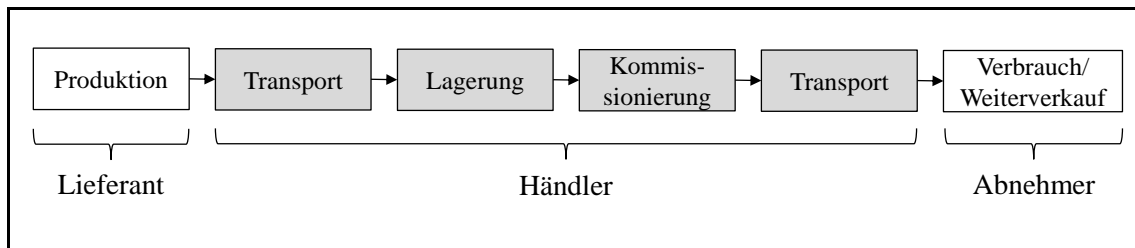


Abbildung 4: Aufgabenverteilung einer Versorgungskette mit erweiterter Leistungstiefe des Handels

- 1) Eine erste Erwähnung dieser Sachverhalte in der wissenschaftlichen Literatur findet sich unter dem Begriff *Value Added Merchandising* (vgl. Zentes 1998, S. 431). Die Übernahme der Beschaffungslogistik wird auch als Ab-Werk-Verkauf (Ex-Works), Beschaffungslogistik nach dem Holprinzip (Vgl. Pfohl (2009, S. 169 f.)) oder als Abhollogistik (Vgl. Thonemann et al. (2005, S. 79 ff.)) bezeichnet. Zum Einfluss der Logistik auf die Beschaffungsentscheidungen des Handels vgl. z. B. Hansen/Skytte (1998, S. 277 ff.); Swindley (1992, S. 533 ff.).
- 2) Vgl. Barth/Hartmann/Schröder (2007, S. 366 ff.); Coyle/Bardi/Langley (2002, S. 8 ff.); Prümper/Pohl/Thoms (2006, S. 817 ff.); Thonemann et al. (2005, S. 79 ff.); Zentes (1998, S. 430).
- 3) Die Leistungstiefe wird dabei über die Anzahl der übernommenen Leistungsstufen in der Versorgungskette der Abnehmer erfasst (vgl. Picot (1991, S. 338)). Vgl. weiterhin z. B. Straube/Pohl/Thoms (2005, S. 64) zur Bedeutung der Handelslogistik und deren vernachlässigte Integration in die Unternehmensplanung.

Bedingt durch diese Erweiterung ergibt sich die Möglichkeit, folgende Kostenvorteile zu realisieren¹⁾:

- Skaleneffekte und Synergien lassen sich durch die Kombination von Abhol- und Distributionslogistik realisieren. Damit wird eine Gestaltung der Transportwege mit geringeren Transportkosten ermöglicht²⁾.
- Durch die Übernahme der Beschaffungslogistik können im Rahmen der Lieferantenwahl die entstehenden Bestell- und Transportkosten abgewogen werden, um so geringere Kosten zu verursachen³⁾.
- Darüber hinaus können die Internalisierung und effiziente Ausführung der Transporte mit geringeren Kosten im Vergleich zur Fremdvergabe einhergehen⁴⁾.

Es stellt sich nun die Frage, ob das eingeführte Beschaffungsverständnis mit geringem Objektumfang und weitem Phasenumfang einen zweckmäßigen Rahmen für den Handel bietet, oder ob es aufgrund spezifischer Gegebenheiten notwendig ist, dieses zu modifizieren. Um dieser Frage nachzu-

-
- 1) Vgl. Porter (2008, S. 71 ff.); Prümper/Pohl/Thoms (2006, S. 814); Thonemann et al. (2005, S. 81 und 87). Die Höhe der Kostenvorteile ist dabei von den spezifischen Merkmalen des betrachteten Marktes und der fokussierten Handelsunternehmung abhängig. Hierbei werden insbesondere die Spezifität, die strategische Bedeutung und die Unsicherheit der Leistung als zu betrachtende Eigenschaften betont (vgl. z. B. Picot (1991, S. 350)). Es ist darauf hinzuweisen, dass die Kostensenkung umso deutlicher ausgeprägt ist, je höher der Transportkostenanteil an den Gesamtkosten ist (vgl. Liebmann/Zentes (2001, S. 667)). Dies führt vor allem bei Gütern von geringer wertmäßiger Bedeutung wie beispielsweise Lebensmitteln oder Flüssiggasen zu einem Optimierungspotential.
 - 2) Hierbei sei insbesondere auf die Vermeidung von Leerfahrten verwiesen, da das Transportmittel auf dem Rückweg von einem Abnehmer bei einem nahegelegenen Lieferanten wieder beladen werden kann (vgl. Zentes/Schramm-Klein (2008, S. 418)). Dieses Vorgehen wird auch als Backhauling (vgl. Hertel (2011, S. 201)) oder paariger Transport (vgl. Gudehus (2012, S. 998)) bezeichnet.
 - 3) Die Nutzung der in der Logistikplanung üblichen Kennzahlensysteme kann auch in der Beschaffungsplanung vorteilhaft sein (vgl. Weber/Wallenburg (2010, S. 101 f.); Weber et al. (1995, S. 22 ff.) zur Ableitung logistischer Kennzahlen und zum Aufbau von Kennzahlensystemen Kern (1971, S. 703 ff.)). Hierzu könnten beispielsweise *Jahresgesamtkilometer* oder *durchschnittliche Kilometer pro Tonne* herangezogen werden.
 - 4) Diese Kostenreduzierung kann durch die (aus der höheren Leistungstiefe resultierende) Verringerung der Transaktionskosten begründet werden (vgl. Picot (1986, S. 3 ff.)).

gehen, kann eine Fallunterscheidung aus Sicht des Händlers vorgenommen werden:

- Falls der Händler die Anlieferung zu seinem Lager durch den Lieferanten durchführen lässt (vgl. Abbildung 2), ist das eingeführte Beschaffungsverständnis zweckmäßig, d. h., zur Bereitstellung der Handelswaren reicht die Erlangung der Verfügungsgewalt und die innerbetriebliche Behandlung (d. h. Warenumschat und Warentransport) aus.
- Übernimmt der Händler die Beschaffungslogistik selbst (vgl. Abbildung 3), können die Distributions- und die Beschaffungslogistik gemeinsam geplant werden. Insbesondere wenn auf eine Lagerung und Umgruppierung verzichtet wird und ein direkter Transport vom Lieferanten zum Kunden erfolgen kann, ist die Bereitstellung der Handelswaren erst nach dem Transport zum Kunden abgeschlossen. Diese Übernahme distributionsbezogener Aufgaben durch die Beschaffung wird jedoch im eingeführten Beschaffungsverständnis nicht abgebildet.

Aus letztgenanntem Fall ergibt sich die Notwendigkeit, der vorliegenden Arbeit ein erweitertes Beschaffungsverständnis zugrunde zu legen, das diese Ausdehnung des in der Literatur beschriebenen Phasenumfanges zulässt: Der Beschaffung eines Händlers kann neben der Erlangung der Verfügungsgewalt und der innerbetrieblichen Behandlung auch die zwischenbetriebliche Behandlung zugeordnet werden. Der (direkte) Transport vom Lieferanten zum Kunden ist somit Teil des Beschaffungsprozesses. Zur Veranschaulichung des Sachverhalts werden in Abbildung 5 verschiedene Beschaffungsbegriffe gegenübergestellt. Hierbei enthält der objektumfassende Beschaffungsbegriff die in der Literatur häufig eingeschlossenen Beschaffungsobjekte¹⁾ und der phasenumfassende Beschaffungsbegriff die genannten Beschaffungsphasen²⁾. Der in diese Arbeit verwendete erweiterte Beschaffungsbegriff beschränkt sich zwar auf das Material als Beschaffungsobjekt, erweitert jedoch den Phasenumfang der Beschaffung um die zwischenbetriebliche Behandlung. Dieses erweiterte Beschaffungsverständnis bietet eine umfassende und praxisnahe Abbildung der Beschaffung

1) Vgl. z. B. Grochla/Schönbohm (1980, S. 42).

2) Vgl. z. B. Grochla/Kubicek (1976, S. 259).

im Handel und ermöglicht somit die Konzeption einer problemstellungsadäquaten Entscheidungsunterstützung für die Beschaffungsplanung.

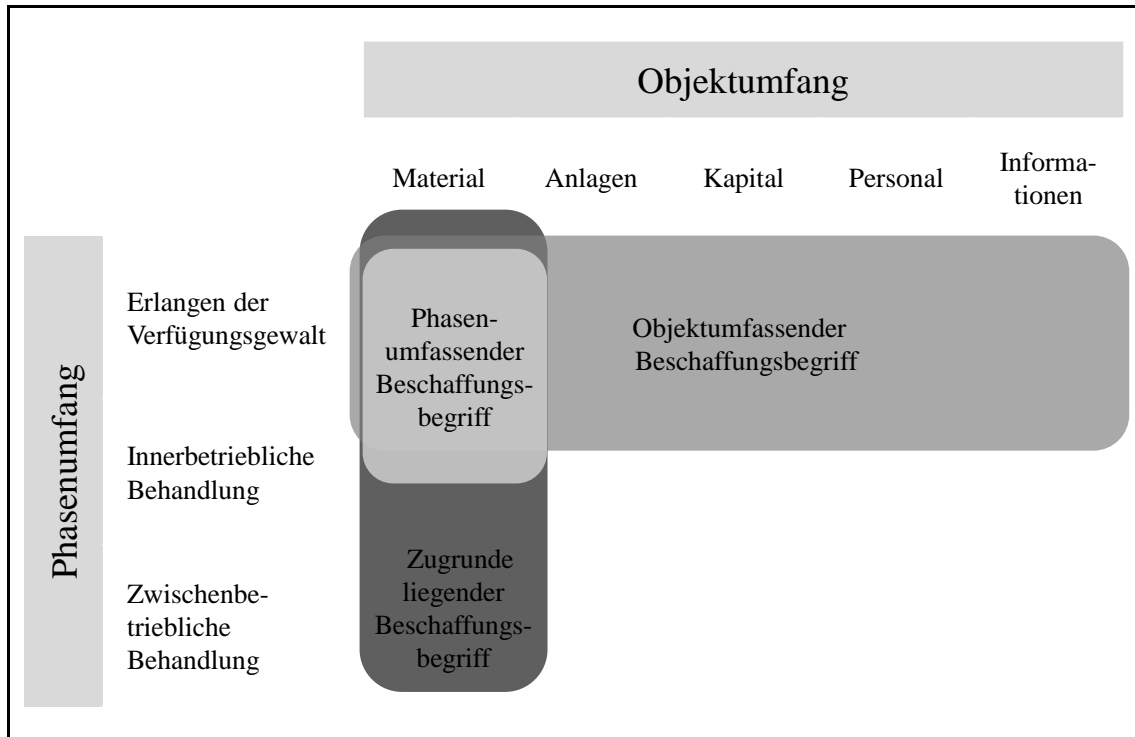


Abbildung 5: Abgrenzung des zugrundeliegenden Beschaffungsbegriffs

Ausgangspunkt für die weiteren Überlegungen ist ein Kooperationsprojekt mit einem Praxispartner aus dem Bereich des Flüssiggashandels. Die kooperierende Unternehmung liefert ihren Kunden verflüssigte Gase, die diese kurzfristig lagern oder direkt in ihrem Produktionsprozess verbrauchen. Eine langfristige Lagerung der Gase ist dabei aus technischen Gründen nicht möglich, so dass es im Flüssiggashandel von Vorteil ist, Beschaffungs- und Distributionslogistik zu kombinieren.

Diese Kombination kann im Kontext der Beschaffungsplanung genutzt werden, um die jährlich stattfindenden Mengen- und Preisverhandlungen mit den Lieferanten vorzubereiten. Die Auswahl der günstigsten Lieferanten in Bezug auf die Bestellpreise ist dann weniger vorteilhaft, wenn hohe Transportkosten die Bestellkostenvorteile überkompensieren und zu höheren Gesamtkosten führen et vice versa. Somit stellen sich dem Handel die folgenden Fragen, die im Rahmen der Beschaffungsplanung beantwortet werden sollen:

- Welche Mengen und Preise können mit den Lieferanten vereinbart werden, damit die Nachfrage befriedigt werden kann?
- Welche Auswirkungen in Bezug auf die relevanten Kosten und den Servicegrad gehen mit Veränderungen der prognostizierten Bedarfe einher¹⁾?

Die relevanten Kosten²⁾ der Beschaffungsplanung setzen sich hierbei in der Regel aus den Bestellkosten³⁾ sowie Lager- und Fehlmengenkosten zusammen⁴⁾. Dabei erscheint es bei der Integration materialflussbezogener Fragestellungen von entscheidender Bedeutung, die relevanten Kosten der Beschaffungsplanung des Händlers um die entstehenden Transportkosten zu erweitern und eine simultane taktische Planung der beiden Bereiche durchzuführen⁵⁾. Diese Planung zielt somit auf eine Minimierung der Bestell- und Transportkosten unter der Sicherstellung vollständiger Nachfrageerfüllung ab und integriert somit zwischenbetriebliche Aspekte in die Beschaffungsplanung des Händlers. Sie sei als *distributionsbasierte Beschaffungsplanung* bezeichnet.

-
- 1) Es sei bemerkt, dass die Unsicherheit bei der Planung von der operativen zur strategischen Ebene zunimmt (vgl. Rosenhead (1995, S. 7)). Planungsprobleme auf der taktischen Ebene gehen daher mit starken Unsicherheiten einher (vgl. z. B. Morgenstern (1963, S. 3 ff.); Scholl (2001, S. 7 ff.) und speziell auf den Handel bezogen Randall et al. (2011, S. 399)).
 - 2) Als relevante Kosten werden die Kosten bezeichnet, die aus einer Entscheidung über eine bestimmte Handlung resultieren und daher von dieser beeinflusst werden. Sie bilden die Unterschiede zwischen verschiedenen Handlungsalternativen ab. Somit eignen sie sich zur Beurteilung der Alternativen und tragen zur Entscheidungsfindung bei. Zur Abgrenzung vgl. Clark (1923, S. 49); Kilger (1966, S.162 f.).
 - 3) Der Begriff der Bestellkosten wird in der Literatur unterschiedlich verwendet. In dieser Arbeit werden darunter die unmittelbaren Beschaffungskosten erfasst. Sie werden durch das Produkt aus dem Preis pro Mengeneinheit und der zu beschaffenden Menge gebildet. In der handelsbetrieblichen Literatur werden die Bestellkosten auch als Wareneinsatzkosten (vgl. Müller-Hagedorn (2012, S. 980)), initiale Kosten (vgl. Dornier et al. (1998, S. 46)) oder Einstandskosten (vgl. Barth/Hartmann/Schröder (2007, S. 274)) bezeichnet.
 - 4) Vgl. Arnold (1997, S. 132).
 - 5) Im Rahmen der Verwirklichung eines materialwirtschaftlichen Optimums wird in der Literatur auf die gemeinsame Kostenoptimierung von Bestell- und Logistikkosten hingewiesen (vgl. Grochla (1978, S. 20 ff.)). Diese ist insbesondere von Bedeutung, wenn die Bestellkosten einen hohen Anteil an den Gesamtkosten der Unternehmung bilden (vgl. Friedl (1990, S. 273)).

Nach dieser Darstellung des Objektsystems der Entscheidung soll nun das Subjektsystem der Entscheidung skizziert werden. In der Praxis werden die Entscheidungen der distributionsbasierten Beschaffung häufig auf der Grundlage des impliziten Wissens des Planers getroffen. Dies ist ein Lösungsansatz, der in hohem Maße durch Entscheidungsträgerabhängigkeit gekennzeichnet ist. Es stellt sich daher die Frage, wie die distributionsbasierte Beschaffungsplanung durch eine wissenschaftlich fundierte und computerbasierte Vorgehensweise ergänzt werden kann, so dass nachvollziehbare Ergebnisse von einer Vielzahl von Personen berechnet werden können. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es also, die distributionsbasierte Beschaffungsplanung zu modellieren und ihre Eignung für die Entscheidungsunterstützung der taktischen Beschaffungsplanung aufzuzeigen.

Hierzu wird im zweiten Kapitel der Flüssiggashandel charakterisiert, wobei der Schwerpunkt auf der Beschaffungsplanung des Flüssiggashändlers liegt. Anschließend an diese Spezifikation der Problemstellung werden die Anforderungen an eine wissenschaftlich fundierte und computerbasierte Entscheidungsunterstützung für die distributionsbasierte Beschaffungsplanung herausgearbeitet: Die Lösung soll nach angemessener Rechenzeit¹⁾ eine gute Qualität²⁾ und eine (der Risikoeinstellung des Planers entsprechenden) Robustheit aufweisen.

Aufbauend auf diesen Überlegungen erfolgt in Kapitel drei eine formale Modellierung³⁾, die auf die Minimierung der Transportkosten und der Bestellkosten unter Beachtung der besonderen Vertragsgestaltungsparameter des Flüssiggashandels abzielt. Das entworfene Grundmodell wird als gemischt-ganzzahliges Programm formuliert und in linearisierter Form mit

-
- 1) Durch die circa eintägige Vorbereitungszeit auf ein (auf der taktischen Ebene angesiedeltes) Verhandlungsgespräch mit den Zulieferern ist es akzeptabel, dass die Rechenzeit bis zu mehreren Minuten für eine Problemdimension in Anspruch nehmen kann.
 - 2) Die Qualität der Lösung kann über die Bestell- und Transportkosten eingeschätzt werden. Die Einschätzung ihrer Angemessenheit obliegt jedoch dem Planer und ist somit entscheidungsträgerabhängig.
 - 3) Zum Modellbildungsprozess durch strukturierte Abstraktion eines Realproblems vgl. z. B. Adam (1996, S. 65 f.). Das Vorgehen zur Lösung praktischer betriebswirtschaftlicher Probleme, bei dem die Problemstellung nach strukturierter und präziser Beschreibung auf ein theoretisches Fundament gestellt wird, wird auch als heuristisches Planen bezeichnet (vgl. Witte (1979, S. 2 f.)).

Hilfe einer Optimierungssoftware auf seine Eignung für die vorliegende Problemstellung überprüft. Die Ergebnisse werden anhand von Realdaten diskutiert und die Grenzen des Grundmodells in Bezug auf die Unsicherheit der Daten aufgezeigt.

Ansätze zum Umgang mit Unsicherheiten werden im Kapitel vier vorgestellt und systematisiert, wobei der Schwerpunkt auf mehrwertige Ansätze gelegt wird, um eine direkte Abbildung der Unsicherheit zu ermöglichen. Vor diesem Hintergrund wird auf die robuste Optimierung zurückgegriffen. Aufbauend auf der Klassifikation verschiedener in der Literatur vorgeschlagener Ansätze zur robusten Optimierung wird das konzipierte Grundmodell der distributionsbasierten Beschaffungsplanung zu einem robusten Modell erweitert.

In Kapitel fünf werden die Ergebnisse des robusten Modells auf der Grundlage einer numerischen Analyse diskutiert und die Auswirkung unterschiedlicher Risikoeinstellungen des Planers im Hinblick auf die entstehenden Kosten und die damit verbundenen Bedarfserfüllungsverletzungen quantifiziert. Darüber hinaus werden die Effekte der Parametervariation des robusten Modells untersucht und Hinweise auf eine geeignete Parametrisierung abgeleitet. Auf dieser Grundlage werden dem Planer Aussagen über die kosten- und servicegradbezogenen Wirkungen unterschiedlicher Beschaffungsalternativen ermöglicht und die Eignung der vorgeschlagenen Modellierung zur Entscheidungsunterstützung der taktischen Beschaffungsplanung dargestellt.

2 Charakteristika des Flüssiggashandels

Der Flüssiggashandel zeigt bei näherer Analyse einige Besonderheiten. Aus diesem Grund soll zunächst das Produkt Flüssiggas und der Flüssiggashandel einer differenzierten Betrachtung unterzogen werden¹⁾, um dann auf dieser Basis die Eigenschaften der Beschaffungsplanung zu charakterisieren.

2.1 Eigenschaften des Produktes Flüssiggas

Als Flüssiggase werden durch Kompression oder Kühlung in einen flüssigen Aggregatzustand versetzte Gase bezeichnet²⁾, die als Kältemittel, als medizinische oder als technische Gase im Produktionsprozess eingesetzt werden. Bekannte Beispiele sind Propan-Butan-Gemische, die Motoren, Pumpen und Turbinen antreiben, oder Kohlenstoffdioxid, das im Gartenbau zur Düngung in Gewächshäusern oder in Brauereien und der Nahrungsmittelproduktion zur Karbonisierung, Kühlung und Inertisierung genutzt wird.

Auf der Grundlage des Kriteriums der *Herstellungsart* ist zwischen

- Gasen, die aus natürlichen Quellen gewonnen werden, wie z. B. Quellsäure, und
- technisch erzeugten Gasen, die bei chemischen Prozessen, wie z. B. der Verarbeitung von Erdöl oder Erdgas extrahiert werden,

zu unterscheiden.

Nach ihrer Gewinnung werden die Gase verflüssigt und in speziellen Tankwagen oder Flüssiggasbehältern als Gefahrgut zum Kunden transportiert³⁾. Hierbei sind für die Flüssiggasanlagen die deutschlandweit gültige

1) Vgl. Badel/Corsten (2011, S. 1 ff.).

2) Laut DIN 51622 (S. 1) umfasst der Begriff der Flüssiggase Propan, Propen, Butan, Buten sowie deren Gemische. Gase mit ähnlichen Eigenschaften, wie z. B. Kohlenäure, Sauerstoff oder Argon, können in der vorliegenden Problemstellung analog betrachtet werden. Daher wird in dieser Arbeit ein um die genannten Gase erweiterter Begriff des Flüssiggases verwendet.

3) Vgl. Rakke et al. (2011, S. 899). Zur speziellen Ausgestaltung der Tankwagen und den Sicherheitsvorkehrungen vgl. Mörchen (2001, S. 19 ff.).

2 Charakteristika des Flüssiggashandels

Technische Regel für Flüssiggas (TFR)¹⁾ und für den Flüssiggastransport das Europäische Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR)²⁾ zu beachten. Hieraus resultieren Besonderheiten bei der Auswahl der gefahrgutgeeigneten Transportwege, der Ausrüstung der Fahrzeuge und der Qualifizierung der Fahrer, die einen Gefahrgutführerschein besitzen müssen. Diese Besonderheiten führen zu höheren Transportkosten im Vergleich zu nicht gefährlichen Gütern. In Kombination mit dem Sachverhalt, dass die Transportkosten der Flüssiggase einen hohen Anteil an den Gesamtkosten eines Händlers darstellen³⁾, führt der Gefahrgutaspekt zu erhöhter Relevanz des Transports in der Versorgungskette des Flüssiggashandels.

Neben diesen Vorgaben bezüglich des Gastransports wird die Sicherung der Qualitätsanforderungen der Gase durch einheitliche nationale und internationale Standards gewährleistet⁴⁾. Flüssiggase werden in unterschiedlichen Qualitätsklassen zur Verfügung gestellt und nachgefragt. Hierbei stellen die nachgefragten Qualitätsklassen Mindestanforderungen dar, die (in den meisten Fällen) die Nutzung von Flüssiggasen höherwertiger Qualitätsklassen erlauben. Am Beispiel von Kohlensäure werden die genannten Nutzungsmöglichkeiten der Qualitätsklassen in Tabelle 1 aufgezeigt. Ein Nachfrager von niedrigqualitativer, technisch erzeugter Kohlensäure kann in seinen Produktionsprozessen sowohl technische als auch biogene und Quellkohlensäure einsetzen. Ein Nachfrager der höchsten Qualitätsklasse (Quellkohlensäure) kann jedoch einzig Quellkohlensäure verarbeiten.

1) Vgl. DVFG (2012, S. 1 ff.).

2) Accord Européen Relatif au Transport International des Marchandises Dangereuses par Route, vgl. Ridder/Holzhäuser (2011, S. 1 ff.). Für eine Übersicht über alle einzuhaltenden Transportbestimmungen vgl. DIN 51622 (1985, S. 3).

3) Vgl. Zentes/Schramm-Klein (2008, S. 432) und zur Bedeutung der Entfernungen zwischen Kunden und Lieferanten vgl. Reilly (1931, S. 1 ff.).

4) Vgl. Mörchen (2001, S. 3).

2 Charakteristika des Flüssiggashandels

		Angebotene Qualität			
		Quell- kohlenensäure	Gär- kohlenensäure	Technische Kohlenensäure	Biogene Kohlenensäure
Nachgefragte Qualität	Quell- kohlenensäure	kompatibel	nicht kompatibel	nicht kompatibel	nicht kompatibel
	Gär- kohlenensäure	nicht kompatibel	kompatibel	nicht kompatibel	kompatibel
	Technische Kohlenensäure	kompatibel	nicht kompatibel	kompatibel	kompatibel

Tabelle 1: Kompatibilität verschiedener Qualitätsklassen

Der Transport und die Qualitätssicherung der Gase können unter Beachtung der Kompatibilitätsmatrix geplant werden, wobei bei der Lagerung der Flüssiggase zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage weitere Besonderheiten zu beachten sind. Die Zwischenlagerung der Gase ist nur unter konstanten Temperatur- und Druckverhältnissen möglich und damit, abhängig von der Art des Flüssiggases, mit unterschiedlichen Kosten verbunden. Dies führt dazu, dass bei einigen Gasen aufgrund zu hoher Lagerkosten auf eine Vermeidung der Zwischenlagerung abgezielt wird. Ein solches Flüssiggas wird dann direkt nach der Produktion vom Lieferanten zum Kunden transportiert und die Lagerung kann somit nicht zum Ausgleich von Nachfrageschwankungen verwendet werden. Dieser Sachverhalt hat zur Folge, dass die Nachfrage nach Flüssiggas in manchen Perioden das Angebot überschreiten kann¹⁾. Bei der Planung der Versorgungskette der Flüssiggase müssen diese Einschränkungen daher berücksichtigt und Vorkehrungen zur Sicherung eines entsprechenden Servicegrades getroffen werden.

1) Es sei angemerkt, dass die Produktion von Flüssiggasen zu großen Teilen nicht von der Nachfragerseite bestimmt werden kann, sondern von der Förderrate bzw. den vorgelagerten Produktionsprozessen, bei denen sie als Nebenprodukte anfallen, abhängt (Supply Push). Vgl. hierzu z. B. Adland/Jia/Lu (2008, S. 818).

2.2 Struktur der Versorgungskette

Ein Flüssiggashändler bietet ein Leistungsbündel¹⁾ aus dem materiellen Produkt Flüssiggas und verschiedenen damit verbundenen Dienstleistungen an²⁾:

- die Anlieferung des Flüssiggases zum vereinbarten Zeitpunkt,
- die Zurverfügungstellung der Tanks zur kurzfristigen Lagerung beim Kunden, bevor das Flüssiggas als Inputfaktor in den Produktionsprozess des Kunden eingeht, und
- die Versorgungsüberwachung, d. h. die garantierte Einhaltung einer Mindestmenge im Kundentank durch stetige Überwachung der Melde-
menge.

Hierbei wird der Transport des Gases vom Lieferanten zum Kunden durch den Händler übernommen (Abhollogistik). Durch die Restriktionen im Rahmen der Zwischenlagerung steht für den Händler die Abhol- und die Distributionslogistik in einem faktischen Zusammenhang³⁾. Der zu erfüllende Bedarf eines Kunden in einer Periode muss durch den Einkauf des Flüssiggases bei einem oder mehreren Lieferanten, die in der geplanten Route aufeinander folgen, gedeckt werden. Die Zuordnung von Kunden und Lieferanten erfolgt durch den Händler, wobei lieferantenabhängige Preise und Entfernungen als Parameter in die Planung einfließen.

Da die Bestellmengen (und -qualitäten) der Händler bei den Lieferanten abhängig von der geographischen Lage der Nachfrage sind, steht die Lieferantenauswahl in direktem Zusammenhang mit den Kundennachfragen und den durch die Kunden-Lieferanten-Zuordnung evozierten Transportwegen. Dies führt zu dem Sachverhalt, dass sich die relevanten Kosten im Rahmen der Beschaffungsplanung des Flüssiggashandels aus Transport⁴⁾- und Bestellkosten zusammensetzen.

1) Vgl. z. B. Bressand (1986, S. 73 ff.); Meyer (1983, S. 127 ff.); Rathmell (1966, S.32 ff.); Shostack (1977, S. 73 ff.).

2) Vgl. Bell et al. (1983, S. 6).

3) Vgl. Bretzke (2010, S. 300); Thonemann et al. (2005, S. 80).

4) Da die Möglichkeiten zur Anpassung der Flottengröße der Tankwagen und der Neuerrichtung von Kundentanks nicht berücksichtigt werden, können Fixkosten vernachlässigt werden (vgl. Andersson/Christiansen/Fagerholt (2010, S. 431)).

Eine solche kombinierte Planung des Transports verursacht eine erhöhte Planungskomplexität¹⁾. Sie geht aber mit der Chance einher, durch die Auswahl des Lieferanten einerseits eine Senkung der Transportentfernungen und -kosten zu realisieren²⁾ und andererseits eine Senkung der Gesamtbestellkosten herbeizuführen. Die Senkung der Transportkosten wird besonders in Anbetracht der Tatsache, dass die Produktionsprozesse der Flüssiggase bei allen Lieferanten zu ähnlichen Kosten durchgeführt werden, zu einem wichtigen Wettbewerbsfaktor der Händler³⁾. Während der Planung gilt es somit abzuwägen, welche Lieferanten mit ihren spezifischen Entfernungen und Bestellpreisen in den Tourenplan integriert werden.

Die Struktur des Flüssiggasmarktes weist spezifische Besonderheiten auf. In Bezug auf die Händlerstruktur kann der Flüssiggasmarkt als Angebotsoligopol bezeichnet werden, da nur wenige Händler Flüssiggas anbieten⁴⁾. Hierbei ist es möglich, dass ein Lieferantenportfolio durch eine händlereigene Flüssiggasproduktion ergänzt wird, die dann prioritär genutzt wird und dem Händler Wettbewerbsvorteile in der Preisgestaltung und der Versorgungssicherheit eröffnen kann. Der Händler übernimmt dann gleichzeitig die Rolle des Lieferanten.

Hinsichtlich der *Kundenstruktur* lassen sich die beiden folgenden Cluster unterscheiden:

- eine geringe Anzahl von Großabnehmern, die sich durch eine prognostizierbare und regelmäßige Abnahme auszeichnet, und
- eine große Anzahl an Kleinabnehmern mit unsicheren Bedarfsmengen und -zeitpunkten.

1) Vgl. Heikkilä (2002, S. 750 ff.).

2) Die Transporte können auch an geeignete Speditionen ausgelagert werden, denen ein vereinbarter Kilometersatz bezahlt wird. Dieses Vorgehen geht mit dem Vorteil einher, dass die Kosten zur Umsetzung der Abhollogistik ausgelagert werden, wobei die Synergieeffekte der kombinierten Transporte dennoch genutzt werden können (vgl. Hertel et al. (2011, S. 201)). Zur Entscheidungsunterstützung bei der Speditionsauswahl vgl. die Systematisierung der relevanten Kriterien von Qureshi/Kumar/Kumar (2008, S 257 ff.).

3) Vgl. Bell et al. (1983, S. 6).

4) Eine ausführliche Betrachtung der Auswirkungen der Marktseitenverhältnisse und der Marktformen auf die Beschaffungspolitik findet sich in Theisen (1970, 38 ff.).

2 Charakteristika des Flüssiggashandels

Vor dem Hintergrund des Sachverhalts, dass ein partiell konkurrierender Zusammenhang zwischen beiden Nachfrageclustern besteht, erlangt die Lieferbereitschaftsflexibilität der Händler eine zentrale Bedeutung. Dies wird durch die im Flüssiggashandel auftretenden Saisonalitäten verstärkt¹⁾. Insbesondere im Sommer ist die Flüssiggasnachfrage durch einen starken Anstieg charakterisiert, der sich auf Nachfragespitzen von Branchen wie der Getränkeindustrie oder dem Gartenbau zurückführen lässt²⁾.

Die Zusammenarbeit zwischen Lieferanten, Händlern und Kunden beruht zumeist auf langfristigen vertraglichen und persönlichen Beziehungen³⁾, so dass sich Vertrauen zu einer wesentlichen Grundlage für den Flüssiggashandel entwickelt hat⁴⁾. Aus Sicht der Nachfrager ist Flüssiggas ein Produktionsfaktor, der bei Nichtverfügbarkeit mit entsprechenden Fehlmengekosten einhergehen kann. Diese Kosten können aufgrund von Produktionsstillständen oder Absatzausfällen entstehen und zum Abbruch einer Händler-Kunden-Beziehung führen. Um Versorgungsstörungen entgegenzuwirken, ergibt sich die Anforderung, einen entsprechenden Servicegrad⁵⁾ einzuhalten.

Die aufgezeigte Marktstruktur führt dazu, dass dem Händler eine über das bisher übliche Maß hinausgehende Koordinationsfunktion⁶⁾ zwischen den vor- und nachgelagerten Wertschöpfungsstufen zukommt. Hierfür obliegt ihm einerseits die Aufgabe einer erweiterten logistischen Planung und an-

-
- 1) Vgl. Picot (1986, S. 7 ff.) bezüglich der Funktion des Handels zum Ausgleich von saisonalen Schwankungen.
 - 2) Vgl. Anhang A für eine Darstellung der saisonalen Bedarfsverläufe verschiedener Kundenbranchen des Flüssiggashandels.
 - 3) Vgl. speziell zum Flüssiggashandel Bell et al. (1983, S. 6).
 - 4) Vgl. die Ausführungen von Carlisle/Parker (1989, S. 3 ff.); Cox (2004, S. 346 ff.) zur vertrauensbasierten Verhandlungsführung.
 - 5) Vgl. Axsäter (2006, S. 45); Bopp et al. (1996, S. 513); Crainic/Roy (1988, S. 291 f.).
 - 6) Zu den Funktionen des Handels vgl. Barth/Hartmann/Schröder (2007, S. 25); Müller-Hagedorn (2012, S. 99 ff.); Schär (1911, S. 55).

dererseits vereinbart er Verträge mit den Lieferanten¹⁾, die die folgenden Vertragsspezifika enthalten:

- Der Händler einigt sich mit jedem Lieferanten auf einen monatlichen *Bestellpreis* für jede in diesem Monat abgenommene Tonne Gas²⁾.
- Des Weiteren werden monatliche *Minimalabnahmemengen* vereinbart³⁾. Durch die Festlegung von Minimalabnahmemengen können bei Unterschreitung Strafkosten entstehen. Sie stellen für den Lieferanten eine Abnahmegarantie und für den Händler die Basis für eine verlässliche Lieferung dar (Reservierungs- und Sicherungsfunktion des Beschaffungsvertrags)⁴⁾. Der Händler wägt demnach situativ ab, ob er unter Vergütung der nicht abgenommenen Mengen die Menge von einem anderen (geographisch günstiger gelegenen) Lieferanten beschafft, oder die vereinbarten Mengen abnimmt und höhere Transportkosten akzeptiert.
- Die monatlichen *Maximalmengen* bezeichnen die mit jedem Lieferanten vereinbarten Obergrenzen der Abnahmemenge⁵⁾. Diese ist von der Produktionskapazität der Lieferanten abhängig, die durch natürliche oder technische Gegebenheiten restringiert ist. Sie erleichtert dem Händler die Planung und gibt dem Lieferanten die Möglichkeit, eine Preisdifferenzierung vorzunehmen.

1) Zur allgemeinen Bedeutung von Verträgen im unternehmerischen Umfeld und der immanenten Möglichkeit zum Umgang mit Unsicherheit vgl. Coase (1937, S. 386 ff.), der auf die grundlegenden Ausführungen von Knight (1921, S. 11 ff.) rekurriert. Vgl. weiterhin Bassok/Anupindi (2008, S. 459) und Brown/Lee (2003, S. 299 ff.) zum Einsatz verschiedener Vertragsspezifika zur Koordination innerhalb der Supply Chain und zum Risikomanagement. Hierbei ist zu beachten, dass die dargestellte Kooperation sowohl für den Händler als auch für den Lieferanten vorteilhaft ist. Zu den spezifischen Vorteilen für den Lieferanten wird auf Sharafali/Co (2000, S. 3425 ff.) verwiesen.

2) Vgl. Schmidt (1985, S. 22) zur zeitlichen Fixierung von Preisen.

3) Vgl. Simchi-Levi/Chen/Bramel (2005, S. 167 ff.).

4) Vgl. Knowles/Wirick (1998, S. 4); Moinezadeh/Nahmias (2000, S. 408); Rosenkranz (1989, S. 27). Zur Bestimmung optimaler Minimalabnahmemengen und der hiervon abhängigen Preise in Lieferantenverträgen vgl. z. B. Bassok/Anupindi (1997, S. 373 ff.).

5) Die Vereinbarung von fixen Minimal- und Maximalmengen dient der Kostensenkung und Risikoreduktion, wobei der simultane Abschluss einer Vielzahl derartiger Verträge als Portfoliostrategie bezeichnet wird (vgl. Simchi-Levi/Chen/Bramel (2005, S. 174 ff.)).

- Eine Überschreitung der Obermengen wird von einigen Lieferanten durch die Vereinbarung weiterer *Mengen- und Preisstaffeln* ermöglicht. Preisstaffeln sind dann von Relevanz, wenn Rabatte genutzt werden können (Preise einer zweiten Staffel sind niedriger als die einer ersten) oder wenn der Wettbewerb in den Sommermonaten intensiviert wird (Preise einer zweiten Staffel sind höher als die einer ersten). In der vorliegenden Problemstellung liegen die Preise der höheren Staffel meist über denen der vorherigen Staffel. Dieser Sachverhalt ist im Flüssiggasmangel während einiger Perioden mit ausgeprägten Saisonalitäten begründet. Staffelpreise und -mengen können für eine Vielzahl von Staffeln vereinbart werden und sind jeweils für einen Monat gültig. Auch diese Vertragsparameter sind der Sicherungs- und Gewährleistungsfunktion von Beschaffungsverträgen zuzuordnen¹⁾.

Neben den Verträgen mit den Lieferanten sind auch Verträge mit Unternehmungen auf der gleichen Wertschöpfungsstufe zu beachten: Zum Ausgleich kurzfristiger Lieferengpässe ermöglichen Swap-Verträge den Austausch von Mengenkontingenten mit kooperierenden Händlern. Swap-Verträge gelangen zum Einsatz, wenn ein Händler zu vertraglich festgelegten Preisen Flüssiggas von anderen Anbietern (Lieferanten der Konkurrenz) abnimmt und diesen die gleiche Menge von eigenen Lieferanten zur Verfügung stellt²⁾.

Die lieferanten- oder konkurrenzbezogenen Vertragsspezifika werden einmal jährlich verhandelt. An dieser Stelle ist die Diskrepanz zwischen dem eintägigen Verhandlungsprozess und dem zwölfmonatigen Planungszeitraum zu beachten³⁾.

Die Versorgung der Kunden mit Flüssiggas kann beispielhaft anhand zweier zu fahrenden Touren veranschaulicht werden (vgl. Abbildung 6), wobei Tour 1 die direkte Belieferung eines mehrmals täglich anzufahrenden

1) Vgl. Ernenputsch (1986, S. 133).

2) Zum Design von Swap-Verträgen in Netzwerken vgl. z. B. Lien et al. (2011, S. 699).

3) Vgl. Monczka et al. (2011, S. 480 ff.) zur Bedeutung der Verhandlungsprozesse in der Beschaffungsplanung.

Großkunden darstellt und Tour 2 die Befriedigung der Nachfrage dreier Kunden durch zwei verschiedene Lieferanten.

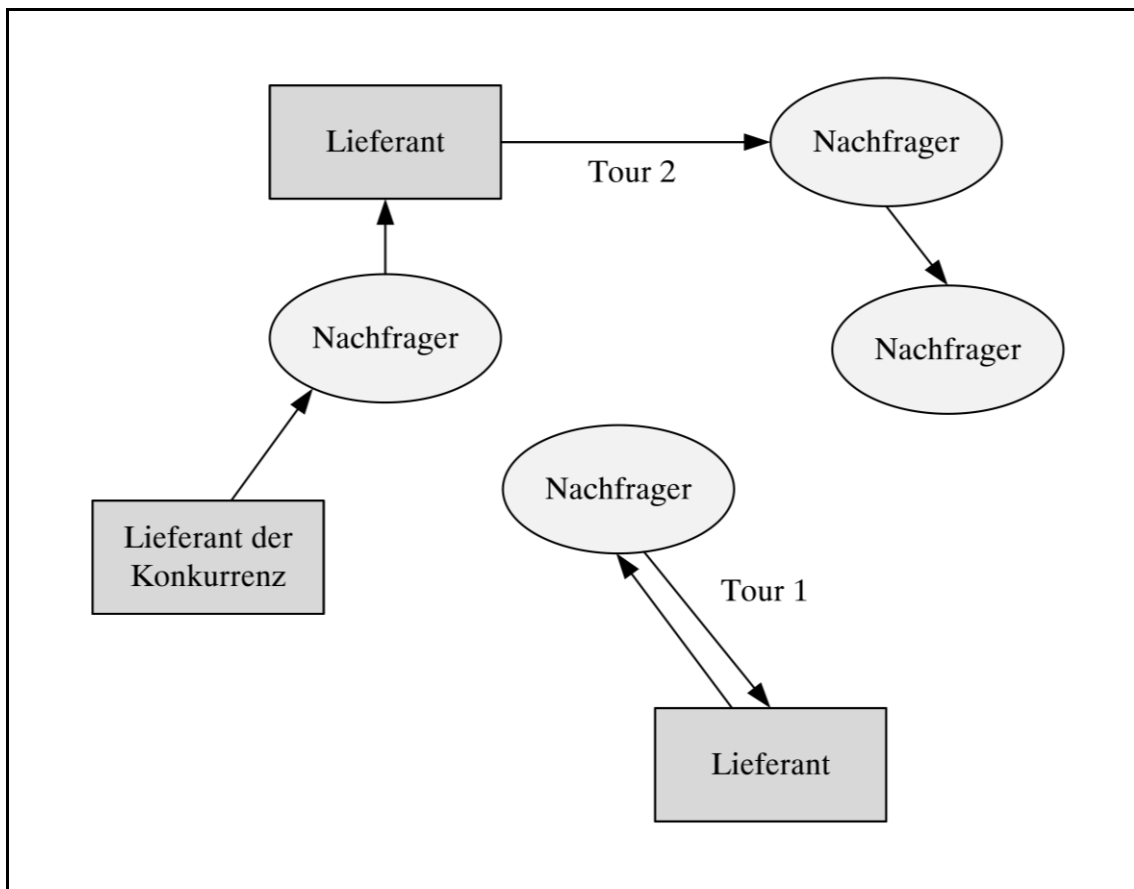


Abbildung 6: Beispielhafte Darstellung zweier Touren zur Versorgung der Nachfrager mit Flüssiggas

Die oben genannten Besonderheiten erfordern eine Beschaffungsplanung, die Bedarfe und Angebote im Hinblick auf Transport- und Bestellkosten unter Berücksichtigung der Unsicherheiten optimiert. In Anbetracht der kurzen Verhandlungsprozesse ergibt sich die Notwendigkeit, dass Lösungen von hoher Qualität und hoher Robustheit¹⁾ in angemessener Zeit²⁾ be-

- 1) Die angestrebte Lösungsqualität und der benötigte Robustheitsgrad kann nur entscheidungsträger- und problemabhängig festgelegt werden.
- 2) Die Dauer der Verhandlungsgespräche für taktische Beschaffungsentscheidungen beträgt in der kooperierenden Unternehmung einen Tag. Hieraus ergibt sich die Anforderung, dass eine Entscheidungsunterstützung im Rahmen der Vorbereitung eines Verhandlungsgesprächs die Simulation verschiedener Szenarien in wenigen Minuten durchführen können sollte. Diese Rechenzeit wird in dieser Arbeit als zielstellungsgerecht und angemessen angenommen.

rechnet werden können, so dass eine Disproportionalität zwischen Planungsaufwand und Lösungsqualität vermieden wird.

2.3 Beschaffungsplanung im Flüssiggashandel

Im Flüssiggashandel kann dem in Kapitel eins skizzierten Planungsprozess gefolgt werden, so dass die Beschaffungsplanung die drei Schritte Bedarfsermittlung, Informationsbeschaffung und Beurteilung umfasst. Um die in dieser Arbeit fokussierten Aufgaben der Beschaffungsplanung einzuordnen, sind zunächst die Aufgaben der Beschaffung im Flüssiggashandel zu strukturieren, die im Rahmen der Beschaffungsplanung vorbereitet werden sollen. Die Aufgaben der Beschaffung können hierfür einerseits nach *inhaltlichen Elementen* und andererseits nach dem Kriterium *Stärke und Dauer der Erfolgswirkung* untergliedert werden.

Im Rahmen einer *inhaltlichen Gliederung* können die Aufgaben der Beschaffung dem beschaffungspolitischen Instrumentarium¹⁾ zugeordnet werden. Das beschaffungspolitische Instrumentarium bietet verschiedene, teilweise interdependente Instrumente, die zur Umsetzung von Entscheidungen in der Beschaffungen genutzt werden können. Es umfasst, in Anlehnung an das absatzpolitische Instrumentarium, die Leistungs-, die Entgelt-, und die Kontrahierungspolitik²⁾, die in zweckmäßiger Weise für den Flüssiggashandel kombiniert werden können (Beschaffungsmix)³⁾.

Im Rahmen der *Leistungspolitik* werden Aspekte wie die Gestaltung des Produktprogramms und die Bezugsquellenplanung thematisiert, wobei die zu beschaffenden Produkte in Art, Menge, Qualität, Zeitpunkt und Ort festgelegt werden. Somit sind auch alle Vorgänge der Lieferantenbewertung, -auswahl und

1) Vgl. z. B. Troßmann (2006, S. 132).

2) Vgl. Arnold (1997, S. 129 ff.); Hammann/Lohrberg (1986, S. 101 ff.); Koppelman (2004, S. 274) und speziell auf den Handel ausgerichtet Barth/Hartmann/Schröder (2007, S. 287). In der Literatur finden sich unterschiedliche Einteilungen der Instrumente, wobei die hier dargestellte für den Verhandlungsschwerpunkt der Arbeit als geeignet betrachtet werden kann (vgl. hierzu die ausführliche Diskussion in Geisel (2000, S. 61 ff.)).

3) Zum Vorgehen und zur Struktur der Mixentscheidungen der Beschaffungsinstrumente vgl. Hamann/Lohrberg (1986, S. 193 ff.) und Koppelman (2004, S. 300 ff.).

-entwicklung eingeschlossen, die in Zusammenhang mit der Entgeltpolitik stehen¹⁾.

Die Maßnahmen der *Entgeltpolitik* setzen Art, Umfang und Zeitpunkt der (monetären oder nichtmonetären) Entgelte für die erbrachten Leistungen der Lieferanten fest. Je nach Art der Preisbestimmung kann dabei zwischen Norm- und Individualpreisen unterschieden werden²⁾. Im letztgenannten Fall, der im Flüssiggashandel üblich ist, kann die beschaffende Unternehmung stärkeren Einfluss auf die Entgeltgestaltung ausüben. Die Preispolitik kann hierbei auf Preisdruck im Falle hoher Verhandlungsmacht oder auf Preissog als möglicher Kooperationsanreiz basieren.³⁾ Es wird deutlich, dass die Entgelt- und die Leistungspolitik eng verknüpft sind, da die individuell mit einem Lieferanten vereinbarten Entgelte u. a. von den zur Verfügung gestellten Mengen abhängen.

Zur *Kontrahierungspolitik* gehören alle Maßnahmen der Vertragsgestaltung. Im Gegensatz zur Vereinbarung von Standardverträgen werden die Vertragsgestaltungsparameter bei Individualverträgen einzeln verhandelt und formuliert⁴⁾. Zu diesen Parametern zählen neben den Auskunfts- und Informationspflichten von Lieferant und Nachfrager u. a. auch Vertragskonditionen und -preise⁵⁾. Zu den Vertragskonditionen zählen die Erfüllungsorte, Lieferzeiten, Vorauszahlungen und Bedingungen für den Streitfall, die für die beschaffende Unternehmung Wettbewerbsvorteile gegenüber anderen Nachfragern begründen können (Beschaffungsmarketing)⁶⁾. Die entgelt- und leistungspolitischen Überlegungen fließen dabei in den Prozess der Vertragsgestaltung ein.

-
- 1) Vgl. z. B. Zhang/Chen (2013, S. 2704) zur simultanen kostenorientierten Lieferantenauswahl und Beschaffungsprogrammplanung.
 - 2) Vgl. zur individuellen Beschaffungspreisbildung Barth/Hartmann/Schröder (2007, S. 287).
 - 3) Vgl. Koppelman (2004, S. 294).
 - 4) Vgl. Kaufmann (1977, S. 227 ff.).
 - 5) Vgl. Bassok/Anupindi (1997, S. 373).
 - 6) Vgl. Kotler/Levy (1973, S. 54 ff.) und insbesondere zu einer detaillierten Diskussion des Forderungs- und Anreizcharakters beschaffungspolitischer Entscheidungen Koppelman (2004, S. 303).

Ein zweckmäßig gestalteter *Beschaffungsmix* aus Elementen der Leistungs-, Entgelt- und Kontrahierungspolitik bildet die Grundlage zur Erfüllung der Beschaffungsziele im Flüssiggashandel. Die Problemstellung der Abstimmung von Bestell- und Transportkosten unter Beachtung spezifischer Vertragsgestaltungsparameter ist dabei insbesondere in der Kontrahierungspolitik angesiedelt. Hierbei sollen die Interdependenzen zu den beiden anderen Bereichen berücksichtigt werden, so dass die zu konzipierende Entscheidungsunterstützung auch hier genutzt werden kann.

Wird als Kriterium die *Stärke und Dauer der Erfolgswirkung* herangezogen, kann zwischen strategischen, taktischen und operativen Aufgaben der Beschaffung unterschieden werden¹⁾. Während auf der strategischen Ebene langfristig wirksame Entscheidungen mit geringer Korrigierbarkeit bezüglich der Marktposition einer Unternehmung getroffen werden²⁾, sind auf der taktischen Ebene untergeordnete Entscheidungen angesiedelt, die eine inhaltliche Konkretisierung der beschaffungsstrategischen Entscheidungen vornehmen. Auf der operativen Ebene werden konkrete Vorgänge in inhaltlicher, quantitativer, qualitativer und zeitlicher Hinsicht geplant³⁾. Zwischen diesen Ebenen finden im Sinne eines Gegenstromprinzips Vorgaben und Rückkopplungen statt, so dass die Ebenen in direkter und gegenseitiger

1) Vgl. z. B. Adam (1996, S. 314) und Pekayvaz (1985, S. 23), die die strategische Ebene durch geringe Detailliertheit und Revidierbarkeit, hohe Komplexität und langfristige, generelle Gültigkeit von der operativen Ebene abgrenzen. Die taktische Ebene ist hierbei zwischen beiden Ebenen angesiedelt. Vgl. weiterhin Chandra/Grabis (2007, S. 83 ff.); Fleischmann/Meyr/Wagner (2010, S. 96); Rohde/Meyr/Wagner (2000, S. 10) zu den korrespondierenden Ebenen im Supply Chain Management.

2) Vgl. Grochla (1977, S. 184 f.). Die strategische Planung im Allgemeinen zielt auf den dauerhaften Schutz der Überlebensfähigkeit einer Unternehmung ab (vgl. z. B. Gälweiler (1981, S. 84); Voigt (1993, S. 35 und ausführlicher S. 77)). Zur strategischen Beschaffungsplanung vgl. Drexel (1981, S. 256 ff.); Geisel (2000, S. 13 ff.) und speziell auf die Erschließung von Zuliefererpotentialen bezogen vgl. Weigand (1998, S. 3 ff.). Hierbei sei angemerkt, dass in Abgrenzung von dem unterstützenden Aufgabenspektrum der operativen Beschaffung die strategische Bedeutung und der Chancencharakter der Beschaffung erst später Eingang in die wissenschaftliche Diskussion fanden. Vgl. hierzu Arnold (1997, S. 10 ff.); Geisel (2000, S. 27); Grochla/Kubicek (1976, S. 257 ff.) und Grochla (1977, S. 184 ff.) sowie zu einer ersten Darstellung Anthony (1965, S. 16 ff.).

3) Vgl. Arnold (1997, S. 129); Grochla (1978, S. 18).

2 Charakteristika des Flüssiggashandels

Abhängigkeit stehen¹⁾. Eine eindeutige Zuordnung der Aufgaben der Beschaffung per se zu einer Ebene ist hierbei nur im Einzelfall möglich, da die Abgrenzung zwischen der strategischen und der taktischen bzw. der taktischen und der operativen Ebene kontextabhängig ist. In Bezug auf den Flüssiggashandel können jedoch die folgenden Zuordnungen vorgenommen werden.

Die strategische Beschaffung bezieht sich hierbei u. a. auf die folgenden Problemstellungen:

- Entscheidung über Eigenfertigung oder Fremdbezug der Gase, d. h. die Ausgestaltung der Versorgungsstrategie,
- Erschließung und Sicherung der Unternehmungsposition auf dem Beschaffungsmarkt für Flüssiggase
- geographische Ausrichtung des Flüssiggashändlers (landesweit, kontinentweit, weltweit).

Auf der taktischen Ebene gilt es folgende Entscheidungen zu treffen:

- Konkretisierung der genannten strategischen Ziele²⁾,
- Auswahl der angebotenen Flüssiggase³⁾,
- Auswahl der Lieferanten,
- Aufbau von Flexibilitätspotentialen und
- Spezifikation der Verträge bezüglich monatlicher Mengen und Preise⁴⁾.

Die operative Ebene widmet sich Fragestellungen wie

- dem Vollzug der konkreten Beschaffungsvorgänge durch Abholung der Gase,
- der konkreten Lieferanten-Kundenzuordnung,
- und der täglichen Tourenplanung¹⁾ vom Lieferanten zum Kunden.

1) Vgl. Wild (1974, S. 196 ff.) und zur hierarchischen Planung Hax/Meal (1975, S. 53 ff.).

2) Vgl. Crainic/Roy (1988, S. 291); Knowles/Wirick (1998, S. 4); Van Landeghem/Vanmaele (2002, S. 771).

3) Zur Sortimentspolitik im Handel und deren Auswirkungen vgl. Müller-Hagedorn (2012, S. 452 und 546 ff.).

4) Vgl. Bierwirth/Kirschstein/Meisel (2012, S. 199).

Die drei Ebenen können durch Rückkopplungen und Vorgaben gegenseitigen Einfluss ausüben:

- So können die taktischen Ergebnisse im Rahmen der Ausgestaltung der Versorgungsstrategie oder bei Entscheidungen über die geographische Reichweite einer Unternehmung zur Entscheidungsunterstützung auf der strategischen Ebene genutzt werden.
- Darüber hinaus kann die operative Planung der Liefertouren durch eine (auf taktischer Ebene angesiedelte) Vorgabe der optimalen Lieferanten-Kunden-Zuordnungen strukturiert werden.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die taktische Ebene, die in der einschlägigen Literatur nur vereinzelt Beachtung findet²⁾ und zielt auf eine effiziente Entscheidungsunterstützung bei der Spezifikation der Verträge (Kontrahierungspolitik) ab. Aufbauend auf dieser Einordnung der Problemstellung in die Beschaffungsaufgaben kann eine Analyse der in der Literatur dargestellten Vorgehensweisen zur Lösung des Problems vorgenommen werden. Hierbei wird zwischen Ansätzen differenziert,

- die sich auf eine einzelne Unternehmung beziehen und
- die auf die gesamte Wertschöpfungskette des Flüssiggashandels abstellen.

2.3.1 Beschaffungsplanung auf Unternehmungsebene

Auf Unternehmungsebene ist im Flüssiggashandel eine Diskrepanz zwischen den konkreten Vorgehensweisen in der Praxis und in der Theorie zu beobachten.

In der Praxis werden zur taktischen Bedarfsermittlung Vergangenheitsdaten genutzt. Im Sinne einer verbrauchsgebundenen Bedarfsplanung werden auf dieser Grundlage die für die Planungsperiode zu erfüllenden Bedarfe prog-

1) Vgl. z. B. Andersson/Christiansen/Fagerholt (2010, S. 429).

2) Vgl. z. B. Friedrich (2007, S. 3 ff.); Zäpfel/Mitter (2010, S. 1277 ff.).

nostiziert¹⁾. Diese Prognosen kann der Planer auf Basis seiner Erfahrungen, seines darauf aufbauenden impliziten Wissens und der sich in den vorherigen Verhandlungen abzeichnenden Entwicklungen modifizieren²⁾.

In einem zweiten Schritt werden die Kapazitäten, Standorte und Preise potentieller Lieferanten sowie etwaiger Speditionen erfasst. Die notwendigen Informationen können dann entweder auf Basis von Vergangenheitsdaten oder durch Anfragen und Vorverhandlungen beschafft werden.

Hierauf aufbauend können die Lieferantenbeurteilung sowie die bilateralen Vertragsverhandlungen vorgenommen werden. Aufgrund der in Kapitel 2.2 dargestellten Gegebenheiten können dabei nicht nur die Bestellkosten bei gegebenen Qualitäten minimiert werden, sondern es sind auch die Transportkosten der Beschaffung und Distribution zu berücksichtigen.³⁾

Im Gegensatz zu der in der Praxis vertretenen Vorgehensweise setzen Arbeiten zur Beschaffungsplanung im Flüssiggashandel⁴⁾ in der Literatur den Fokus auf die Lieferbarkeit einer mindestens einzuhaltenden Rate in den Restriktionen⁵⁾ oder als Entscheidungsvariable⁶⁾. Diesen ist gemein, dass sie im Unterschied zu der behandelten Problemstellung Spot-Märkte, Pipeline-Reservierungen und Lagerungsmöglichkeiten einbeziehen. Darüber hinaus bleiben zentrale Eigenschaften des Flüssiggashandels wie die Auswahl und Kombination einer Vielzahl von möglichen Lieferanten und Preisen unbeachtet.

1) Zur Übersicht der Prognosetechniken und deren Auswahl vgl. z. B. Box/Jenkins/Reinsel (2008, S. 7 ff.). In der Praxis des Flüssiggashandels werden Verfahren der exponentiellen Glättung genutzt (vgl. hierfür z. B. Bell et al. (1983, S. 10)).

2) Vgl. z. B. MacKay (2003, S. 50); Baumard (1999, S. 59 ff.); Reihlen (1997, S. 75 f.); Kahnemann/Tversky (1974, S. 1124 ff.); Polanyi (1958, S. 69 ff.).

3) Im Rahmen der Verwirklichung eines materialwirtschaftlichen Optimums wird in der Literatur auf die gemeinsame Kostenoptimierung von Bestell- und Logistikkosten hingewiesen (vgl. Grochla 1978, S. 20 ff.). Diese ist insbesondere von Bedeutung, wenn die Bestellkosten einen hohen Anteil an den Gesamtkosten der Unternehmung bilden (vgl. Friedl 1990, S. 273).

4) In Ermangelung von konkreten Ansätzen zum Flüssiggashandel wird auf Arbeiten mit ähnlichen Annahmen zurückgegriffen. Hier sind vor allem Konzepte aus dem Flüssigerdgashandel relevant, wobei von der Transportmittelwahl abstrahiert wird.

5) Vgl. Avery et al. (1992, S. 446 ff.).

6) Vgl. Bopp et al (1996, S. 511 ff.).

Weiterhin wird in der Literatur der Aspekt der Transportplanung im Flüssiggashandel beleuchtet. Neuere Ansätze beziehen die Versorgungsüberwachung in die Tourenplanungsentscheidungen ein und lösen das entsprechende Inventory Routing Problem¹⁾. Die Lösung eines Inventory Routing Problems muss heuristisch erfolgen, da ein exaktes Verfahren bei realen Problemgrößen nicht in angemessener Rechenzeit zu einer Lösung führt²⁾. Eine heuristische Lösung für das Inventory Routing Problem schlagen Day et al. mit ihrer Dreiphasenheuristik vor³⁾:

- In einer ersten Phase werden jedem zur Verfügung stehenden Fahrzeug Kernrouten zugewiesen.
- In der zweiten Phase werden diese Kernrouten um die bisher nicht zugeordneten Kunden erweitert.
- Die dritte Phase zielt dann darauf ab, ein Gleichgewicht der tagesbezogenen Liefermengen der Gase über den Planungshorizont von 12 Tagen herzustellen.

Der Ansatz greift aus Vereinfachungsgründen auf deterministische, zyklische Routen mit konstanten Intervallen zurück, die in der Realität nur in Ausnahmefällen gegeben sind und daher zu scheinoptimalen Lösungen führen. Demgegenüber findet sich ein Dekompositionsverfahren zur Lösung eines Maritimen Inventory Routing Problems im Gashandel bei Halvorsen-Weare/Fagerholt⁴⁾. Die Autoren gehen von einer Lager- und Kapazitätsrestriktion beim Lieferanten aus und nehmen die Zuordnung der Transportmittel zu den Kunden unabhängig von der konkreten Tourenplanung vor. Dies führt zu einer Dekomposition der Routing- und Schedulingentscheidungen. Das untersuchte Problem weist eine einfache Netzwerkstruktur mit einer geringen Anzahl an Lieferanten, Kunden und Transportmitteln auf, die diese Disaggregation in Subprobleme zulässt. Das Vor-

-
- 1) Inventory Routing Probleme betrachten simultan Lagerhaltungs- und Transportkosten und finden insbesondere bei der lieferantengesteuerten Bestandsplanung (Vendor Managed Inventory) Anwendung. Zu einer theoretischen Ausarbeitung vgl. Bertazzi/Savelsbergh/Speranza (2008, S. 49 ff.) und Dror/Ball (1987, S. 891 ff.).
 - 2) Vgl. z. B. Geiger/Seveaux (2011, S. 365 ff.), die das Problem für ein logistisches Netzwerk modellieren und berechnen.
 - 3) Vgl. Day et al. (2009, S. 227 ff.).
 - 4) Vgl. Halvorsen-Weare/Fagerholt (2010, S. 1 ff.).

gehen erscheint hingegen problematisch für die komplexe Netzwerkstruktur mit einer Vielzahl von Kunden, Lieferanten und Tankwagen in der vorliegenden Problemstellung. Dies ist in dem Sachverhalt begründet, dass eine der Tourenplanung vorgelagerte Fahrzeug-Kunden-Zuordnung nicht zweckmäßig ist, um eine große Anzahl unregelmäßiger Nachfragemengen und -orte zu bedienen. Die Zuordnung würde für das vorliegende Problem mit einem Flexibilitätsverlust einhergehen, der nur durch zusätzliche Investition in weitere Fahrzeuge ausgeglichen werden kann. Bei simultaner Betrachtung beider Teilprobleme können diese Nachteile verhindert werden, so dass der Ansatz von Halvorsen-Weare/Fagerholt nicht für die Problemstellung geeignet ist.

Eine ähnliche Problemstellung behandeln Campbell/Savelsbergh, die zunächst die Zuordnung von Kundenbelieferungen zu Tagen vornehmen, um dann hierauf aufbauend die Routen zu planen¹⁾. Hierbei wird zunächst ein ganzzahliges Optimierungsproblem gelöst und dann eine Einfügeheuristik zur Tourenplanung angewandt. Um das Optimierungsproblem so zu formulieren, dass es in angemessener Zeit lösbar ist, werden Cluster gebildet. Diese vereinfachende Aggregation kann bei der Lösung des Tourenplanungsproblems wiederum zu einer starken Abweichung von der optimalen Lösung führen. Gleichzeitig sind die Ansätze zur Transportplanung auf der operativen Ebene angesiedelt und daher nicht für die vorliegende Fragestellung aus der taktischen Planung geeignet, da sie mit hohem Rechenaufwand und geringer Robustheit einhergehen.

Bei der Erstellung eines jährlichen Lieferplans für den maritimen Flüssigerdgastransport widmen sich Rakke et al. einem Problem der taktischen Planung²⁾. In die Modellierung werden hierbei langfristige Verträge sowie der kurzfristige Absatz am Spotmarkt mit dem Ziel einbezogen, die Bestellkosten zu minimieren. Die Lösung des Optimierungsprogramms wird anhand einer vollständigen Enumeration aller Schiffsrouten vorgenommen. Dieses Vorgehen ist nur bei einer überschaubaren Anzahl an Verkehrsträgern in angemessener Zeit möglich und kann für die vorliegende Problemstellung des Flüssiggashandels als ungeeignet eingestuft werden.

1) Vgl. Campbell/Savelsbergh (2004, S. 488 ff.).

2) Vgl. Rakke et al. (2011, S. 896 ff.).

Im Fall der spezifischen Gegebenheiten des Flüssiggashandels führt eine separate Planung der Module der Beschaffungsplanung und der Distribution zu suboptimalen Ergebnissen, da die durch die Verbindung von Abhol- und Distributionslogistik möglichen synergetischen Potentiale vernachlässigt werden. Die vertikalen Verbundeffekte, die durch eine Einbeziehung von Informationen der vor- und nachgelagerten Stufen erschlossen werden, können zu Kostensenkungen und höherer Planungssicherheit führen¹⁾.

2.3.2 Beschaffungsplanung auf Netzwerkebene

Bei Betrachtung der Netzwerkebene kann auf Arbeiten aus dem Supply Chain Management im Bereich des Flüssigerdgashandels zurückgegriffen werden. Die in der Problemstellung enthaltene Fokussierung auf die Stufe des Händlers steht im Widerspruch zu den Zielsetzungen dieser Ansätze, die die ganzheitliche Optimierung aller Teilnehmer der Wertschöpfungskette in den Vordergrund stellen. Hiervon kann jedoch abstrahiert werden, da eine Modifikation der Ansätze in dieser Richtung denkbar ist und somit zunächst die methodische Eignung der Ansätze eingeschätzt werden soll. Bei den folgenden Ansätzen zur Netzwerkebene werden die spezifischen Produkteigenschaften und der hohe Lieferbarkeitsanspruch in die Nebenbedingungen der Optimierungsmodelle aufgenommen.

So werden einerseits stochastische Bestandsprobleme modelliert, die neben dem Optimalitätsziel auch die Dynamik der Lösung²⁾ oder eine Vielzahl von Produkten³⁾ berücksichtigen. Weiterhin können Ansätze, die eine Kombination von Kosten- und Flexibilitätszielen⁴⁾ oder eine integrierte Produktions- und Distributionsplanung⁵⁾ vornehmen, in die Betrachtung einbezogen werden. Diese Ansätze nehmen eine vernetzte Beschaffungs- und Distributionsplanung vor, fokussieren dabei jedoch auf Lagerbestandsoptimierungen auf den verschiedenen Stufen der Supply Chains. Die In-

1) Vgl. Arnold (1997, S. 67 f.); Laurent (1996, S. 1).

2) Vgl. Kastsian/Mönnigmann (2011, S. 727 ff.). Für Ansätze zur Inklusion dynamischer Eigenschaften bei der Optimierung von Supply Chains vgl. Disney/Towill (2002, S. 27 ff.); Sarmiento et al. (2007, S. 1947 ff.).

3) Vgl. Pyke/Cohen (1994, S. 18 ff.).

4) Vgl. Sabri/Beamon (2000, S. 581 ff.);

5) Vgl. Kanyalkar/Adil (2010, S. 635 ff.); Lee/Billington (1993, S. 835 ff.).

putdaten sowie die Entscheidungsvariablen der Modelle finden sich bei Berücksichtigung der starken Zwischenlagerungsrestriktionen nicht in der vorliegenden Problemstellung wieder, so dass die Zielstellung der Lagerbestandsoptimierung nicht zweckmäßig übertragen werden kann. Gleichzeitig ist das vorgeschlagene iterative Lösungsvorgehen ungeeignet für die Problemstellung, da die Kostensenkung durch die simultane Betrachtung von Transport- und Bestellkosten nicht ausgenutzt wird. Andererseits wird die Distributionsplanung im Netzwerk singular betrachtet und optimiert¹⁾, wobei auch hier die Abhängigkeiten zwischen Transport- und Bestellkosten bei den individuellen Lieferanten-Kunden-Zuordnungen außer Acht gelassen werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bei der Betrachtung der in der Literatur dargestellten Ansätze zur Beschaffungsplanung auf Unternehmungsebene eine Vernachlässigung aller distributionsorientierten Überlegungen zu beobachten ist, wobei die Beschaffungsplanung auf Netzwerkebene stark auf den Bestand fokussiert und auf die Optimierung der gesamten Wertschöpfungskette abzielt. Aufgrund dieser Gegebenheiten muss für die vorliegende Aufgabenstellung eine Weiterentwicklung der in der Literatur vorzufindenden Beschaffungsplanungsmodelle in Richtung einer *distributionsbasierten Beschaffungsplanung* vorgenommen werden.

1) Vgl. z. B. Lin/Nozick/Turnquist (2006, S. 161 ff.) zur Transportplanung und Moin/Salhi (2007, S. 1185 ff.) zu Inventory Routing Problemen auf der Supply Chain Ebene. Im Rahmen der Netzwerkgestaltung werden Modelle zum Supply Chain Design mit besonderer Berücksichtigung von Flexibilitätspotentialen (Vgl. Walther/Schatka/Spengler (2012, S. 280 ff.)) oder Transporthäufigkeiten und deren Kostensenkungspotential (vgl. Baumgartner/Fuetterer/Thonemann (2012, S. 789 ff.)) konstruiert. Das Supply Chain Design ist auf der strategischen Ebene angesiedelt und daher für die vorliegende Aufgabenstellung aufgrund des hohen Abstraktions- und Aggregationsniveaus nicht geeignet.

3 Grundmodell zur distributionsbasierten Beschaffungsplanung

3.1 Konzeption des Grundmodells

Die zentralen Fragestellungen, die es für eine optimale Entscheidungsunterstützung zu beantworten gilt, können wie folgt formuliert werden:

- Welche monatlichen Mengen sollen zu welchem Preis mit einem Lieferanten vereinbart werden, damit die Nachfrage befriedigt werden kann?
- Welche Auswirkungen in Bezug auf Kosten und Servicegrad gehen mit Veränderungen der prognostizierten Bedarfe einher?

Im Rahmen der Beschaffungsplanung der Händler müssen somit die in Kapitel 2.2 beschriebenen Vertragsparameter abgestimmt werden, um ein servicegradgerechtes Lieferantenportfolio vertraglich abzusichern¹⁾. Zur mathematischen Formulierung eines Ansatzes zur Entscheidungsunterstützung können praxis- oder theoriebasierte Verfahren angewandt werden. Die Grundlage des Problemlösungsprozesses bildet hierbei eine auf den dargestellten Charakteristika des Flüssiggashandels aufbauende formale Modellierung. Diese Modellierung soll die folgenden, aus der Problemstellung abgeleiteten Anforderungen erfüllen:

- Die *Lösungsqualität* soll so sein, dass die Ergebnisse zur Entscheidungsunterstützung bei Verhandlungen mit den Lieferanten eingesetzt werden können.
- Weiterhin ist, insbesondere begründet durch den jährlichen Planungshorizont, die *Unempfindlichkeit* der Lösung gegenüber Umwelteinflüssen (Robustheit der Lösung) als Anforderung durch die Problemstellung gegeben.
- Unterschiedliche *Risikoeinstellungen* sollen in der Modellierung abbildbar sein und eine Quantifizierung des Trade-Offs zwischen Servicegrad und Kosten soll ermöglicht werden.

1) Vgl. Martinez-de-Albeniz/Simchi-Levi (2005, S. 90 ff.); Simchi-Levi/Chen/Bramel (2005, S. 174 f.).

- Gleichzeitig soll die Modellierung eine einfache und nachvollziehbare *Handhabbarkeit* aufweisen, d. h., dass
 - die benötigten Inputdaten in für den Planer akzeptabler Zeit¹⁾ beschafft werden können,
 - die Rechengänge klar strukturiert und nachvollziehbar gestaltet sind und
 - die Outputdaten relevante und leicht interpretierbare Informationen darstellen.
- Darüber hinaus soll die Lösung des Modells in angemessenen *Rechenzeiten* möglich sein, die sie den Vorbereitungen zu dem eintägigen Verhandlungszeitraum mit dem Lieferanten gerecht werden.

Der in Kapitel 2.3 skizzierte Beschaffungsplanungsprozess des Praxispartners ist dadurch charakterisiert, dass die Entscheidungen auf Basis von Erfahrungen und Vergangenheitsbedarfen getroffen werden. Die Vorgehensweise geht zwar mit den Vorteilen einfacherer Handhabbarkeit und kurzer Entscheidungszeiten einher, hat aber den entscheidenden Nachteil, dass bisher ungenutzte Lieferanten-Kunden-Kombinationen und die komplexen Auswirkungen der Aufnahme neuer Lieferanten unberücksichtigt blieben²⁾. Beobachtungen zeigten, dass bei Fehlen des Planers aufgrund von Urlaubs- oder Krankheitstagen die Qualität der Lösungen abnahm. Dies findet seine Begründung im impliziten Wissen des Planers, das nicht in strukturierter und schriftlicher Form zur Verfügung steht. Die Qualität und Robustheit der aus diesem Vorgehen resultierenden Lösung ist daher in hohem Maße von den individuellen Kenntnissen und Fähigkeiten des Planers abhängig.

-
- 1) Ausgehend von den eintägigen Verhandlungsgesprächen des Kooperationspartners kann für die Informationsbeschaffung nur eine Dauer von wenigen Stunden angenommen werden, um die Verhältnismäßigkeit zwischen Planungsaufwand und -nutzen zu wahren.
 - 2) Aufgrund der Beschränkung der menschlichen Kognition und der hohen Komplexität wird diese Vorgehensweise auch als *Muddling Through* bezeichnet (vgl. z. B. Lindblom (1959, S. 79 ff.); Voigt (1993, S. 13)). In diesem Begriff klingt die grundlegende Kritik der fehlenden Strukturierung und Lösungsqualität des aufgezeigten Ansatzes an.

Zur Realisation einer entscheidungsträgerunabhängigen Planung soll eine wissenschaftlich fundierte Entscheidungsunterstützung entworfen werden¹⁾. Durch die Zusammensetzung der relevanten Kosten in der Beschaffungsplanung des Flüssiggashandels aus Transport- und Bestellkosten sind die Bedarfsquantitäten der Kunden abhängig von den geographischen Orten des Angebots. Daher kann die Ermittlung der optimalen Bestellpreise und Transportkosten mit Hilfe der Modellierung eines Tourenplanungsproblems erfolgen. Die Rückkopplungen zwischen der taktischen und operativen Ebene könnten folglich zur Lösung des Problems genutzt werden²⁾.

Um die Eigenschaften der vorliegenden Problemstellung adäquat in einem Tourenplanungsproblem abzubilden, müsste der Standardansatz des Vehicle Routing (VRP) modifiziert und erweitert werden:

- Tankwagenkapazitäten im Sinne eines kapazitierten VRP³⁾ sind zu berücksichtigen.
- Bei Bedarfen, die die Tankwagenkapazität überschreiten, muss eine Aufteilung der Bedarfsmenge auf unterschiedliche Touren möglich sein⁴⁾.
- Aus kostenmäßigen Erwägungen kann es zweckmäßig sein, mehrere Lieferanten zur Bedarfserfüllung eines Kunden heranzuziehen (Multiple Sourcing). Zur Auffüllung eines Tankwagens nach der Belieferung eines Kunden kann ein anderer Lieferant, der in geographischer Nähe zur geplanten Route angesiedelt ist, angefahren werden. Diese Mehrdepotbetrachtung kann zu einer Senkung der Leerfahrtenanteile und der Bestellpreise führen. Das Tourenplanungsproblem wird dann mit mehreren

1) Neben der Entscheidungsträgerunabhängigkeit weisen computergestützte Entscheidungen den weiteren Vorteil auf, dass sie im Vergleich zur manuellen Vorgehensweise in kürzerer Zeit bessere Lösungen berechnen (vgl. Van Landeghem/Vanmaele (2002, S. 772)).

2) Vgl. Klein/Scholl (2011, S. 225); Landeghem/Vanmaele (2002, S. 769 ff.); Szwarc (1964, S. 33 ff.).

3) Vgl. Domschke/Scholl (2010, S. 206).

4) Diese Erweiterung wird als VRP mit Bedarfsaufteilung bezeichnet (vgl. Archetti/Speranza/Hertz (2006, S. 64 ff.), Chen/Golden/Wasil (2007, S. 318 ff.)).

Depots und mit der Möglichkeit zur Auslieferung und Einsammlung während einer Tour modelliert.¹⁾

- Weiterhin sind Zeitfenster zu berücksichtigen, die die Liefertermine sowie die Öffnungszeiten der Tankanlagen bei den Kunden abbilden²⁾. Gleichzeitig ermöglicht die Integration der zeitlichen Komponente in die Tourenplanung die Darstellung von Lenk- und Pausenzeiten der Fahrer.
- Bei Betrachtung von Liefer- und Öffnungszeitenräumen sowie einer Aufteilung der Bedarfe auf eine Vielzahl von Touren wird eine mehrperiodige Tourenplanung obligat, anhand der eine mehrtägige, wöchentliche oder monatliche Planung realisiert werden kann³⁾.
- Ergänzend kann die von der Handelsunternehmung angebotene Dienstleistung der Versorgungsüberwachung durch die Überführung des Tourenplanungsproblems in ein Inventory Routing Problem umgesetzt werden und so zusätzlich Transportkosten reduziert werden⁴⁾.

Aus diesen notwendigen Modifikationen und Erweiterungen des Grundmodells zur Tourenplanung ergibt sich ein hochgradig komplexes Tourenplanungsproblem, das in der Literatur als *Rich Vehicle Routing Problem* bezeichnet wird und sich für praxisnahe Problemstellungen einer optimalen Lösung entzieht⁵⁾. Eine Lösung mit Hilfe von Heuristiken ist daher naheliegend, jedoch würde diese mit langen Rechenzeiten und v. a. einem hohen Informationsbeschaffungsaufwand einhergehen und zu einer Lösung führen, die von unzureichender Qualität für die vorliegende Problemstellung ist. Eine Abweichung von der Lösung durch geänderte Umweltbedingungen wie Nachfragemengen oder Transportwege kann zu hohen Kosten oder Lieferengpässen führen (geringe Robustheit). Dies ist unter anderem

1) Vgl. Parragh/Doerner/Hartl (2008, S. 81 ff.); Renaud/Laporte/Boctor (1996, S. 229 ff.).

2) Vgl. Bräysy/Gendreau (2005a, S. 104 ff.); Desaulniers/Lavigne/Soumis (1998, S. 479 ff.); Thangiah/Fergany/Awan (2007, S. 329 ff.).

3) Vgl. z. B. Russell/Gribbin (1991, S. 747 ff.).

4) Vgl. Bertazzi/Savelsbergh/Speranza (2007, S. 49 ff.); Dror/Ball (1987, S. 891 ff.).

5) Vgl. Bräysy/Gendreau (2005b, S. 119 ff.); Goel/Gruhn (2008, S. 650 ff.); Semet/Taillard (1993, S. 469 ff.); Toth/Vigo (2002, S. 3 ff.). Zu einem Überblick über Lösungsalgorithmen vgl. z. B. Laporte (1992, S. 345 ff.) und (2009, S. 408 ff.).

dem geringen Abstraktionsgrad der Vorgehensweise geschuldet. Die inakzeptable Länge der Rechenzeiten sowie die geringe Robustheit führen dann dazu, dass die Vorgehensweise über die Tourenplanung nicht für die Problemstellung der taktischen Planungsebene geeignet ist, so dass eine alternative Modellierung in Betracht gezogen werden muss.

Um einen höheren Aggregationsgrad und kürzere Rechenzeiten zu erreichen, wird eine Erweiterung des klassischen Transportproblems vorgenommen¹⁾. Das klassische Transportproblem wurde zuerst von Gaspard Monge beschrieben²⁾ und fand ausgehend von der Formulierung des Grundproblems nach Frank L. Hitchcock³⁾ Eingang in die betriebswirtschaftliche Forschung. Die Problemstellung des klassischen Transportproblems basiert darauf, dass von i Lieferanten ($i=1, \dots, n$) a_i ME eines homogenen Gutes angeboten werden und von j Abnehmern ($j=1, \dots, m$) b_j ME des Gutes nachgefragt werden. Die Summen von Angebot und Nachfrage sind dabei identisch (Gleichgewichtsbedingung). Der Transport des Gutes führt zu variablen Kosten c_{ij} pro Mengeneinheit. Das klassische Transportproblem zielt dann darauf ab, die optimale Zuordnung von einem oder mehreren Anbietern zu den Nachfragern unter Maßgabe minimaler Transportkosten zu generieren. Hierbei werden keine Kapazitätsrestriktionen oder Transportmittelentscheidungen auf den Verbindungen berücksichtigt und alle Daten sind bekannt und deterministisch.⁴⁾

Um die vorliegende Problemstellung auf Basis eines klassischen Transportproblems abzubilden, ist die Integration einer Vielzahl von Erweiterun-

-
- 1) Die Erweiterung des klassischen Transportproblems für logistische Fragestellungen auf der strategischen Ebene ist verbreitet (vgl. z. B. Gen/Altıparmak/Lin (2006, S. 337 ff.)). Auf der taktischen Ebene nehmen z. B. Bierwirth/Kirschstein/Meisel (2012, S. 198 ff.) und Hirsch (2011, S. 15 ff.) eine Erweiterung des klassischen Transportproblems zur Lösung logistischer Probleme vor. Simchi-Levi/Chen/Bramel (2005, S. 180 ff.) modellieren ein Transportproblem mit dem Ziel, einen Produktions-, Lagerhaltungs- und Transportplan unter minimalen Kosten für eine Versorgungskette zu erzeugen. Diese Modellierung wird als Shipper Problem bezeichnet. Auch hier finden die Beschaffungsplanung sowie die entstehenden Beschaffungskosten jedoch keine Berücksichtigung. Eine Nutzung des Transportproblems im Bereich der Beschaffungsplanung wurde bisher in der Literatur nicht diskutiert.
 - 2) Vgl. Monge (1781, S. 666 ff.).
 - 3) Vgl. Hitchcock (1941, S. 224 ff.).
 - 4) Vgl. Domschke (2007, S. 41).

gen notwendig. Zur Strukturierungen der Erweiterungen werden die folgenden Anforderungen definiert:

- Da die Problemstellung auf der taktischen Planungsebene angesiedelt ist und auf die Vereinbarung monatlicher Mengen und Preise mit den Lieferanten abzielt, ist ein hoher Abstraktions- und Aggregationsgrad der Berechnungen mit einer Planreichweite von einem Jahr bzw. 12 Monaten zu modellieren¹⁾.
- Aufgrund der in Kapitel 2.2 dargestellten Gegebenheiten, insbesondere der hohen Bedeutung der Bestellkosten, können nicht nur die Transportkosten minimiert werden. Das Modell stellt vielmehr auf die simultane Minimierung von Transport- und Bestellkosten ab. Von der Einbeziehung der Verkaufspreise (i. S. einer Gewinnmaximierung) bei den einzelnen Kunden wird abgesehen, da die Problemstellung einerseits in der Beschaffungsplanung angesiedelt ist und andererseits durch den Anspruch der vollständigen Bedarfserfüllung (Vertrauensbasis des Flüssiggashandels) keine Auftragsauswahl zulässt²⁾. Die zweiteilige Kostenminimierung erscheint daher als geeignete Zielstellung und soll im Modell abgebildet werden.
- Aus den Ergebnissen sollen tourenplanungsbezogene Kennzahlen wie *Gefahrenre Gesamtkilometer* und *pro Tonne zurückgelegte Kilometer* ableitbar sein.
- In Abhängigkeit von den Kunden-Lieferanten-Verbindungen sollen verschiedene Speditionen und somit verschiedene Transportkosten abbildbar sein.

1) Vgl. Haley (1962, S. 448 ff.) für eine der ersten Erweiterungen des klassischen Transportproblems um einen dritten Index zu einem Soliden Transportproblem.

2) Vgl. z. B. Thorn (2002, S. 31) zu Zielstellungen der taktischen Supply Chain Planung. Ist eine Auftragsauswahl zugelassen, dann kann ein multikriterielles Transportproblem (Multi-objective Transportation Problem, MOTP) modelliert werden, in dem neben der Kostenminimierung auch auf eine Servicegradmaximierung abgestellt wird. Da die Ziele naturgemäß in konfliktärem Zusammenhang stehen, liegt die Lösung des MOTP nur als Kompromisslösung bzw. nichtdominierte Lösung vor. Vgl. hierzu die einführende Arbeit von Aneja/Nair (1979, S. 73 ff.) bzw. die weiterführenden Darstellungen von Bit/Biswal/Alam (1992, S. 135 ff.); Li/Lai (2000, S. 43 ff.) und Murad et al. (2010, S. 103 ff.).

- Gleichzeitig müssen spezielle Vertragsspezifika wie die Einhaltung von Maximalabnahmemengen sowie die Aktivierung von Staffelpreisen und -mengen abgebildet werden können.
- Die Gleichheit von Gesamtangebot und Gesamtnachfrage muss aufgehoben werden, da ein Angebotsüberhang auftreten kann.
- Auch die Berücksichtigung von Strafkosten bei Unterschreitung der Minimalabnahmemengen muss möglich sein.

Auf Grundlage dieser Anforderungen kann die Modellierung einer Entscheidungsunterstützung für die distributionsbasierte Beschaffungsplanung vorgenommen werden, die eine praxistaugliche Lösungsqualität mit kurzen Rechenzeiten und einfacher Handhabbarkeit verbindet.

3.2 Modellierung des Grundmodells

Das zu entwickelnde Modell nimmt die simultane Optimierung der für die Problemstellung relevanten Kosten vor¹⁾. Hierzu gehören neben den Kosten für den Transport vom Lieferanten i ($i = 1, \dots, n$) zum Kunden j ($j = 1, \dots, m$) die für das zu liefernde Flüssiggas anfallenden Bestellkosten und eventuelle Strafkosten, die bei Unterschreitung der mit einem Lieferanten vereinbarten Mindestabnahmemengen anfallen. Diesem Sachverhalt wird in der Zielfunktion Rechnung getragen, die sich aus den Termen Transport-, Bestell- und Strafkosten zusammensetzt.

Die *Transportkostenberechnung* beinhaltet hierbei eine Erweiterung des klassischen Transportproblems zur Integration tourenplanerischer Aspekte, wofür die folgenden Überlegungen den Ausgangspunkt bilden: Das klassische Transportproblem sieht zur Berechnung der Transportkosten die Multiplikation der zu liefernden Menge mit einem Kostensatz (GE/ME) vor. Dieser Kostensatz ist in der Praxis einerseits nicht direkt bestimmbar und andererseits lässt er keine Interpretation der Ergebnisse bezüglich der geforderten tourenplanerischen Kennzahlen zu. Zur Bearbeitung der vorliegen-

1) Die hier vorgestellte Modellierung dient der distributionsbasierten Beschaffungsplanung eines Produktes. Um den Mehrproduktfall (oder in Bezug auf Flüssiggase verschiedene Qualitäten) zu modellieren, können Erweiterungen vorgenommen werden, die zu einem Modell mit erhöhter Komplexität führen. Für eine vollständige Modellierung des Mehrproduktfalls vgl. Anhang B.

den Problemstellung wird daher eine Segmentierung dieses Kostensatzes in Distanzen (km) und Kosten pro gefahrenem Kilometer und gelieferter Tonne (GE/km t) vorgenommen, der dann mit der zu liefernden Menge multipliziert werden kann¹⁾. Die Transportkosten setzen sich somit aus drei Faktoren zusammen:

- Zum einen wird die Menge x_{ijt} berücksichtigt, die in einer Periode t ($t = 1, \dots, h$) von einem Lieferanten i zu einem Kunden j transportiert wird. Sie ist eine zu bestimmende Variable des Modells.
- Die Distanz in Kilometern zwischen einem Lieferanten i und einem Kunden j wird durch den Parameter d_{ij} widerspiegelt. Die Distanz bleibt in jeder Periode gleich, daher kann der Index t vernachlässigt werden²⁾.
- Der dritte Faktor des Transportkostenterms, der Transportkostenfaktor α_{ijt} , integriert den Kostenaspekt der Transporte und ermöglicht die Annäherung an die Tourenplanung. Er ist abhängig von den folgenden Größen:
 - Der Kostensatz g_{ij} pro gefahrenem Kilometer kann entweder durch den an eine Spedition zu zahlenden Kilometersatz oder aus den Erfahrungen der unternehmungseigenen Logistik ermittelt werden³⁾. Durch die verbindungs- und periodenbezogene Indizierung ist es darüber hinaus möglich, spezifische Vereinbarungen mit Kunden oder die Ergänzung des unternehmungseigenen Fuhrparks durch verschiedene Speditionen abzubilden. Gleichzeitig können etwa Großkunden, die durch regelmäßige, oft mehrmals tägliche Lieferungen charakterisiert sind, mit einem durch die gute Prognostizierbarkeit begründeten geringeren Kostensatz in die Berechnung ein-

1) Bei dieser Trennung werden mengenabhängige (variable) Kosten angenommen. So kann eine Zählung der notwendigen Fahrten und deren kostenmäßigen Auswirkungen im Sinne des Ansatzes von Peters (1972, S. 130 f.) nicht die im Transportkostenfaktor α_{ijt} enthaltenen Parameter ersetzen.

2) Im Falle periodenabhängiger Distanzen (durch Umwege aufgrund von Wettergegebenheiten im Winter o. Ä.) kann eine zeitbezogene Indizierung des Parameters (d_{ijt}) erfolgen.

3) Im letzten Fall ist dann im Rahmen der Prozesskostenrechnung eine transparentere Kostenzurechnung möglich, indem die leistungsmengeninduzierten Kosten nach dem Beanspruchungsprinzip und die leistungsmengenneutralen Kosten und die Leerkosten nach dem Durchschnittsprinzip berechnet werden.

gehen. Somit kann die Tourenplanung in abstrakter Form modelliert werden.

- Dieser Kostensatz g_{ij} muss in Beziehung zur durchschnittlichen Lademenge gesetzt werden, um die vom klassischen Transportproblem geforderte Multiplikation mit der zu liefernden Menge zur Ermittlung der Transportkosten zu ermöglichen. Dieser Zusammenhang wird über den Parameter u , der das Reziprok der durchschnittlichen Lademenge bildet, dargestellt. Die durchschnittliche Lademenge ist von den folgenden Teilaspekten abhängig:
 - Die Transportkapazität der Tankwagen bildet eine obere Schranke für die Transportmenge. In Deutschland beträgt diese ca. 21 Tonnen pro Lkw.
 - Nach der Belieferung eines Kunden muss der Tankwagen zum nächsten Lieferanten fahren, um eine Neubeladung durchzuführen. Diese Fahrt wird als Leerfahrt bezeichnet. Da die Transportkosten für die von einem Lieferanten zu einem Kunden gelieferte Menge berechnet werden, würden Leerfahrten nicht in die bisherige kostenmäßige Betrachtung einfließen. Um diesem Sachverhalt entgegenzuwirken, wird der (aus Vergangenheitsdaten) prognostizierte Anteil an Leerfahrten in die Berechnung der Transportkosten einbezogen.
 - Weiterhin müssen die Tankwagen zu Beginn des Einsatzes von einem Depot zum ersten Lieferanten fahren und zum Ende des Einsatzes zu diesem Standort zurückkehren bzw. die Wegstrecke vom letzten Einsatzort zum nächsten Lieferanten zurücklegen. Diese Anfangs- und Endstrecken werden ebenso durch den Einfluss der durchschnittlichen Lademenge in der Transportkostenberechnung berücksichtigt.

Daraus folgt für den Transportkostensatz $\alpha_{ijt} = g_{ij} \cdot u^1$.

1) Es sind weitere Einflussfaktoren auf den Transportkostensatz denkbar. Hierzu zählen u. a. kundengruppenspezifische Erweiterungen wie eine Verringerung der durchschnittlichen Lademenge aufgrund stark restringierender Belieferungszeitfenster oder sehr kleiner Kundentanks. Weiterhin können unscharfe Kostenkoeffizienten mit Hilfe der Fuzzylogik modelliert werden (vgl. z. B. Chanas/Kuchta (1996, S. 299)), wodurch der durch die Aggregation verursachte Informationsverlust verringert wird.

Die Transportkosten K^{tr} können dann durch Summierung dieser drei Faktoren über die Mengen aller Perioden, Lieferanten und Kunden berechnet werden:

$$K^{tr} = \sum_{t=1}^h \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_{ijt} \cdot d_{ij} \cdot x_{ijt}$$

Hierbei wird mit dem Ziel der Komplexitätsreduktion ein linearer Zusammenhang unterstellt, der durch den erhöhten Aggregationsgrad auf der taktischen Ebene gerechtfertigt werden kann.

Simultan erfolgt die Berechnung der durch die zu liefernde Menge evozierten *Bestellkosten* pro Periode¹⁾. Diese Bestellkosten werden unter Einbeziehung der spezifischen Vertragsparameter abgebildet. Hierzu gehören

- die Kosten k_{it} pro vom Lieferanten i abzunehmender Tonne Flüssiggas in Periode t,
- die verhandelten Maximalabnahmemengen O_{it} , die zur Abnahme bei Lieferant i in Periode t zur Verfügung stehen, sowie
- Preise und Maximalabnahmemengen eventueller weiterer Staffeln, die zur Abnahme bei Lieferant i zur Verfügung stehen.

Während die Kosten k_{it} über die Multiplikation mit der bestellten Menge x_{ijt} von Lieferant i direkt in die Zielfunktion einfließen und die Einhaltung der Maximalabnahmemengen in den unten folgenden Nebenbedingungen direkt abgebildet werden kann, sind zur Modellierung der Preis- und Mengestaffeln sowie der Minimalabnahmemengen weitere Überlegungen notwendig.

Die Abbildung der Staffelpreise und -mengen wird in der hier vorgeschlagenen Modellierung über die Einführung eines zusätzlichen virtuellen Lieferanten (Dummylieferanten) $i = n + 1, \dots, 2n, 2n + 1, \dots, 3n, 3n + 1, \dots, fn$ für jede Staffel f möglich. Dieser virtuelle Lieferant ist mit den identischen Koordinaten des ursprünglichen Lieferanten ausgestattet, bietet aber andere

1) Vgl. Badel/Corsten/Wolff (2013, S. 791). Es sei darauf hingewiesen, dass der Ausfall eines Ausfalls einer Flüssiggasquelle durch zusätzliche Verträge mit Lieferanten (sog. Backup Suppliers) über priorisierende Nebenbedingungen in das Modell integriert werden kann (vgl. Bilsel/Ravindran (2011, S. 1285); Klihi/Martel/Guitouni (2010, S. 283)).

Preise und Maximalabnahmemengen, die dem Händler zusätzlich zu den vom ursprünglichen Lieferanten angebotenen Mengen zur Verfügung stehen. Das vorliegende Modell bezieht, wie in der Praxis üblich, zwei Preisstaffeln

($f = 2$) ein. Zur Übertragung des Modells auf andere Branchen kann eine Erweiterung auf eine höhere Staffelanzahl analog zu dem hier dargestellten Vorgehen vorgenommen werden.

Die Bestellkosten K^{be} setzen sich dann wie folgt über die Perioden, beide Staffeln und die vollständige Kundenmenge zusammen:

$$K^{be} = \sum_{t=1}^h \sum_{i=1}^{2n} \sum_{j=1}^m k_{it} x_{ijt} .$$

Ein weiteres Vertragsspezifikum, das sich in den relevanten Kosten niederschlägt und daher in die Zielfunktion aufzunehmen ist, sind die Minimalabnahmemengen U_{it} . Hierunter sind Mengen zu verstehen, deren Verfügbarkeit und Abnahme sich der Händler und der Lieferant i gegenseitig garantieren. Dieses Vertragsspezifikum geht mit dem Vorteil einher, dass dem Händler diese Mengen auch in Engpassperioden garantiert zur Verfügung stehen. Nachteilig wirkt sich dieser Sicherungsmechanismus jedoch dann aus, wenn diese Mengen nicht benötigt werden. In diesem Fall ist der Händler dazu verpflichtet, die nicht abgenommenen Mengen dennoch zu vergüten. Diese Kosten für nicht genutzte Mengen fließen als sogenannte *Strafkosten* in die Zielfunktion ein¹⁾. Hierbei wird die Unterschreitung der Minimalabnahmemengen U_{it} über die Binärvariable y_{it} geprüft. y_{it} ist 0, wenn die Minimalabnahmemengenvereinbarung eingehalten wurde und 1, wenn die Minimalabnahmemenge unterschritten wurde. Da theoretische auch Minimalabnahmemengen für die zweite Staffel vereinbart werden können, wird auch an dieser Stelle eine Indizierung der Summe über beide

1) Weiterhin ist zu betonen, dass bei Händlern, die eine eigene Gasquelle betreiben, diese als Lieferant in die Betrachtung eingeht. Zur Modellierung einer bevorzugten Nutzung der eigenen Quelle können die entsprechenden Minimalabnahmemengen in Höhe der Produktionskapazität und die Strafkosten als unendlich hoch definiert werden.

3 Grundmodell zur distributionsbasierten Beschaffungsplanung

betrachteten Staffeln vorgenommen. Die Strafkosten K^{st} lassen sich also wie folgt berechnen¹⁾:

$$K^{st} = \sum_{i=1}^h \sum_{i=1}^{2n} y_{it} \cdot k_{it} \cdot \left(U_{it} - \sum_{j=1}^m x_{ijt} \right).$$

Die Zusammenhänge der gegebenen Daten von Lieferanten und Kunden sowie die entstehenden Transportwege und -parameter lassen sich in Abbildung 7 nachvollziehen.

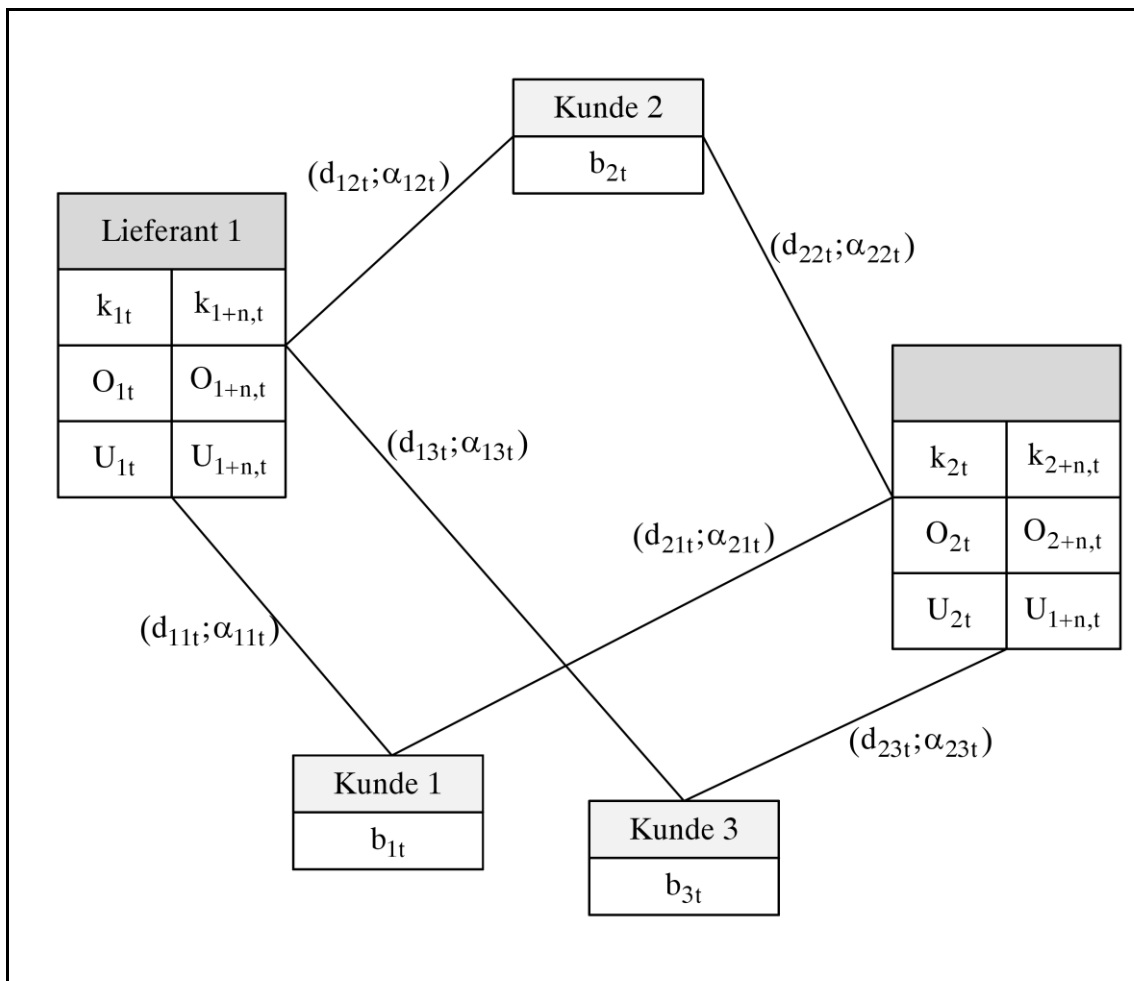


Abbildung 7: Darstellung der Inputdaten für die Modellierung

- 1) Der Begriff der Strafkosten wird hier in Zusammenhang mit der Unterschreitung der vertraglich vereinbarten Minimalabnahmemengen verwendet. Die Strafkosten sind damit von Straftermen zur Abbildung von verletzten Nebenbedingungen im Rahmen der Operations Research Forschung zu unterscheiden.

3 Grundmodell zur distributionsbasierten Beschaffungsplanung

Aus diesen Überlegungen lässt sich die Zielfunktion des vorgeschlagenen Modells wie folgt konstruieren¹⁾:

$$\begin{aligned} \text{Minimiere } K = & \sum_{t=1}^h \sum_{i=1}^{2n} \sum_{j=1}^m \alpha_{ijt} \cdot d_{ij} \cdot x_{ijt} + \sum_{t=1}^h \sum_{i=1}^{2n} \sum_{j=1}^m k_{it} \cdot x_{ijt} \\ & + \sum_{t=1}^h \sum_{i=1}^{2n} y_{it} \cdot k_{it} \cdot \left(U_{it} - \sum_{j=1}^m x_{ijt} \right) \end{aligned} \quad (1.1)$$

mit:

x_{ijt} Variable, die die von Lieferant i bezogene und an den Kunden j zu liefernde Menge in Periode t abbildet.

α_{ijt} Transportkostenfaktor für die Belieferung von Kunde j durch Lieferant i in Periode t .

d_{ij} Distanz von Lieferant i zu Kunde j .

k_{it} Preis und Staffelpreis pro von Lieferant i abgenommener Tonne in Periode t .

U_{it} Vereinbarte Minimalabnahmemenge von Lieferant i in Periode t .

y_{it} Binärvariable zur Darstellung der Unterschreitung der vereinbarten Minimalabnahmemenge von Lieferant i in Periode t .

$$y_{it} = \begin{cases} 1 & \text{wenn } \sum_{j=1}^m x_{ijt} \leq U_{it} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \forall i = 1, \dots, n; t = 1, \dots, h \quad (1.2)$$

Die Optimierung der Zielfunktion wird dabei von einigen aus den dargestellten Charakteristika des Flüssiggashandels resultierenden Nebenbedingungen restringiert. Hierbei werden wiederum Ergänzungen und Änderungen des klassischen Transportproblems vorgenommen.

Zunächst sei die vollständige Befriedigung der Kundennachfragen b_{jt} pro Periode¹⁾ definiert²⁾:

1) Zur dargestellten Formulierung der Zielfunktion sei bemerkt, dass bei allen Kostentermen zwei Staffeln betrachtet werden und der Kundenindex i durch $i = 1, \dots, 2n$ bestimmt wird.

$$\sum_{i=1}^{2n} x_{ijt} = b_{jt} \quad \forall j = 1, \dots, m; t = 1, \dots, h \quad (1.3)$$

Darüber hinaus wird die oben erwähnte Einhaltung der Maximalabnahmemengen O_{it} jedes Lieferanten i abgebildet:

$$\sum_{j=1}^m x_{ijt} \leq O_{it} \quad \forall i = 1, \dots, 2n; t = 1, \dots, h \quad (1.4)$$

Die Aktivierung der zweiten Preis- und Mengenstaffel darf erst zugelassen werden, wenn die obere Schranke, d. h. die Maximalabnahmemenge, der ersten Staffel erreicht wurde. Dies ist insbesondere zu beachten, wenn der Preis der zweiten Staffel unter dem der ersten Staffel liegt. In diesem Fall würde ein Optimierungsalgorithmus die zweite Staffel prioritär benutzen und das Ergebnis wäre für die Praxis unzulässig berechnet. Daher wird die Binärvariable z_{it} eingeführt, die abbildet, ob die Grenze der ersten Staffel erreicht wurde und somit die zweite Staffel genutzt werden darf. z_{it} nimmt den Wert 1 an, wenn die Grenze erreicht wurde und 0, falls die Grenze noch nicht erreicht wurde:

-
- 1) Die Kundenbedarfe werden in dieser Arbeit anhand von Vergangenheitsdaten prognostiziert. Ferner kann die Beschreibung der Kundenbedarfe über Verteilungsfunktionen erfolgen, deren Bestimmung durch weitere Parameter wie die Branchenzugehörigkeit, die Bedarfsregelmäßigkeit und die Größe präzisiert werden (vgl. Hagdorn van der Meijden (1996, S. 129)).
 - 2) Die zwingende vollständige Bedarfserfüllung wird für die Modellierung des Grundmodells angenommen. Die Möglichkeit der kurzfristigen Akquisition von Flüssiggasmengen im Rahmen von Swap-Verträgen wird vorerst zur Darstellung des Modellprinzips vernachlässigt. Weiterhin ist zu bemerken, dass bei Vorhandensein der entsprechenden Informationen kundenspezifische Pönalitäten für entstandene Fehlmengen über einen zusätzlichen Zielfunktionsterm in die Berechnung einbezogen werden können.

3 Grundmodell zur distributionsbasierten Beschaffungsplanung

$$z_{it} = \begin{cases} 1 & \text{wenn } \sum_{j=1}^m x_{ijt} \geq O_{it} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \forall i = 1, \dots, n; t = 1, \dots, h \quad (1.5)$$

Mit Hilfe der Binärvariablen z_{it} kann dann die Zulassung der zweiten Staffel gesteuert werden:

$$\sum_{j=1}^m x_{ijt} \leq O_{it} - O_{it} (1 - z_{i-n,t}) \quad \forall i = n + 1, \dots, 2n, t = 1, \dots, h \quad (1.6)$$

Die Maximalabnahmemenge der zweiten Staffel greift nur, wenn die Binärvariable $z_{i-n,t}$ für den ursprünglichen Lieferanten den Wert 1 annimmt und die Grenze der Maximalabnahmemenge erreicht ist. Nimmt die Binärvariable $z_{i-n,t}$ des ursprünglichen Lieferanten den Wert 0 an, d. h. die Grenze der Maximalabnahmemenge wurde noch nicht erreicht, dann darf die zweite Staffel nicht genutzt werden und die abgenommene Menge x_{ijt} des Dummylieferanten muss 0 entsprechen. Dieser Zusammenhang ist in Nebenbedingung (1.6) dargestellt.

Schließlich müssen die folgenden Variablendefinitionen bei der Optimierung berücksichtigt werden:

$$x_{ijt} \geq 0 \quad \forall j = 1, \dots, m; i = 1, \dots, 2n; t = 1, \dots, h \quad (1.7)$$

$$y_{it}, z_{it} \in \{0, 1\} \quad \forall i = 1, \dots, n; t = 1, \dots, h \quad (1.8)$$

Im Rahmen der Parametrisierung ist zu beachten, dass die Wahl der Periodenlänge Einfluss auf die zielführende Nutzbarkeit der Modellierung ausübt¹⁾:

- Im Falle einer zu kurzen Periodenlänge (z. B. Tage) wird der Aussagegehalt der Ergebnisse reduziert. Eine detaillierte Tourenplanung wäre dann zu bevorzugen.
- Eine zu lange Periodenlänge (z. B. Jahre) ginge mit einer zu starken Aggregation einher und der Aussagegehalt würde wiederum sinken.

Aufgrund dieser Überlegungen wird von einer geeigneten Periodenlänge von einem Monat ausgegangen ($t = 1, \dots, 12$ für die Betrachtung eines Jahres)²⁾.

Das vorgestellte Modell ist in die Klasse der gemischt-ganzzahligen Optimierungsprobleme (mixed-integer optimizing problem, MIP) einzuordnen. Es enthält $i \cdot t \cdot (j + 2)$ Entscheidungsvariablen und $h \cdot (4n + m)$ Nebenbedingungen³⁾. Hierbei weisen neben den Binärvariablendefinitionen auch die Zielfunktion (1.1) und die Nebenbedingung (1.6) Nichtlinearitäten durch die Multiplikation von Variablen auf. Um diese Nichtlinearitäten handhabbar zu machen, wird eine Linearisierung vorgenommen, die im Folgenden dargestellt wird.

Die linearen Bestandteile des ursprünglichen gemischt-ganzzahligen Optimierungsproblems können ohne Adaptionen in das lineare Modell übernommen werden. Hierzu gehören

- die Terme zur Berechnung der Transport- und der Bestellkosten in der Zielfunktion (1.1),
- die Nebenbedingung (1.3) zur Befriedigung der Kundennachfragen,

1) Vgl. Badel/Corsten/Wolff (2012, S. 7) und weiterhin Steinhoff (1981, S. 13 ff.) zur allgemeinen Bedeutung der Zeit in ökonomischen Zusammenhängen. Zur Bestimmung des optimalen Aggregationsniveaus vgl. z. B. Hagdorn (1996, S. 120 ff.).

2) Im Falle der Betrachtung eines Jahres können abhängig von der Branche weitere Nebenbedingungen, beispielsweise bezüglich der maximal zurückzulegenden Jahresgesamtkilometer oder vereinbarter Jahresmaximalabnahmemengen hinzugefügt werden.

3) Die Gleichungen (1.7) und (1.8) werden als Variablendefinitionen betrachtet und daher bei der Zählung der Nebenbedingungen vernachlässigt.

- die Nebenbedingung (1.4) zur Einhaltung der Maximalabnahmemengen und
- die Variablendefinitionen (1.7) und (1.8).

Der Strafkostenterm in der Zielfunktion beinhaltet zwei zu linearisierende Teilaspekte: einerseits die Variablendefinition der Binärvariablen y_{it} und andererseits die Multiplikation einer binären und einer kontinuierlichen Entscheidungsvariablen. Diesem Sachverhalt wird über die Hagensche Hilfsvariable s_{it} Rechnung getragen. s_{it} repräsentiert die Strafmenge, um die die vereinbarte Minimalabnahmemenge unterschritten wird. Diese Menge wird nicht zur Befriedigung der Nachfragen benötigt, evoziert jedoch durch die vertragliche Bindung Kosten. Die Höhe der Kosten kann durch die Multiplikation der Strafmenge mit den lieferantenspezifischen Kosten pro Mengeneinheit berechnet werden:

$$K_{lin}^{st} = \sum_{t=1}^h \sum_{i=1}^n s_{it} \cdot k_{it}$$

Somit kann die lineare Zielfunktion wie folgt dargestellt werden:

$$\text{Minimiere } K = \underbrace{\sum_{t=1}^h \sum_{i=1}^{2n} \sum_{j=1}^m \alpha_{ijt} \cdot d_{ij} \cdot x_{ijt}}_{\text{Transportkosten}} + \underbrace{\sum_{t=1}^h \sum_{i=1}^{2n} \sum_{j=1}^m k_{it} \cdot x_{ijt}}_{\text{Bestellkosten}} + \underbrace{\sum_{t=1}^h \sum_{i=1}^n s_{it} \cdot k_{it}}_{\text{Strafkosten}} \quad (2.1)$$

Zur Bestimmung des Strafkostenterms ist zunächst festzustellen, ob Strafkosten für den jeweiligen Lieferanten anfallen. Dies erfolgt über die Linearisierung der Binärvariablen y_{it} . Die Sicherstellung der Funktionsweise der Binärbedingung aus dem Originalmodell, d. h. dass die Strafkosten nur bei Unterschreitung der Minimalabnahmemenge anfallen, wird hierbei über die Big-M-Modellierungsmethode vorgenommen. Dieser entsprechend ist Ω eine hinreichend große Zahl zugeordnet¹⁾, so dass durch die Nebenbedingungen (2.2) und (2.3) $y_{it} = 1$ gesetzt wird, falls die Differenz aus der mit dem Lieferanten pro Periode vereinbarten Minimalabnahmemenge U_{it} und

1) Zur Unterstützung einer für die Problemstellung angemessenen Rechenzeit sollte Ω so gewählt werden, dass es groß genug ist, um die Aktivierungsfähigkeit in jeder denkbaren Parameterrealisation zu besitzen, jedoch klein genug, um die Rechenzeiten nicht unnötig zu erhöhen. Für die dargestellte Modellierung kann Ω beispielsweise über die Summe der jährlichen Gesamtbedarfe definiert werden.

3 Grundmodell zur distributionsbasierten Beschaffungsplanung

die Summe der von den Kunden abgenommenen Menge $\sum_{j=1}^m x_{ijt}$ positiv ist und $y_{it} = 0$ bestimmt wird, falls die Differenz negativ oder „null“ ist:

$$U_{it} - \sum_{j=1}^m x_{ijt} \leq \Omega \cdot y_{it} \quad \forall i = 1, \dots, n; t = 1, \dots, h \quad (2.2)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ijt} - U_{it} \leq \Omega \cdot (1 - y_{it}) \quad \forall i = 1, \dots, n; t = 1, \dots, h \quad (2.3)$$

Fallen positive Strafkosten an, dann ist die Höhe der Strafkosten zu berechnen. Hierzu ist in Nebenbedingung (2.5) und (2.6) die Differenz aus der mit dem Lieferanten pro Periode vereinbarten Minimalabnahmemenge U_{it} und der von der Summe der Kunden abgenommenen Menge $\sum_{j=1}^m x_{ijt}$ zu bilden und mit der Binärvariable y_{it} verknüpft. So können die folgenden logischen Zusammenhänge abgebildet werden:

- Im Falle von $y_{it} = 1$ stellt die Nebenbedingung (2.4) sicher, dass eine positive Strafmeng s_{it} festgelegt wird. Durch Nebenbedingung (2.5) werden die Strafkosten kleiner oder gleich der Differenz zwischen vereinbarter und abgenommener Menge angenommen. Nebenbedingung (2.6) zwingt die Strafkosten durch die Größer-Gleich-Beziehung auf den exakten Wert der oben genannten Differenz.
- Im Falle von $y_{it} = 0$ wird durch Nebenbedingung (2.4) keine Strafmeng definiert. Darüber hinaus führt die Multiplikation des rechten Terms mit einer hinreichend großen Zahl dazu, dass beide Nebenbedingungen (2.5) und (2.6) für alle abgenommenen Mengen erfüllt sind und der Lösungsraum nicht restringiert wird.

Die lineare Formulierung zur Identifikation und Berücksichtigung von Strafkosten durch verletzte Minimalabnahmemengen erfolgt durch:

3 Grundmodell zur distributionsbasierten Beschaffungsplanung

$$s_{it} \leq \Omega \cdot y_{it} \quad \forall i = 1, \dots, n; t = 1, \dots, h \quad (2.4)$$

$$s_{it} \leq (U_{it} - \sum_{j=1}^m x_{ijt}) - \Omega \cdot (y_{it} - 1) \quad \forall i = 1, \dots, n; t = 1, \dots, h \quad (2.5)$$

$$s_{it} \geq (U_{it} - \sum_{j=1}^m x_{ijt}) - \Omega \cdot (1 - y_{it}) \quad \forall i = 1, \dots, n; t = 1, \dots, h \quad (2.6)$$

Die Linearisierung der Binärvariablen z_{it} zur Aktivierung der zweiten Staffel (und der Nutzung der entsprechenden Preise und Mengen) wird analog zur Binärvariablen y_{it} vorgenommen. Die Differenz zwischen der in der ersten Staffel vereinbarten Maximalabnahmemenge O_{it} und der abgenommenen Menge $\sum_{j=1}^m x_{ijt}$ wird mit der hinreichend großen Zahl Ω in Verbindung gebracht. Die Nutzung der Big-M-Methode führt dann dazu, dass über die Nebenbedingungen (2.7) und (2.8) der Binärvariablen z_{it} der Wert 1 zugewiesen wird, falls die Differenz zwischen vereinbarter Maximalabnahmemenge und abgenommener Menge nicht positiv ist, d. h. die betrachtete Obermenge erreicht wird und somit die zweite Staffel aktiviert werden kann. Im konträren Fall des Nichterreichens der Obergrenze (d. h. die Differenz ist positiv) wird z_{it} auf den Wert null gezwungen und die Preise und Mengen der zweiten Staffel des betrachteten Lieferanten stehen nicht zur Verfügung:

$$O_{it} - \sum_{j=1}^m x_{ijt} \leq \Omega \cdot (1 - z_{it}) \quad \forall i = 1, \dots, n; t = 1, \dots, h \quad (2.7)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ijt} - O_{it} \leq \Omega \cdot z_{it} \quad \forall i = 1, \dots, n; t = 1, \dots, h \quad (2.8)$$

$$s_{it} \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, n; t = 1, \dots, h \quad (2.9)$$

Das linearisierte Modell kann mit Hilfe von Standardsolvern gelöst werden, wobei Inferior-Point-Methoden¹⁾ oder die Simplex-Methode²⁾ zur Anwendung gelangen können. Die Umsetzung und Prüfung der dargestellten Modellierung in einem Standardsolver vermag Hinweise auf die Möglichkeiten und Grenzen der Formulierung des vorgestellten Grundmodells geben.

3.3 Kritische Analyse des Grundmodells

Die Berechnung des Grundmodells ermöglicht

- einerseits einen Nachweis der Validität der Modellierung³⁾, indem ein Vergleich der berechneten Ergebnisse mit den Realdaten des Kooperationspartners durchgeführt wird, und
- andererseits die Interpretation der Ergebnisse und somit die Unterstützung von Entscheidungen der taktischen Beschaffungsplanung.

Anhand der Umsetzung des Modells in die Programmiersprache Xpress Mosel Version 3.2.2 und der Berechnung von ersten Ergebnissen kann die Eignung des Modells für die Unterstützung des Entscheidungsprozesses in der Beschaffungsplanung geprüft werden. Zu diesem Zweck werden die berechneten Ergebnisse für 12 Monate mit den Realdaten der kooperierenden Unternehmung als Referenzdaten verglichen.⁴⁾ Hierfür wurde die FICO Xpress Optimization Suite Version 7.2 auf einem Personal Computer mit Intel Core 2 Duo T9300 @ 2.50 GHz und 4GB RAM unter Microsoft Windows 7 Professional 64-Bit genutzt.

1) Vgl. z. B. Karmarkar (1984).

2) Vgl. Dantzig (1955, S. 197 ff.); Kantorovich (1939 und 1960, S. 366 ff.); Schrijver (1986, S. 209 ff.).

3) Vgl. Witte (1979, S. 1).

4) Zur Aufbereitung der Daten, insbesondere zur Kalibrierung des Transportkostenfaktors, wurde eine Auswertung einer repräsentativen Auswahl realer Tourendaten unter Zuhilfenahme von Microsoft Excel 2010 vorgenommen.

3 Grundmodell zur distributionsbasierten Beschaffungsplanung

In Abbildung 8 sind die Transport- und Bestellkosten der Referenzunternehmung¹⁾ und des distributionsbasierten Beschaffungsplanungsmodells für einen 12-monatigen Betrachtungszeitraum dargestellt.

Hierbei wird deutlich, dass die Kosten der Referenzunternehmung in beiden Fällen über den Kosten liegen, die mit dem vorliegenden Modell berechnet wurden. Insgesamt wird bei Nutzung des dargestellten Modells zur distributionsbasierten Beschaffungsplanung eine durchschnittliche Reduzierung der Bestellkosten um 6,96 % erreicht (vgl. Anhang C). Hierbei zeigt sich eine minimale Senkung der Bestellkosten von 4,07 % (Juli) und eine maximale Senkung um 9,43 % (im September). Bei Betrachtung der Transportkosten wird eine durchschnittliche Reduktion von 33,31 % (mit einem Minimum von 27,17 % im Februar und einem Maximum von 44,41 % im August) errechnet.

Dieser Sachverhalt lässt sich wie folgt begründen: Zunächst kann aus theoretischer Sicht eine bessere Zuordnung von Kunden zu Lieferanten vorgenommen werden, als durch die erfahrungsbasierten Entscheidungen des Planers in der Praxis.

1) An dieser Stelle sei auf die aus datenschutzrechtlichen Gründen vorgenommene Verfremdung der dargestellten Ergebnisse hingewiesen, die unter Beibehaltung der Ergebnisstruktur ausgeführt wurde.

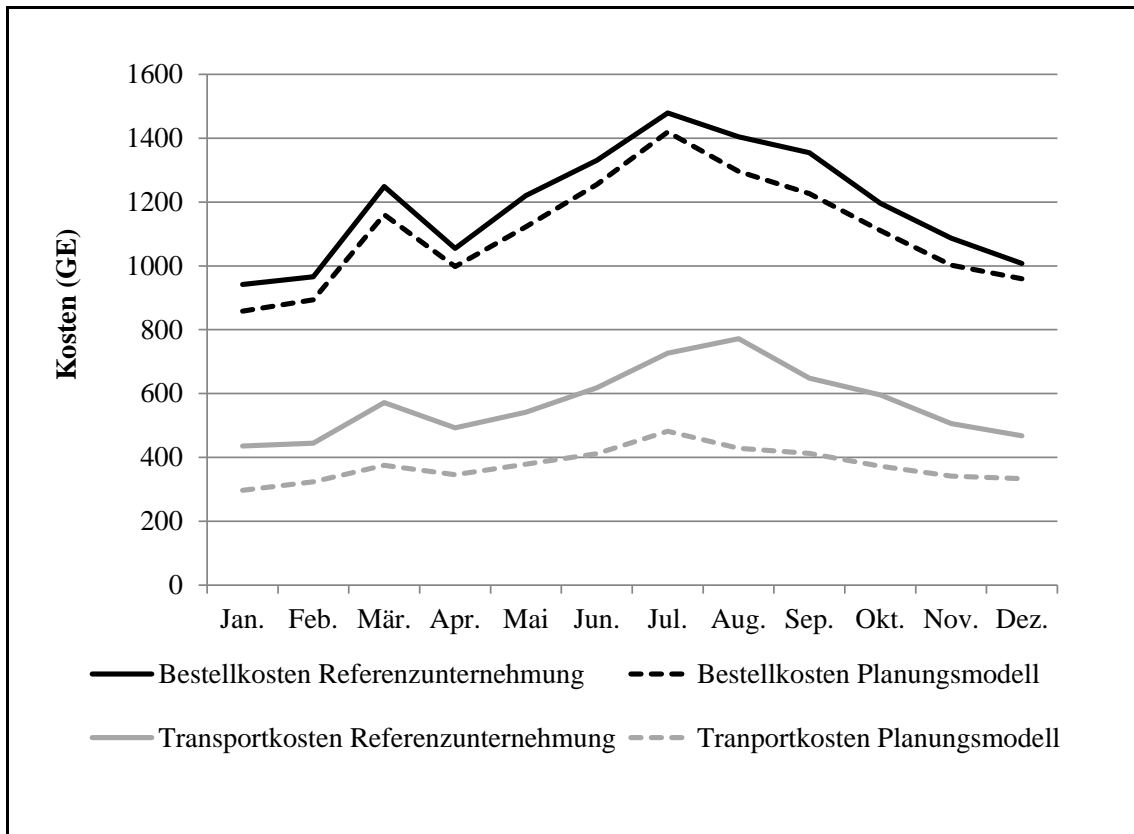


Abbildung 8: Vergleich modellgenerierter und beobachteter Transport- und Bestellkosten

Darüber hinaus resultieren die Unterschiede aus den hohen Unsicherheiten in der unternehmerischen Praxis. Insbesondere die Einhaltung eines hohen Servicegrades bei kurzfristigen Bedarfsänderungen erfordert eine schnelle Reaktion des Händlers, bei der die kostenminimale Lieferanten-Kunden-Zuordnung nicht zwangsläufig eingehalten werden kann. Auch operative Probleme im Rahmen der Tourenplanung durch Routenänderungen oder ungünstige Verkehrslagen können zu einer suboptimalen Zuordnung führen.

Eine optimale Zuordnung der Kunden zu Lieferanten geht dabei mit zwei Effekten einher:

- einerseits sinkt die Höhe der Bestellkosten, da Lieferanten mit niedrigeren Preisen bevorzugt werden können, und
- andererseits resultiert aus den kürzeren Distanzen zwischen den Kunden und den Lieferanten die Reduktion der Transportkosten.

Die Entscheidungsunterstützung anhand des konzipierten Modells kann daher zu niedrigeren Bestell- und Transportkosten im Vergleich zur erfahrungsbasierten Planung führen. Der Vergleich der Daten der Partnerunternehmung mit den durch das Modell berechneten Ergebnissen dient als Nachweis der guten Eignung der Modellierung für praktische Problemgrößen. Dabei kann die Unterstützung für Entscheidungen in der taktischen Beschaffungsplanung durch die ex-ante Simulation der Auswirkungen verschiedener Ereignisse erfolgen, die

- einerseits auf die unternehmensbezogene Diskussion der Beschaffungssituation und -position des Händlers abzielen und
- andererseits den Planer auf die konkreten Verhandlungen mit einem ausgewählten Lieferanten vorbereiten.

Beide Interpretationsansätze der Ergebnisse des dargestellten Modells zur Entscheidungsunterstützung werden im Folgenden erläutert, wobei zunächst auf die unternehmensbezogene Diskussion der resultierenden kostenmäßigen Veränderungen durch relevante Ereignisse fokussiert wird. Hierzu zählen u. a.

- die Erweiterung oder Reduzierung des Lieferantenportfolios,
- die Hinzunahme bzw. der Verlust eines neuen Kunden,
- die Neugestaltung von Bestellpreisen und
- die Veränderungen des Nachfragevolumens.

Die Auswirkungen der Aufnahme oder des Ausfalls eines Lieferanten kann durch die Interpretation der erneut berechneten Ergebnisse des Modells quantitativ verortet und anschließend auf Vor- bzw. Nachteilhaftigkeit untersucht werden. Hierfür werden die Inputdaten unter Nutzung der lieferantenbezogenen prognostizierten Preise, Entfernungen und zur Verfügung stehenden Mengen alteriert¹⁾. Der neue Lieferant wird dann als möglicher Anbieter zur Befriedigung der Kundennachfragen in die Berechnung aufgenommen. Falls die Lösung eine Abnahme von diesem Lieferanten vorsieht, kann die Empfehlung abgeleitet werden, mit diesem Lieferanten in Verhandlungen zu treten. Im Falle eines simulierten Ausfalls eines Liefe-

1) Alternativ können die Daten auch über zusätzliche Nebenbedingungen direkt in die Modellierung aufgenommen werden.

ranten können dessen Maximal- und Minimalabnahmemengen auf 0 gesetzt werden und die in bisherigen Rechnungen von ihm abgenommenen Mengen werden bei Neuberechnung von anderen Lieferanten übernommen. Die Simulation einer Veränderung des Lieferantenportfolios und die Auswirkungen auf die Beschaffungsposition des Händlers können also anhand des Modells vorgenommen werden.

Durch entsprechende Anpassungen der Inputdaten können bei der Hinzunahme eines neuen Kunden analoge Schlussfolgerungen aus den neu berechneten Ergebnissen gezogen werden. Die Auswirkungen von Bestellpreis- und Nachfrageänderungen können anhand geänderter Inputdaten und anschließender Simulation der Transport- und Bestellkosten dargestellt und als Informationen in die Planungsaufgaben der Unternehmung einfließen. So kann beispielsweise zur Absicherung der Einhaltung des Servicegrades bei verstärkter Kundennachfrage eine höhere Minimalabnahmemenge mit verschiedenen Lieferanten vereinbart werden.

Die Simulation von Änderungen in der Kunden- und Lieferantenstruktur sowie der erwarteten Abnahmepreise und -mengen können ein hilfreiches Instrument zur Beschaffungsplanung im Flüssiggashandel darstellen. Die Ergebnisse sind hierbei jedoch einerseits stark von der Qualität der einfließenden Prognosen abhängig und andererseits werden Unsicherheiten des unternehmerischen Umfeldes vernachlässigt, d. h. in der Praxis persistent auftretende Schwankungen der Nachfrage oder der Transportwege und -kosten finden keine Berücksichtigung in der vorgeschlagenen Modellierung und können so nicht in die Diskussion der Beschaffungsposition des Händlers einfließen.

Im Rahmen der Verhandlungen mit einem spezifischen Lieferanten kann ebenfalls eine Interpretation der Modellergebnisse als Hilfestellung genutzt werden. In den Vertragsverhandlungen werden monatliche Preise und Mengen für ein Jahr festgelegt. Im Kontrast zu diesem langen Zeitraum steht der kurze, meist eintägige Verhandlungsprozess, so dass die Entscheidungsunterstützung der vorgeschlagenen Modellierung an dieser Stelle von besonderer Relevanz ist. Die modellimmanente Entscheidungsunterstützung kann mit Hilfe einer Ceteris-Paribus-Betrachtung aller anderen Lieferanten und Kunden dargestellt werden. Hierbei werden die Mengenrestriktionen für den betrachteten Lieferanten relaxiert, indem die Minimalab-

nahmemenge auf 0 gesetzt und die Maximalabnahmemengen auf unendlich festgelegt werden. Die Bestellpreise werden dann für diesen Lieferanten in kleinen Schritten variiert und das Model jeweils neu berechnet. Diese Betrachtung führt zu einer lieferantenindividuellen Funktion der Bestellmengen in Abhängigkeit von den Bestellpreisen (Preis-Bestellmengen-Funktion), die graphisch dargestellt werden kann. Anhand dieser können Aussagen bezüglich der folgenden Aspekte getroffen werden:

- Die strategische Relevanz des Lieferanten zur Befriedigung der Kundennachfrage wird durch die Form der Preis-Bestellmengen-Funktion ersichtlich.
- Die aus Sicht des Händlers optimale Preis-Mengen-Kombination kann bestimmt und so die Preisfestlegung quantitativ unterstützt werden.
- Die Auswirkungen einer Veränderung des Abnahmepreises bzw. der Abnahmemenge kann in Bezug auf die Gesamtkosten abgebildet werden und stärkt hierdurch die Informationslage und damit die Verhandlungsposition des Planers.
- Spezifische Vertragsparameter wie Minimal- und Maximalabnahmemengen können anhand einer Abweichungsanalyse festgesetzt werden.

Aussagen bezüglich der Relevanz des Lieferanten können anhand der Form der Preis-Bestellmengen-Funktion formuliert werden. Hierbei wird der Anstieg sowie die (durch die für die Untersuchung gewählten maximalen und minimalen Bestellpreise festgelegten) Anfangs- und Endpunkte der Funktion analysiert. In Abbildung 9 ist exemplarisch die *Preis-Bestellmengen-Funktion* für einen Lieferanten dargestellt.

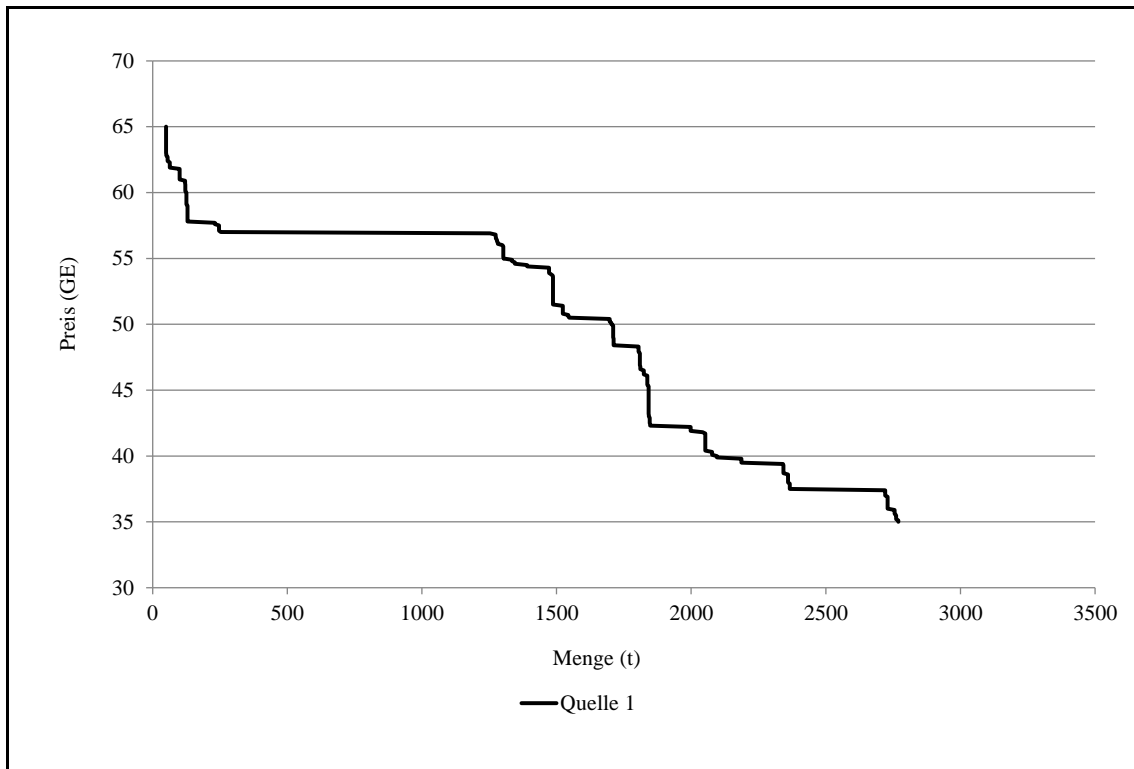


Abbildung 9: Preis-Bestimmungenfunktion für einen gewählten Lieferanten

Für das Preisspektrum von 35 bis 65 GE kann diese wie folgt interpretiert werden: für einen hohen Preis von 65 GE wird die Realisation einer geringen Menge (100 t) und für den sehr geringen Preis von 35 GE die Abnahme von 2800 t vorgeschlagen. Die für den Händler optimale Abnahmemenge des betrachteten Lieferanten ist demnach stark von dem verhandelten Preis abhängig. Sie weist eine hohe Preiselastizität auf, ein Sachverhalt, der auch durch den vergleichsweise schwachen Anstieg der Funktion deutlich wird.

In Relation zu anderen Lieferanten kann diesem Lieferanten eine durchschnittliche Relevanz für die Befriedigung der Kundennachfrage zugesprochen werden. In Abbildung 10 wird dieser Sachverhalt deutlich. Der dargestellte Lieferant 16 wird nur bei sehr geringen Preisen in den optimalen Abnahmeplan integriert, er geht daher mit einer nur geringen Relevanz einher. Im Gegensatz hierzu spiegelt die Funktion von Lieferant 3 eine hohe Relevanz des Lieferanten wider. Von diesem Lieferanten werden in nur geringer Preisabhängigkeit eine ähnliche Menge (zwischen 700 und 1400 t) abgenommen, d. h., dass auf diesen Lieferanten selbst bei hohen Preisen nicht verzichtet werden kann. Diese geringe Preiselastizität kann beispiels-

weise in der günstigen geographischen Position zu einem Kundenkreis begründet sein, der nur zu hohen Kosten von einem anderen Lieferanten beliefert werden kann.

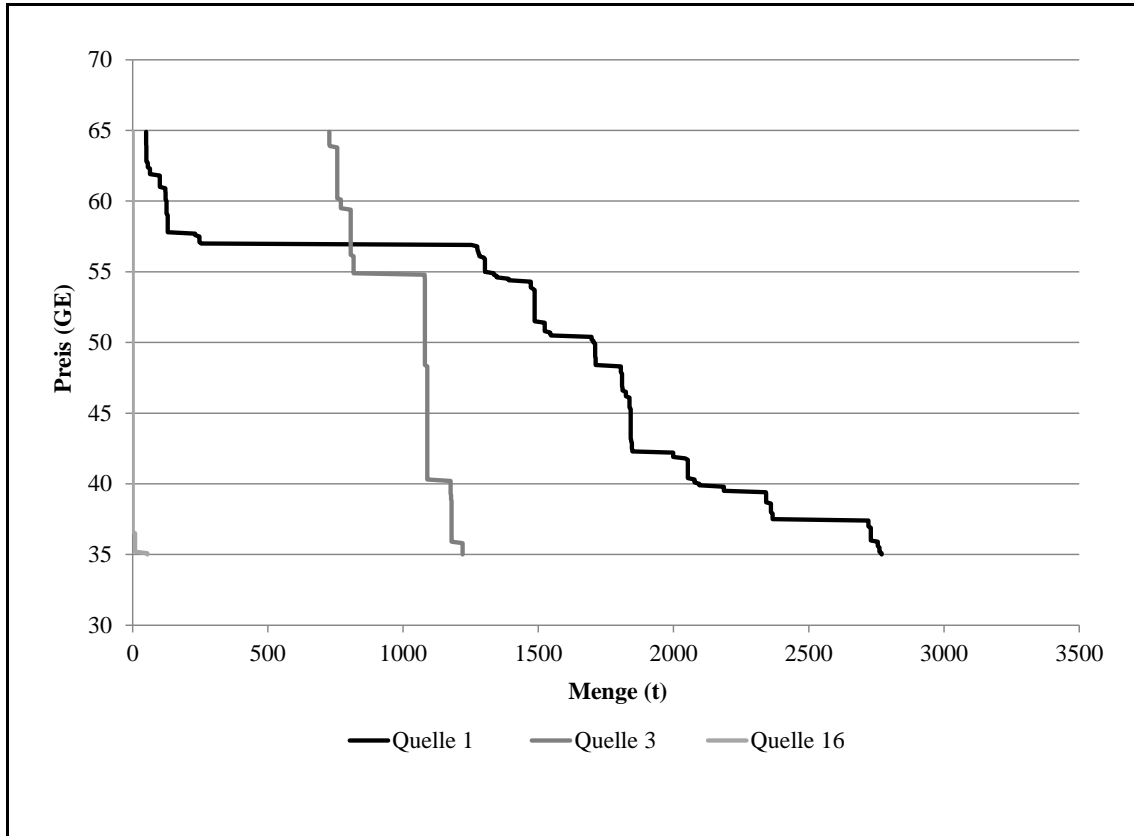


Abbildung 10: Vergleich unterschiedlicher Preis-Bestellmengen-Funktionen

Nachdem die Bedeutung des Lieferanten für die Nachfragebefriedigung verdeutlicht wurde, können die spezifischen Preisverhandlungen durch eine detaillierte Interpretation der Preis-Bestellmengen-Funktion unterstützt werden. Hierfür lässt sich für jeden Preis die abzunehmende Menge ablesen. Für den Lieferanten 1 wäre beispielsweise ein Preisnachlass von 54 GE auf 53 GE verhandelbar, da dann eine höhere Abnahmemenge optimal wäre und dem Händler die Abnahme von Mengen entlang der zur Abszisse parallelen Linie nicht mehr offen stünde. Über die zweidimensionale Darstellung hinaus kann eine Funktion, die gleichzeitig die Gesamtkosten in Abhängigkeit der lieferantenindividuellen Preisen und Mengen darstellt, weitere Informationen zur Verhandlungsunterstützung liefern. In Abbildung 11 ist diese Funktion für den Lieferanten 1 dargestellt.

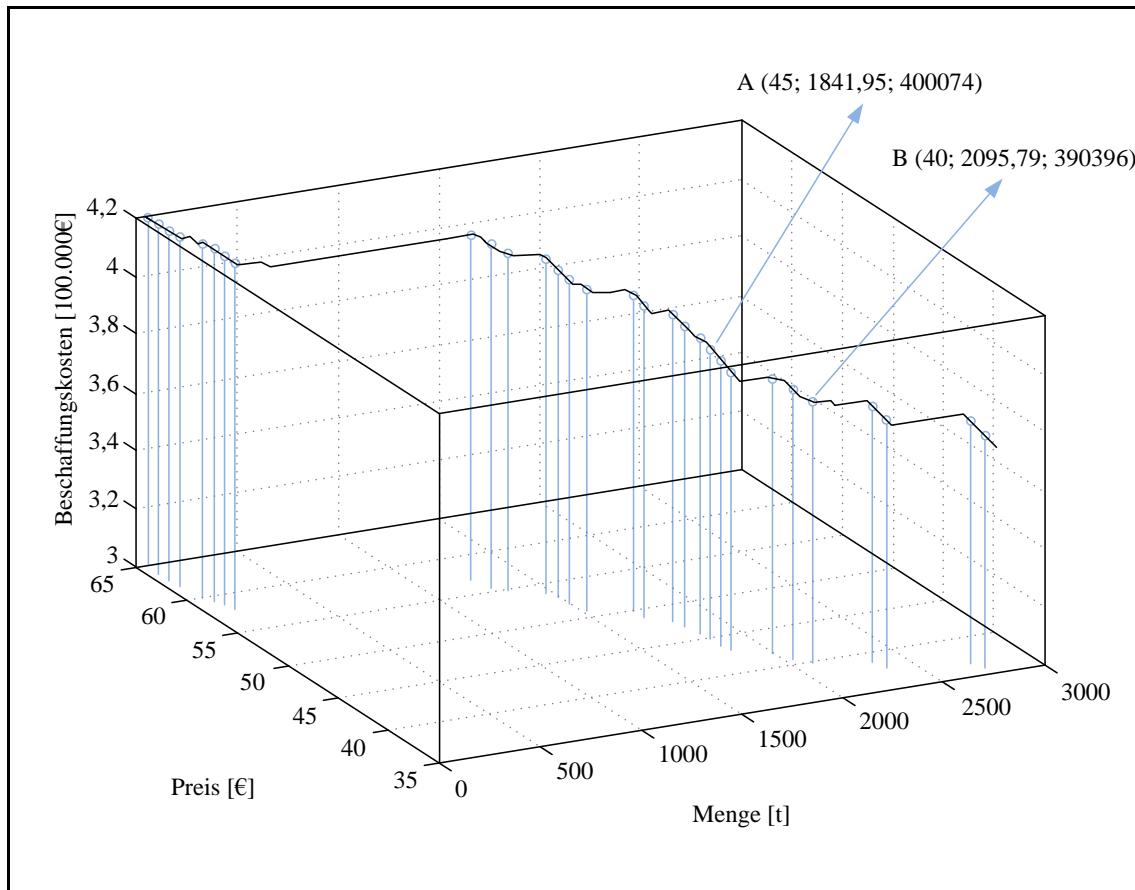


Abbildung 11: Darstellung der Gesamtkosten in Abhängigkeit der Mengen und Preise

Spezifische Vertragsparameter wie optimale Minimal- oder Maximalabnahmemengen können anhand mehrerer Preis-Bestellmengen-Funktionen aus den Berechnungen des vorgeschlagenen Modells extrahiert und interpretiert werden. Hierfür werden Bedarfsschwankungen quantifiziert und Preis-Bestellmengenfunktionen für die kleinsten und größten angenommenen Bedarfsänderungen berechnet. Minimal- und Maximalabnahmemengen können dann anhand des dargestellten Funktionsspektrums in Abhängigkeit eines Preises abgelesen werden. Abbildung 12 stellt eine solche Schar von Preis-Bestellmengen-Funktionen für Bedarfsschwankungen von zehn Prozent dar.

Die dargestellten Ansätze zur Nutzung des vorgeschlagenen Modells zur Entscheidungsunterstützung in der Beschaffungsplanung auf der taktischen Ebene können die Verhandlungen mit den Lieferanten unterstützen. Die Modellierung weist ein theoretisches Fundament auf und kann schnell zu guten Ergebnissen führen. Mittelfristig kann die Umsetzung der abgeleite-

ten Handlungsempfehlungen zu einer Reduzierung der Gesamtkosten bei gleichem Servicegrad führen.

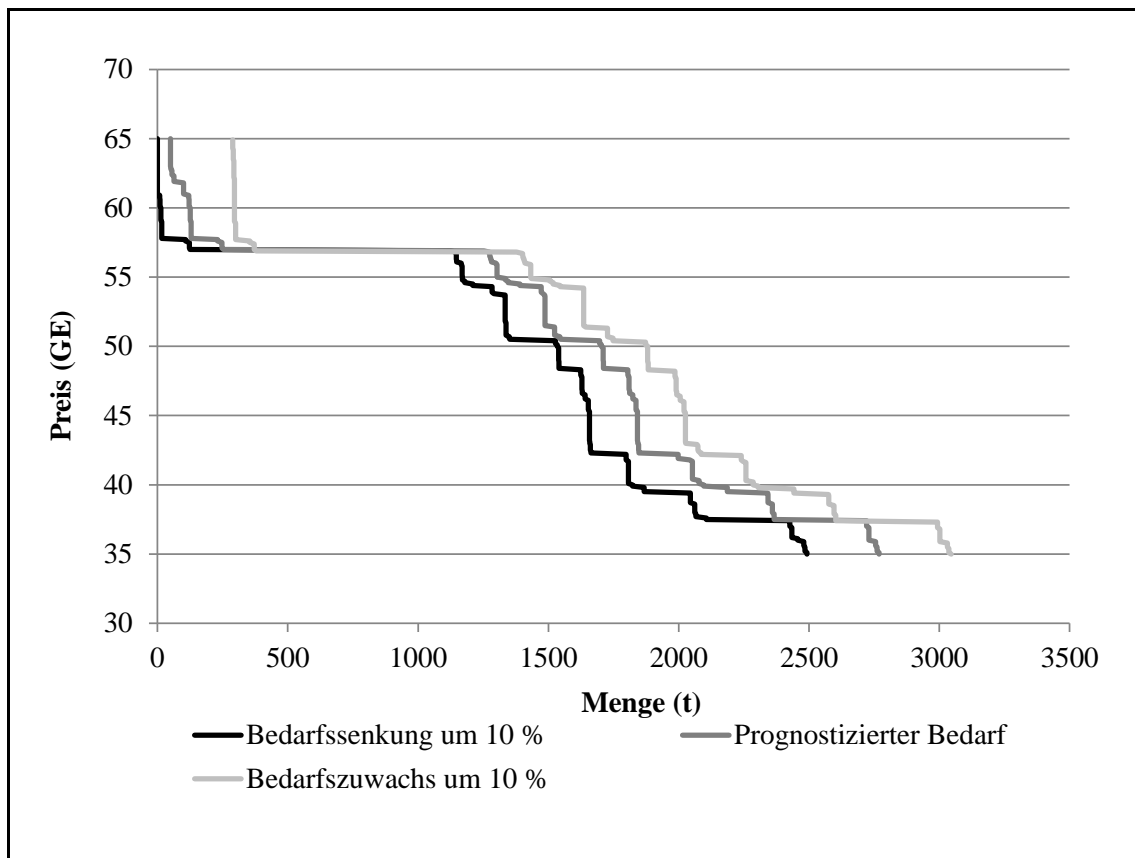


Abbildung 12: Preis-Bestellmengenfunktionen zur Verhandlung von Minimal- und Maximalabnahmemengen

Hierbei ist jedoch zu beachten, dass auch hier die praxisrelevanten Unsicherheiten der Daten, insbesondere bezüglich der Kundennachfragen und des Transportkostensatzes, nicht in die Betrachtung einbezogen werden¹⁾. Die hiermit einhergehenden Anforderungen wie die Abbildung der Risikoeinstellung des Planers und die Quantifizierung des Trade-Offs zwischen Liefersicherheit und Kosten wurden bisher ebenfalls vernachlässigt. Daher gehen die dargestellten Simulationen bisher mit nur geringer Aussagekraft einher. Zur Eignung des Modells bei unsicherer Datenlage müssen die Ergebnisse zufälligen Umwelteinflüssen gegenüber unempfindlich sein. Dies kann über eine adäquate Abbildung der Unsicherheiten in der Modellierung

1) Zu in der Praxis auftretenden Unsicherheiten vgl. z. B. Scholl (2001, S. 7 ff.); Werners/Thorn (2002, S. 51).

3 Grundmodell zur distributionsbasierten Beschaffungsplanung

ermöglicht werden und somit die Eignung der Modellierung für praktische Problemstellungen optimieren.

4 Erweiterung des Grundmodells um die Berücksichtigung von Unsicherheiten

4.1 Ansätze zur Abbildung der Unsicherheit

Die bisherigen Überlegungen gehen davon aus, dass alle Informationen über das Entscheidungsfeld vorliegen, so dass der Eintritt bestimmter Umweltzustände sicher ist (deterministische Situation). Liegen hingegen nicht alle Informationen vor, so dass der Eintritt bestimmter Zustände nicht eindeutig vorausgesagt werden kann, wird dies als Unsicherheit bezeichnet¹⁾. Entscheidungstheoretisch liegt dabei ein geschlossenes Entscheidungsfeld zu Grunde, d. h., dass die vom Planer beeinflussbaren oder extern gegebenen Komponenten (Alternativen, Umweltzustände, Wirkungszusammenhänge und Ergebnismatrizen) mit Sicherheit bekannt sind²⁾. Adam resümiert, dass damit „Sicherheit über das Ausmaß der Unsicherheit herrscht“³⁾. Die Überwindung von eventuellen unscharfen oder unvollständigen Daten (eines offenen Entscheidungsfeldes) muss demnach vor der Nutzung entscheidungstheoretischer Methoden erfolgen⁴⁾. Die Situation der Unsicherheit lässt sich differenzierend auf der Grundlage des Kriteriums der *Bekanntheit der Eintrittswahrscheinlichkeiten* in

- Risiko (im Falle bekannter Eintrittswahrscheinlichkeiten) und
- Ungewissheit (im Falle fehlender Informationen über die Eintrittswahrscheinlichkeiten)

1) Zu unterschiedlichen Abgrenzungen der Unsicherheit vgl. Birge/Louveaux (2011, S. 49); Klein/Scholl (2011, S. 43); Adam (1996, S. 5), Sahinidis (2004, S. 971)).

2) Vgl. Klein/Scholl (2011, S. 43).

3) Adam (1996, S. 225).

4) Vgl. Klein/Scholl (2011, S. 44).

unterteilen¹⁾. Hierbei wird die Risikoeinstellung des Planers, d. h. die subjektive Überzeugung über die Vor- bzw. Nachteilhaftigkeit der möglichen Ergebnisse in Bezug auf die Unsicherheit, zu einem zentralen Element der Entscheidungsfindung. In der Literatur werden drei Typen der Risikoeinstellung unterschieden²⁾:

- *Risikofreude* ist dadurch charakterisiert, dass die Möglichkeit zur Erreichung von Ergebnissen, die im Vergleich zu einem Referenzpunkt günstiger sind (Chancen), höher beurteilt wird als die Möglichkeit, unerwünschte Ergebnisse (Risiken) zu vermeiden. Eine Handlungsalternative würde demnach von einem risikofreudigen Planer nach ihrem günstigsten Ergebnis beurteilt werden.
- *Risikoindifferenz* ist gegeben, wenn Handlungsalternativen durch alleinige Betrachtung erwarteter (durchschnittlicher) Ergebnisse ausgewählt werden, ohne den Spielraum der Parameter zu bewerten.
- *Risikoaversion* weist eine höhere Wertschätzung der Vermeidung einer negativen Abweichung gegenüber der Chance auf eine positive Abweichung vom Referenzpunkt auf. Ein risikoaverser Entscheider beurteilt eine Handlungsalternative demnach nach ihrem ungünstigsten (Worst-Case-) Ergebnis.

Neben diesen drei Risikoeinstellungen kann innerhalb des entstehenden Spektrums auch ein Grad der Risikoaversion bzw. -freude des Planers ausgedrückt werden³⁾.

Vor diesem Hintergrund ist das dargestellte Grundmodell zu erweitern. Dabei ist es von zentralem Interesse, wie mit unsicheren Daten umgegan-

-
- 1) Vgl. Knight (1921, S. 11), der die Unterscheidung zwischen Unsicherheit und Risiko (als messbare Unsicherheit) einführte. Vgl. zu dieser Einteilung weiterhin Bamberg/Coenenberg/Krapp (2012, S. 20); Klein/Scholl (2011, S. 44); Rosenhead/Elton/Gupta (1972, S. 415); Entscheidungen unter Ungewissheit werden in der Literatur auch als Entscheidung unter Ignoranz bezeichnet (vgl. z. B. Comès/Hiete/Schultmann (2013, S. 36)).
 - 2) Vgl. Gebhard (2009, S. 27); Scholl (2001, S. 51), wobei Risikofreude, Risikosympathie und Risikoaffinität sowie Risikoaversion und Risikoscheu synonym Verwendung finden.
 - 3) Zur Quantifizierung des Grades der Risikoaversion bzw. -freude kann auf das Arrow-Pratt-Maß zurückgegriffen werden (vgl. Arrow (1970, S. 90 ff.)).

gen werden soll¹⁾. Dabei ist die Eignung einer Vorgehensweise von dem behandelten Entscheidungsproblem und der Risikoeinstellung des Planers abhängig. Folglich stellt sich ein Auswahlproblem, das durch die Balance zwischen Planungsaufwand und Planungsergebnis determiniert wird und entscheidenden Einfluss auf die Qualität, Struktur und Praktikabilität der Lösung des Entscheidungsproblems ausübt.

In der Literatur²⁾ wird im Rahmen des Umgangs mit Unsicherheit zwischen einwertigen (meist reaktiven) und mehrwertigen (meist proaktiven) Vorgehensweisen unterschieden, die im Folgenden näher betrachtet werden.

4.1.1 Einwertige Abbildung der Unsicherheit

Bei der einwertigen Abbildung von Unsicherheiten wird eine Substitution der unsicheren Parameter durch deterministische Werte vorgenommen³⁾, wobei verschiedene Werte zur Überführung der unsicheren in die deterministischen Parameter genutzt werden können⁴⁾:

- Bei Erstellung eines deterministischen Erwartungswertmodells werden statistische Kenngrößen zur Einschätzung der Verteilung (z. B. Erwartungswerte oder andere prognostizierte Werte) der unsicheren Parameter genutzt.
- Das deterministische Korrekturmodell lässt einen (für jeden Parameter prozentual ausgedrückten) Risikoauf- oder -abschlag zu, d. h. es handelt sich um eine indirekte Abbildung der Risikoeinstellung.
- Bei ausgeprägter Risikoaversion kann ein deterministisches Worst-Case-Modell aufgestellt werden, bei dem für jeden Parameter der ungünstigste Wert gewählt wird.

Die Menge der in Betracht gezogenen Szenarien reduziert sich dann auf ein Szenario, wodurch die Entscheidung unter Unsicherheit in eine Entschei-

1) Vgl. Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995, S. 264).

2) Vgl. z. B. Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995, S. 264) zur Einteilung in reaktive (postoptimale) und proaktive Verfahren und Klein/Scholl (2011, S. 406) zur ein- bzw. mehrwertigen Einordnung der Verfahren.

3) Hierdurch werden gleichzeitig Wirkungs- und Bewertungsdefekte (vgl. z. B. Adam (1996, S. 10 ff.)) ausgeräumt.

4) Vgl. Gebhard (2009, S. 28); Kall/Wallace (1994, S. 122), Scholl (2001, S. 186 ff.).

dung unter (vermeintlicher) Sicherheit überführt wird. Diese Vorgehensweise ist mit einer Verminderung des Prognostizierungs- und Berechnungsaufwandes verbunden. Gleichzeitig können jedoch Chancen und Risiken der Lösung sowie die Risikoeinstellung des Planers nicht direkt einbezogen werden, sondern sie werden über Risikoaufschläge bzw. Risikoabschläge (vom Erwartungswert bei Risikoaversion bzw. -freude) berücksichtigt¹⁾. Risikoaufschläge werden von risikoaversen Planern etwa im Sinne eines Puffers bei der Angabe der zu erfüllenden Kundenbedarfe genutzt²⁾. Sie haben damit Präventivcharakter. Die Überführung in ein deterministisches Entscheidungsproblem wird daher auch als proaktive Vorgehensweise zum Umgang mit Unsicherheit bezeichnet³⁾, die mit erheblichen Informations- und Lösungsqualitätsverlusten verbunden ist⁴⁾. Es ist daher notwendig und zweckmäßig, die Effekte dieser Informationsverluste zu analysieren und die Ergebnisse dieser Analysen in die Entscheidungsunterstützung einfließen zu lassen. In der Regel gelangt dabei die Sensitivitäts- und die Risikoanalyse zum Einsatz.

4.1.1.1 Sensitivitätsanalyse

Im Rahmen einer *Sensitivitätsanalyse* der optimalen Lösung lassen sich die Auswirkungen der Substitution unsicherer Daten auf Basis der mit Hilfe eines deterministischen Modells erzeugten Ergebnisse aufzeigen. Formal wird dabei ermittelt, in welchem Ausmaß ein oder mehrere Parameter variieren dürfen, ohne dass eine Änderung der Struktur (Wechsel der Basisvariablen) oder des Zielfunktionswertes der optimalen Lösung herbeigeführt wird⁵⁾.

-
- 1) Vgl. Klein/Scholl (2011, S. 406); Scholl (2001, S. 188 ff.). Es sei darauf hingewiesen, dass eine starke Risikoaversion durch die Berechnung eines Worst-Case-Szenarios abgebildet werden kann. Diese Lösung wird jedoch bei den meisten praktischen Problemen mit prohibitiv hohen Kosten einhergehen und ist daher ungeeignet.
 - 2) Vgl. Koh/Saad/Jones (2002, S. 2418).
 - 3) Vgl. Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995, S. 264).
 - 4) Vgl. u. a. Friedrich (2007, S. 24 ff.).
 - 5) Vgl. Dinkelbach (1969, S. 25).

Die unsicheren Parameter können an verschiedenen Positionen eines Modells verortet sein¹⁾:

- Bei Unsicherheiten in der Zielfunktion kann das Intervall bestimmt werden, indem die zu untersuchenden Parameter bei gegebener Optimalität der betrachteten Lösung variiert werden können.
- Im Falle unsicherer Parameter auf der rechten Seite der Restriktionen können die Intervalle der Parametervariation berechnet werden, in denen die betrachtete Lösung zulässig bleibt.
- Liegen Unsicherheiten in der Koeffizientenmatrix (der linken Seite) der Restriktionen vor, dann können Parametervariationen zum Verlust der Optimalität sowie der Zulässigkeit der betrachteten Lösung führen.

Vor diesem Hintergrund kann bei Empfindlichkeit der Lösung gegenüber Parametervariationen eine erneute Optimierung mit veränderten (die unsicheren Daten substituierenden) Parameterwerten in Betracht gezogen werden.

In der Literatur gelangt die Sensitivitätsanalyse für Modelle zum Einsatz, die auf eine zu dieser Arbeit ähnliche Problemstellung fokussieren²⁾. Glassermann und Tayur (1995) nutzen die Sensitivitätsanalyse zur Berechnung und Steuerung von komplexen Produktions- und Distributionssystemen. Dieses Vorgehen setzt jedoch die differenzierte Berechnung der eingehenden Parameter voraus und löst somit nicht die zugrundeliegende Problemstellung. Bopp et al. (1996) bzw. Ma/Zhang (2008) führen eine Sensitivitätsanalyse der Nachfragemengen im Anschluss an die Lösung ihres Optimierungsmodells für die Beschaffungsplanung im Erdgashandel bzw. die Supply Chain Konfiguration durch. Dieser Ansatz verdeutlicht den Nutzen als postoptimales Analyseinstrument. Er gibt ebenfalls keine Empfehlung der Sensitivitätsanalyse als alleinige Methode zur Integration der Unsicherheit in die Modellierung.

1) Vgl. Scholl (2001, S. 189).

2) Zu Übersichtsarbeiten zur Sensitivitätsanalyse in der Entscheidungstheorie vgl. Dinkelbach (1969, S. 25 ff.); Evans (1984, S. 239 ff.); Hiple/Wallace (2003, S. 53 ff.); Rios Insua/French (1991, S. 176 ff.).

Die Expost-Vorgehensweise der Sensitivitätsanalyse lässt zwar eine Einschätzung der unterschiedlichen Datenvariation bei gleichbleibender Lösung zu, sie bietet jedoch keine Möglichkeit zur Steuerung dieser Variationsintervalle. Gleichzeitig wird eine Vielzahl von Informationen vernachlässigt und nicht in die angestrebte Entscheidungsunterstützung einbezogen. Die Sensitivitätsanalyse eignet sich zwar zur Beschreibung der Stabilität einer Lösung, jedoch stellt sie keine eigenständige Optimierungsmethode unter Unsicherheit dar¹⁾.

4.1.1.2 Risikoanalyse

Eine weitere einwertige Methode des Umgangs mit Unsicherheit ist die *Risikoanalyse*²⁾. Sie untersucht die Verteilungsfunktionen für die von unsicheren Parametern abhängenden Ergebnisgrößen (sogenannte Risikoprofile)³⁾. So kann das mit einer Entscheidung einhergehende Risiko mit Hilfe von Simulationen und Zufallszahlen abgebildet und zur Entscheidungsunterstützung genutzt werden. In der Literatur wird dabei zwischen der Wait-and-see-Stufe (Herausögern der Entscheidungen) und der Here-and-now-Stufe (Entscheidungen werden vor der Realisation der Zufallsvariablen getroffen) unterschieden⁴⁾, wobei die Eignung der Risikoanalyse nur für die erstgenannte Modellklasse erkannt wird⁵⁾. Sie liefert also eine Abschätzung und Gegenüberstellung von unsichereren Inputinformationen und den daraus resultierenden Ergebnissen und kann somit der Entscheidungsunterstützung dienen. In Abhängigkeit von der Anzahl unsicherer Parameter wird die Analyse jedoch komplex und unübersichtlich, so dass eine künstliche Reduktion vorgenommen werden muss⁶⁾. Dies hat zur Folge, dass einerseits der Berechnungsaufwand und andererseits die Ergebnisqualität stark sinkt. Damit kann auch die Risikoanalyse nicht als alleinige Vorgehensweise zum

1) Vgl. u. a. Scholl (2001, S. 192).

2) Die Begriff der Risikoanalyse geht auf Hertz (1964, S. 95) zurück und wird häufig in Zusammenhang mit Investitions- und Finanzierungsentscheidungen genutzt (vgl. z. B. Bertel/Fenies/Roux (2008, S. 440 ff.); Guillen/Badell/Puigjaner (2007, S. 288 ff.)).

3) Vgl. Adam (1996, S. 264).

4) Vgl. Dantzig (1955, S. 197); Kall/Mayer (2005, S. 75 ff.).

5) Vgl. Scholl (2001, S. 195).

6) Vgl. Kruschwitz (1980, S. 803); Adam (1996, S. 276).

Umgang mit Unsicherheiten in komplexen Planungsproblemen genutzt werden.

In der Literatur¹⁾ wird darauf verwiesen, dass die Nutzung von Vorgehensweisen der einwertigen Berücksichtigung der Unsicherheit zu sehr ungünstigen Entscheidungen führen kann. Hier können Phänomene wie eine für alle realistischen Szenarien unzulässige Lösung oder große Fehlerbandbreiten auftreten. Gleichzeitig kann die Risikoeinstellung des Planers nur indirekt Berücksichtigung finden. Diese Nachteile überwiegen den Vorteil der Aufwands- und Komplexitätsreduktion. Zur Entscheidungsunterstützung bei Unsicherheit wird daher die Nutzung mehrwertiger Methoden empfohlen.

4.1.2 Mehrwertige Abbildung der Unsicherheit

Bei den Vorgehensweisen zur mehrwertigen Unsicherheitsberücksichtigung werden die unsicheren Parameter explizit in die Modellierung des Entscheidungsproblems integriert. Hierbei wird die Abbildung über Szenarien oder Zufallszahlen genutzt, so dass die zur Verfügung stehenden Informationen genutzt werden. Die Risikoeinstellung des Planers kann ausdrücklich über die Zielfunktion in dem entsprechenden Modell abgebildet werden. Zu den mehrwertigen, sogenannten proaktiven Vorgehensweisen zählen die stochastische und die hierauf aufbauende robuste Optimierung.

4.1.2.1 Stochastische Optimierung

Wenn die unsicheren Modellparameter durch mehrwertige Informationen repräsentiert werden und diese in ein Modell einfließen, wird dieses Modell als *stochastisches Optimierungsmodell* bezeichnet. Diese unsicheren Parameter können in der Zielfunktion (unsicherer Bewertungszusammenhänge) oder in den Nebenbedingungen (unsichere Wirkungszusammenhänge) angesiedelt sein. Dies bedeutet, dass im Vergleich zu deterministischen Modellen weder die Optimalität noch die Zulässigkeit einer Lösung als sicher betrachtet werden können²⁾.

1) Vgl. z. B. Bartmann (1984, S. 188); Birge (1982, S. 314); Gebhard (2009, S. 29); Klein/Scholl (2011, S. 189); Kouvelis/Yu (1997, S. 3); Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995, S. 278).

2) Vgl. Birge/Louveaux (2011, S. 3 ff.); Marti (2008, S. 3 ff.); Scholl (2001, S. 70 ff.).

Ein stochastisches Optimierungsmodell zielt darauf ab, eine für jedes Szenario zulässige Lösung zu finden, die mit einem jeweils maximalen Ziel-funktionswert einhergeht (perfekte Lösung). Dies ist jedoch nur selten in praktischen Problemstellungen zu realisieren, ein Sachverhalt, der zur Formulierung unterschiedlicher Ersatzmodelle führte¹⁾:

- Zulässigkeitsstabile Modelle (Fat Solution Models) betrachten ausschließlich Handlungsalternativen, die für jedes Szenario zulässig sind. Dies kann jedoch zu einer leeren oder sehr kleinen Lösungsmenge führen.
- Deterministische Ersatzwertmodelle ersetzen die unsicheren Parameter durch deterministische Werte²⁾.
- Modelle mit Wahrscheinlichkeitsrestriktionen (Chance-Constrained-Models) verzichten auf die strikte Einhaltung von Nebenbedingungen und fordern nur eine zu bestimmende Zulässigkeitswahrscheinlichkeit für jede (separiertes Chance-Constrained-Modell) oder sämtliche (simultanes Chance-Constrained Modell) Nebenbedingungen³⁾.
- Kompensationsmodelle (Recourse Models) nutzen die Möglichkeit des Ausgleichs von ungünstigen Situationen durch gezielte Maßnahmen (z. B. Überstunden, Werbeaktivitäten), die dann nach Eintritt der Umweltsituation zum Einsatz gelangen. Die eventuell anfallenden Kosten für diese (Eventual-)Pläne werden bei der Entscheidung berücksichtigt.
- Kompensationsmodelle mit Wahrscheinlichkeitsrestriktionen als Kombination der zwei letztgenannten können eingesetzt werden, falls nur ein Teil der Restriktionsverletzungen kompensiert werden kann.

In Abhängigkeit von der (indirekt abgebildeten) Risikoeinstellung des Planers, des Informationsstandes und des Berechnungsaufwandes kann das

1) Vgl. Abel (1984, S. 32 ff.); Sahinidis (2004, S. 974 ff.); Scholl (2001, S. 75 ff.).

2) Vgl. Charnes/Kirby (1957, S. 183) sowie die Ausführungen zu den Modellierungsmöglichkeiten deterministischer Ersatzwertmodelle in Kapitel 4.1.1.

3) Vgl. Charnes/Cooper (1959, S. 73); Kall/Mayer (2005, S. 93). So kann etwa ein Servicegrad bei der Nachfrageerfüllung als Nebenbedingung, die durch die gefundene Lösung mindestens zu einer bestimmten Wahrscheinlichkeit erfüllt wird, abgebildet werden. Dieser Servicegrad kann gleichzeitig Aufschluss über die Risikoeinstellung des Entscheiders geben.

geeignete Ersatzmodell für eine spezifische Problemstellung ausgewählt werden¹⁾.

Den Vorteilen des expliziten Umgangs mit Unsicherheiten der stochastischen Entscheidungsmodelle stehen einige Nachteile gegenüber²⁾:

- Bei der Lösung eines stochastischen Optimierungsmodells kann nicht in jedem Fall eine für alle Szenarien zulässige Lösung gefunden werden, was zu einem unlösbaren Modell führt.
- Stochastische Modelle nutzen darüber hinaus keine Strafterme, die die Risikoeinstellung des Planers abbilden, und
- lassen auch keine Aussagen über die Stabilität bzw. die Robustheit der Lösung zu.

Da diese jedoch für praktische Problemstellungen von besonderer Relevanz sind, wurden stochastische Modelle weiterentwickelt und mit Modellen der Mehrzieloptimierung zu robusten Optimierungsmodellen kombiniert³⁾.

4.1.2.2 Robuste Optimierung

Unter Robustheit wird die Widerstandsfähigkeit bzw. Unempfindlichkeit eines ermittelten Ergebnisses gegenüber zufälligen Umwelteinflüssen verstanden⁴⁾. Ein Plan wird also als robust bezeichnet, wenn er für jede mögliche Umweltlage mit guten bzw. akzeptablen Ergebnissen bezüglich der verfolgten Ziele einhergeht⁵⁾. Es wird damit eine suboptimale Lösung ak-

1) Für die Anwendung der stochastischen Optimierung in praktischen Problemstellungen vgl. z. B. die Ausführungen von Szwarc (1964, S. 33 ff.) und Witten/Zimmermann (1978, S. 58) zum Transportproblem mit stochastischer Nachfrage, Bertazzi/Cherubini (2013, S. 3 ff.) zu einem Lager- und Transportsystem mit stochastischer Nachfrage sowie Mula et al. (2006, S. 271 ff.) und Wang/Liang (2005, S. 328 ff.) zur stochastischen Supply Chain Optimierung.

2) Zu weiteren formalen und modelltheoretischen Nachteilen der stochastischen Optimierung im Vergleich zur robusten Optimierung vgl. z. B. Escudero et al. (1993, S. 311 ff.); Kall/Wallace (1994, S. 7 ff.); Scholl (2001, S. 205 ff.).

3) Vgl. Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995, S. 264 ff.). Die robuste Optimierung kann somit auch als Generalisierung der stochastischen Optimierung bezeichnet werden.

4) Vgl. Klibi/Martel/Guitouni (2010, S. 290); Schneeweiß (1992, S. 157); Scholl (2001, S. 93).

5) Vgl. Sungur (2009, S. 4); Roy (1998, S. 156); Zäpfel (1998, S. 702).

zeptiert, die die Eigenschaft der Robustheit aufweist¹⁾. Das Ziel der *robusten Optimierung* ist daher eine Entscheidung, die für alle Szenarien möglichst günstige Ergebnisse erzielt. Dabei steht nicht die optimale Entscheidung für ein Szenario im Vordergrund, sondern die robuste Optimierung entstand aus dem Ziel, die in der Praxis auftretende Risikoaversion in die Optimierung einzubeziehen. Abbildung 13 stellt diesen Sachverhalt am Beispiel der entstehenden Kosten in Abhängigkeit von der unsicheren Nachfragemenge eines Kunden dar. Deterministische Ansätze führen zu einem (wenig robusten) optimalen Plan für einen deterministischen (Erwartungs-)Wert, wogegen ein robuster Ansatz höhere, aber nah am Optimum liegende Kosten berechnet, die jedoch für eine größeres Spektrum an möglichen Realisationen des unsicheren Parameters gültig bleiben²⁾.

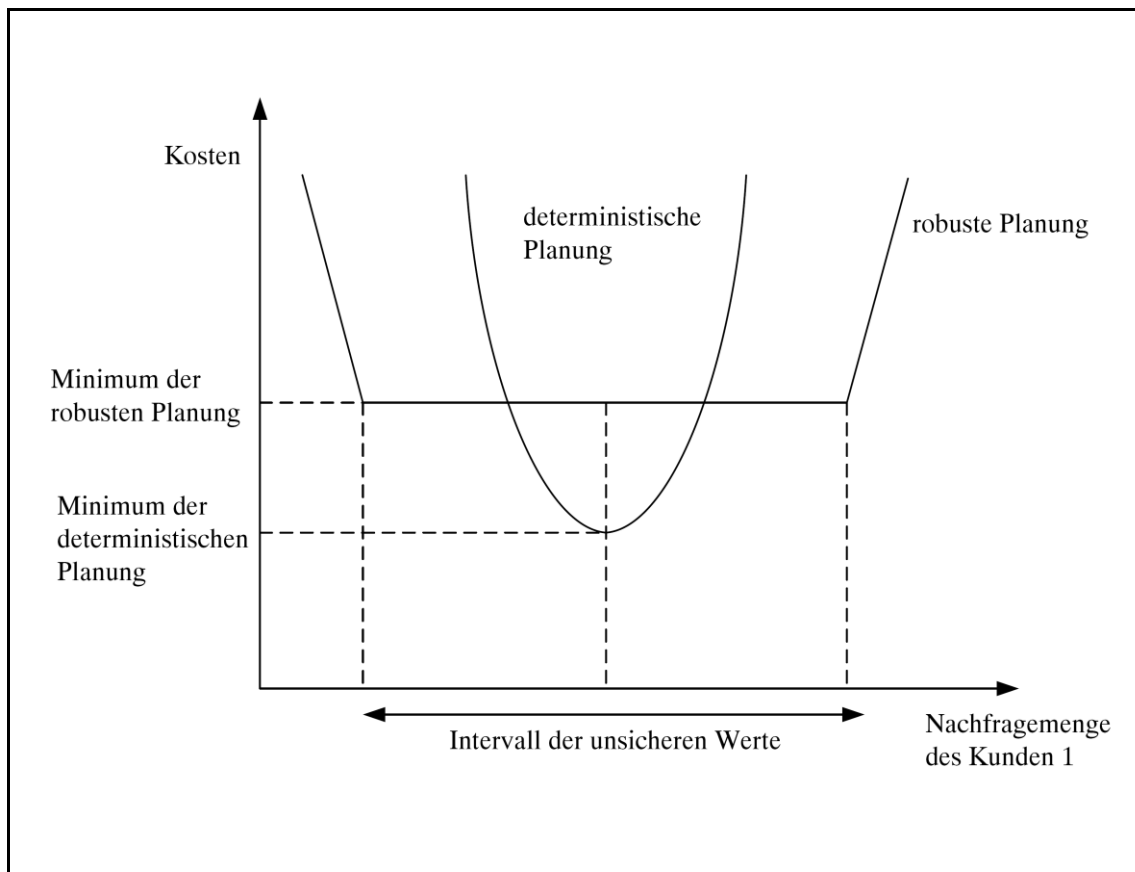


Abbildung 13: Vorgehensweise der robusten Optimierung

- 1) Vgl. Bertsimas/Sim (2004, S. 35); Rosenhead/Elton/Gupta (1972, S. 413).
- 2) Vgl. Van Landeghem/Vanmaele (2002, S. 773). In diesem Zusammenhang beschreibt Roy (1998, S. 156 f.), dass die robuste Optimierung somit in reziproker Beziehung zur Sensitivitätsanalyse steht.

Die Grundidee der robusten Optimierung schließt verwandte betriebswirtschaftliche Konzepte (Stabilität, Nervosität, Flexibilität, Elastizität und Optimalität) ein¹⁾, so dass für eine präzise Definition eine Abgrenzung der Termini vorzunehmen ist²⁾.

- *Stabilität* beschreibt die Eigenschaft des geringen Änderungsbedarfs eines Plans im Zeitablauf. Dieser Änderungsbedarf kann auf präziseren Informationen oder der Unzulässigkeit von Maßnahmen in bestimmten Umweltbedingungen basieren. Ein stabiler Plan ist somit vorwiegend unabhängig von der eintretenden Umweltlage und erreicht damit in jedem Fall ein hohes Maß an Optimalität. Der Plan kann dann als robust bezeichnet werden.
- Die *Flexibilität* bezeichnet die Fähigkeit eines Plans zur Anpassung an sich verändernde Umweltbedingungen. Sie wird über das Aktionsvolumen und die Reagibilität des Plans ausgedrückt. Wenn die Flexibilität für weitgehend alle Umweltlagen vorhanden ist, kann von einem robusten Plan ausgegangen werden.
- Die *Elastizität* bildet die grundsätzliche Fähigkeit eines Plans ab, Anpassungsmaßnahmen vorzunehmen, ohne diese ökonomisch zu bewerten. Sie bildet damit einen Teilaspekt der Flexibilität. So können Pläne als robust bezeichnet werden, die bei unzureichender Stabilität eine ausreichende Elastizität (bei akzeptabler Abweichung von der Optimalität) aufweisen.
- *Nervosität* eines Planes entsteht bei der Notwendigkeit erheblicher Änderungen im Zeitablauf oder häufigen Änderungen von Entscheidungen. Dies tritt insbesondere bei der Nutzung der Flexibilitätspotentiale auf und führt zur Instabilität der vorhandenen Pläne und damit zu einem geringeren Robustheitsgrad.
- Die *Optimalität* eines Plans drückt aus, dass der Plan im Vergleich zu anderen Plänen das höchste Zielerreichungsmaß in jeder eintretenden Umweltlage erreicht. In realistischen Planungssituationen führt diese

1) Scholl (2001, S. 116) weist darauf hin, dass die robuste Planung kein grundsätzlich neues Planungskonzept ist, sondern auf Entscheidungssituationen mit den erwähnten Anforderungen abzielt.

2) Vgl. Scholl (2001, S. 94 ff.) und zu einer ausführlichen Abgrenzung auf Basis der dynamischen Systemtheorie Schneeweiß/Kühn (1990, S. 378 ff.).

Eigenschaft dazu, dass ein möglichst hohes Maß an Optimalität angestrebt wird, da sog. perfekte Pläne nicht gefunden werden können. Ist dieses für jede Umweltlage gesichert, wird der Plan als robust bezeichnet.

Die Betrachtungen lassen die Schlussfolgerung zu, dass ein robuster Plan Stabilität und Flexibilität aufweist. Der optimale Flexibilitäts- bzw. Stabilitätsgrad ist dabei ein Entscheidungsproblem, das in hohem Maße von der Problemstellung abhängig ist¹⁾. Abbildung 14 verdeutlicht die beschriebenen Zusammenhänge der Begriffe, wobei der Einfluss der einzelnen Eigenschaften über die positiven bzw. negativen Pfeilmarkierungen dargestellt wird.

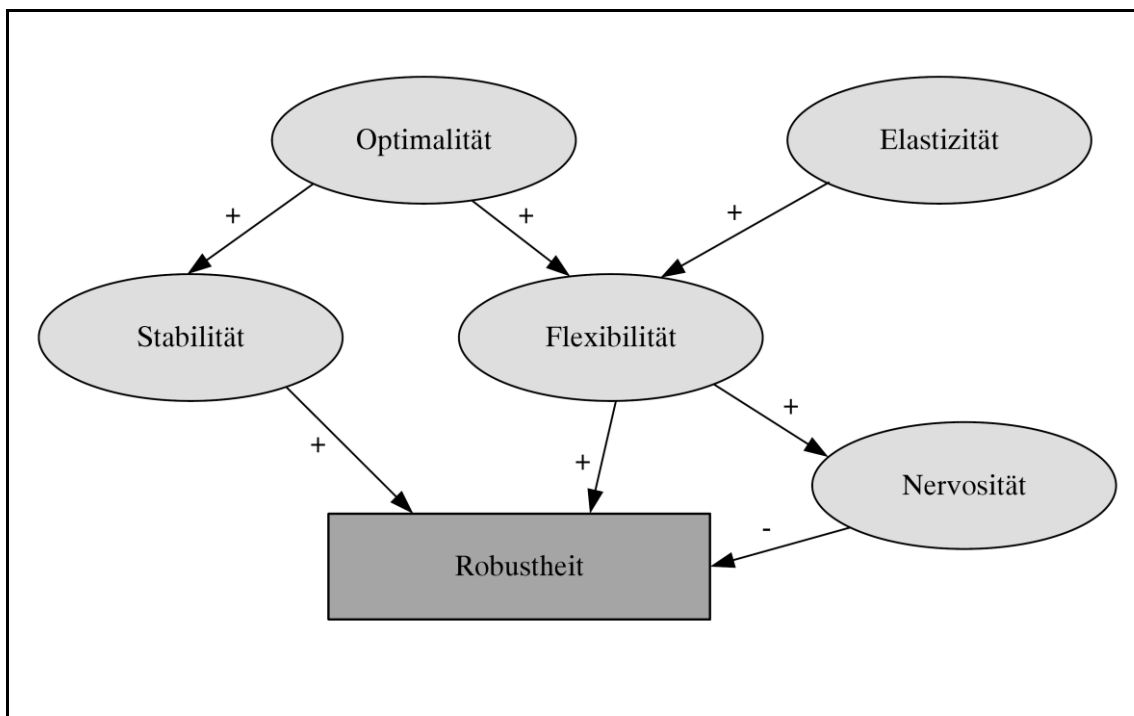


Abbildung 14: Beziehung der Robustheit zu verwandten Termini²⁾

Nach diesen grundlegenden Überlegungen soll auf die Vorgehensweise zur Formulierung robuster Modelle eingegangen werden.

1) Vgl. Eversheim/Schaefer (1980, S. 229); Mandelbaum/Buzacott (1990, S. 17 ff.); Meffert (1985, S. 121); Scholl (2001, S. 98).

2) Vgl. Scholl (2001, S. 98 ff.).

Ziel der robusten Optimierung ist es, einen Plan zu erstellen, der unabhängig von der eintretenden Umweltlage mit möglichst geringen Anpassungen gute Ergebnisse liefert¹⁾. Hierfür können sämtliche Modellierungsmethoden der Entscheidungsfindung unter Unsicherheit genutzt werden, die die Risikoeinstellung des Planers abbilden²⁾ und Szenarien zur Abbildung der Unsicherheit verwenden. Die robuste Optimierung kombiniert dabei die Vorteile der stochastischen Optimierung mit der Mehrzieloptimierung³⁾. Dazu werden diese in den Ersatzzielfunktionen der robusten Optimierung abgebildet, wobei dann auf die erwähnten Kompensationsmodelle und Modelle mit Wahrscheinlichkeitsrestriktionen zurückgegriffen werden kann.

Bei der Formulierung der Ersatzzielfunktionen kann im Gegensatz zur stochastischen Optimierung nicht nur das Erwartungswert-Kriterium zugrunde gelegt werden, sondern auch andere aus der Entscheidungstheorie bekannte Kriterien. An dieser Stelle soll auf eine ausführliche Darlegung der Vorgehensweise der Kriterien verzichtet werden⁴⁾ und nur auf die spezifischen Vorteile für die robuste Optimierung eingegangen werden. Bei bekannten Eintrittswahrscheinlichkeiten kommen die folgenden Kriterien in Betracht:

- Das (μ, σ) -Kriterium nimmt eine weiterführende Risikoberücksichtigung vor.
- Bei unzuverlässiger Information über die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Szenarien kann das Hodges-Lehmann-Kriterium angewandt werden.
- Durch quantilbasierte Kriterien wie das Fraktil- und das Aspirations-Kriterium wird ein möglichst günstiger Zielfunktionswert mit einer vorgegebenen Satisfizierungswahrscheinlichkeit bzw. einem vorgegebenen Satisfizierungsniveaus erreicht, wodurch die Risikoeinstellung abgebildet und variiert werden kann.

1) Vgl. Gebhard (2009, S. 50).

2) Die robuste Optimierung entstand aus dem Ziel der Berücksichtigung starker Risikoaversion, kann aber auch für alle Grade von Risikoaversion und Risikofreude alteriert werden.

3) Vgl. Vladimirov/Zenios (1997, S. 12.16 ff.).

4) Vgl. hierzu z. B. Klein/Scholl (2011, S. 415 ff.).

4 Erweiterung des Grundmodells um die Berücksichtigung von Unsicherheiten

- Zusätzlich können Regret-Kriterien verwendet werden, die die Abweichungen vom Optimalwert eines Szenarios in die Auswahl einbeziehen.

Bei Entscheidungen unter Ungewissheit können folgende Kriterien angewandt werden, da sie die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Szenarien in ihrer Betrachtung vernachlässigen:

- Risikoaverse Kriterien wie das Maximin- bzw. das Minimax-Kriterium sichern ein Mindestmaß des Zielfunktionswertes ab und können so risikoaverse Entscheidungen unterstützen.
- Das Laplace-Kriterium stellt bei unbekanntem Eintrittswahrscheinlichkeiten das Gegenstück zum Erwartungswert-Kriterium dar und kann so der robusten Optimierung dienen.
- Über einen die Risikoeinstellung abbildenden Optimismusparameter kann mit dem Hurwicz-Kriterium alle Szenarien in die Betrachtung integriert werden.
- Die auf der Regretmatrix basierenden absoluten (Savage-Niehans-) und relativen Minimax-Regret-Kriterien spiegeln eine risikoaverse Einstellung des Planers wider und führen zu Lösungen, die vergleichsweise nahe am Optimum liegen. Dieser Unterschied zu den Maximin- bzw. Minimax-Kriterien kann ein für die robuste Optimierung wünschenswertes Charakteristikum darstellen.

Nachdem die Ersatzzielfunktion ausgewählt wurde und die Restriktionen entsprechend des gewählten Vorgehens modelliert wurden, kann die robuste Lösung des Entscheidungsproblems berechnet und zur Entscheidungsunterstützung verwendet werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die robuste Optimierung mit den folgenden Vorteilen einhergeht:

- Im Gegensatz zur stochastischen Optimierung kann bei der Lösung eines robusten Optimierungsmodells eine zulässige Lösung gefunden werden, da durch Strafterme eine (möglichst geringe) Verletzung der Nebenbedingungen zugelassen wird¹⁾.

1) Vgl. Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995, S. 270).

- Robuste Optimierungsmodelle lassen eine direkte Abbildung der RisikoEinstellung des Planers zu.
- Darüber hinaus wird die für praktische Problemstellungen relevante Stabilität bzw. Robustheit der Lösung in den Fokus der Modellierung gerückt und somit Interpretation und Abwägung der Ergebnisse unterstützt.

Sie bietet somit die Möglichkeit einer Entscheidungsunterstützung für die vorliegende Problemstellung¹⁾.

4.2 Konzeption eines robusten Modells für die distributionsbasierte Beschaffungsplanung

Um eine adäquate Erweiterung des Grundmodells zur distributionsorientierten Beschaffungsplanung in ein robustes Optimierungsmodell zu formulieren, soll eine detaillierte Erarbeitung von Robustheitskriterien und eine Klassifikation der in der Literatur vertretenen Ansätze vorgenommen werden.

4.2.1 Kriterien zur Messung der Robustheit

Die Definition der *Robustheit* als Unempfindlichkeit gegenüber zufälligen Umwelteinflüssen ist allgemein gefasst und lässt Möglichkeiten zur Operationalisierung und Beurteilung offen. Daher soll auf die verschiedenen Aspekte der Robustheit detailliert eingegangen und die für die Problemstellung relevanten Kriterien abgeleitet werden, wobei (zur Vereinfachung der Beschreibung) von einem Maximierungsziel ausgegangen wird. Die Robustheitskriterien stehen teilweise in engem Zusammenhang²⁾, können aber abhängig vom Fokus des Plans separat betrachtet werden. Abbildung 15 gibt die betrachteten Robustheitskriterien und deren (möglichen) Zusammenhang wieder³⁾.

1) In der Literatur wird in diesem Zusammenhang auch die besondere Eignung der robusten Optimierung für taktische Problemstellungen betont (vgl. z. B. Van Landeghem/Vanmaele (2002, S. 774)).

2) Es sei bemerkt, dass es sich nicht um überschneidungsfreie Kriterien handelt.

3) Vgl. Scholl (2001, S. 98 ff.).

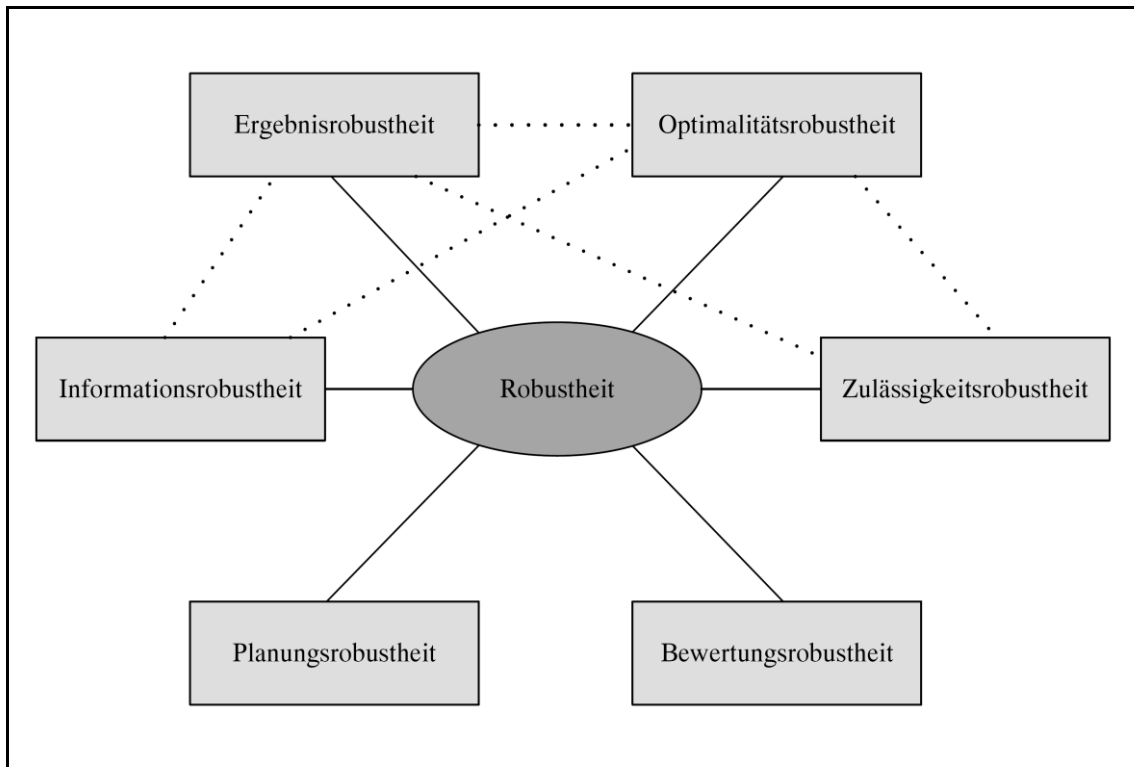


Abbildung 15: Robustheitskriterien und deren Zusammenhang¹⁾

Wenn ein Plan für sämtliche Szenarien zulässig ist bzw. nur geringe Anpassungen erforderlich sind, kann dieser als total bzw. relativ *zulässigkeitsrobust* bezeichnet werden. Dabei ist zu beachten, dass die vorzunehmenden Anpassungen nicht zu einer erheblichen Verschlechterung des Zielfunktionswertes führen dürfen, da der Plan in diesem Fall nicht mehr als robust gelten kann.

Die *Ergebnisrobustheit* beschreibt den durch einen Plan für alle Umweltlagen erzielbaren Zielfunktionswert. Ausgehend von dem entstehenden Zielkonflikt bei der gleichzeitigen Optimierung mehrerer Szenarien wird die Ergebnisrobustheit eines Planes durch das Erreichen (oder Überschreiten) eines Anspruchsniveaus für jedes Szenario ausgedrückt. Wird das Anspruchsniveau nur mit geringen (keinen) Abweichungen unterschritten, kann von einer relativen (totalen) Ergebnisrobustheit gesprochen werden.

1) Vgl. Scholl (2001, S. 98 ff.). In der einschlägigen Literatur finden sich auch die Bezeichnungen *model robustness* für die Optimalitätsrobustheit und *solution robustness* für die Zulässigkeitsrobustheit (vgl. Kouvelis/Yu (1997, S. 7); Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995, S. 264)).

Die *Optimalitätsrobustheit* eines Plans wird dadurch charakterisiert, dass seine Ergebnisse für jedes Szenario nicht oder möglichst wenig von dem szenariooptimalen Wert abweichen. Diese Abweichung kann auch als Regretwert interpretiert werden. Der Fall nur kleiner (keiner) Abweichungen vom Szenariooptimum wird als relativ (total) optimalitätsrobust bezeichnet. Hierbei ist zu betonen, dass ein kleiner Erwartungswert der Regretwerte auf eine relativ ergebnisrobuste Lösung hinweist. Somit wird der Zusammenhang zwischen Ergebnis- und Optimalitätsrobustheit hergestellt, wobei bei erstere allein auf die Zielfunktionswerthöhe fokussiert und letztere auf die relative Güte der Ergebnisse im Szenariovergleich abstellt.

Das Kriterium der *Informationsrobustheit* bezieht sich auf die Güte und den Umfang des Informationsstandes zum Zeitpunkt der Planerstellung. Ein informationsrobuster Plan enthält günstige Ergebnisse auch für die Szenarien, die während der Planung absehbar waren, jedoch unzureichend einbezogen wurden. Hierzu zählen auch Szenarien deren Informationsbeschaffung (mit hohem Aufwand) möglich wäre.

Unter Berücksichtigung der Dynamik eines Plans wird dieser dann als *planungsrobust* bezeichnet, wenn (vorläufig) getroffene Entscheidungen nicht mehr durch Folgeentscheidungen verändert werden müssen. Relative Planungsrobustheit trifft bei Plänen zu, die nur in geringem Umfang Änderungen am Ausgangsplan vornehmen müssen, wobei auch diese Änderungen keine erheblichen Verschlechterungen des Zielfunktionswertes verursachen dürfen.

Da sich die Bewertungsansätze eines Planers nicht immer eindeutig ermitteln lassen, kann von einer unscharfen Information über die Präferenzen und Zielgewichte des Planers ausgegangen werden. Daher wird ein Plan als *bewertungsrobust* bezeichnet, der unempfindlich gegenüber solchen unscharfen subjektiven Einschätzungen ist.

Die dargestellten Kriterien können in Abhängigkeit von der Problemstellung den Fokus auf verschiedene Aspekte der Robustheit eines Plans legen¹⁾. Für die vorliegende Problemstellung wird einerseits auf die Optimalitätsrobustheit abgestellt, um dem zentralen Ziel der Senkung die Beschaf-

1) Vgl. z. B. Rosenhead/Elton/Gupta (1972, S. 430) zur Auswahl geeigneter Kriterien.

fungs- und Transportkosten gerecht zu werden. Andererseits ist die Zulässigkeitsrobustheit abzubilden, um Lösungen zu finden, die mit einer möglichst vollständigen Erfüllung der Kundenbedarfe einhergehen. Demgegenüber kann die (mit der Optimalitätsrobustheit verwandte) Ergebnisrobustheit aufgrund der nicht benötigten Schrankenfestlegung vernachlässigt werden. Gleichzeitig wird von dem Kriterium der Informationsrobustheit abgesehen, da die Szenarien größtenteils bekannt sind und ein Fokus auf die Modellierung der Informationsrobustheit für die Planer in Bezug auf die vorliegende Problemstellung nicht von Relevanz ist. Durch die Planung von nur einer Periode kann außerdem auf das Kriterium der Planungsrobustheit verzichtet werden. Es ist demnach zielführend, die Optimalitätsrobustheit und die Zulässigkeitsrobustheit als alleinige Kriterien zur Einschätzung der Robustheit der Lösung des vorliegenden Entscheidungsproblems zu wählen.

4.2.2 Klassifikation der Ansätze zur robusten Optimierung

Nachdem die Robustheitskriterien konkretisiert wurden, ist in einem nächsten Schritt die Vorgehensweise zur Formulierung des robusten Modells zur Beschaffungsplanung darzustellen. Dafür konnten die folgenden Anforderungen an ein robustes Modell zur Entscheidungsunterstützung in der distributionsbasierten Beschaffungsplanung aus Expertengesprächen abgeleitet werden:

- Die individuelle Risikoeinstellung des Planers soll explizit in der Modellierung abgebildet werden können.
- Weiterhin soll ein Trade-Off zwischen den Kriterien der Optimalitäts- und Zulässigkeitsrobustheit (d. h. von entstehenden Kosten und Lieferzuverlässigkeit) im Vergleich der Ergebnisse darstellbar und quantifizierbar sein¹⁾. Hierbei ist zu beachten, dass geringe Abweichungen von der Zulässigkeit in der Praxis oftmals (z. B. durch Swap-Verträge mit Konkurrenten oder persönlichen Kundenabsprachen) ausgeglichen werden können.

1) Vgl. Van Landeghem/Vanmaele (2002, S. 774) im Zusammenhang mit der robusten Optimierung und Derigs (1980, S. 109 ff.), der zur Lösung eines Transportproblems mit mehrfacher Zielsetzung eine Zeit/Kosten-Trade-Off-Kurve vorschlägt.

Diese Anforderungen sollen bei dem als Ausgangspunkt für die Modellierung gewählten Ansatz erfüllt werden.

Auf der Grundlage des Kriteriums *Angenommene Verteilung der Eintrittswahrscheinlichkeiten* können die in der Literatur vertretenen Ansätze zur robusten Optimierung wie in Tabelle 2 dargestellt klassifiziert werden¹⁾:

		Ausgewählte Ansätze zur robusten Optimierung
Angenommene Verteilung der Eintrittswahrscheinlichkeiten	Keine	Kouvelis/Kurawarwala/Gutiérrez (1992, S. 290 ff.); Yu/Kouvelis (1993, S. 504 ff.); Gutiérrez/Kouvelis (1995, S. 168 ff.); Daniels/Kouvelis (1995, S. 364 ff.)
	Stetig	Ben-Tal/Nemirovski (2000, S. 413 ff. und 2002, S. 456 ff.); Bertsimas/Sim (2004, S. 41 ff.); Soyster (1973, S. 1154 ff.); Bertsimas/Thiele (2006, S. 155 ff.)
	Diskret	Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995, S. 270 ff.); Dembo (1991, S. 65 ff.); Yu/Li (2000, S. 386 ff.); Bai/Carpenter/Mulvey (1997, S. 896 ff.); Wu (2006, S. 852 ff.); Leung et al. (2007, S. 226 ff.); Kanyalkar/Adil (2010, S. 638 ff.); Hahn/Kuhn (2012, S. 139 ff.)

Tabelle 2: Systematisierung der Ansätze zur robusten Optimierung

Der *Verzicht* auf die Nutzung von Eintrittswahrscheinlichkeiten beruht auf der Zielsetzung des Planers, den Plan gegenüber ungünstigen Entwicklungen abzusichern. Daher wird in dieser ersten Klasse der Ansätze zur robusten Optimierung das risikoaverse, dem Worst-Case-Szenario ähnliche Mi-

1) Vgl. Badel/Corsten/Wolff (2013, S. 788). Für eine alternative Gliederung der Ansätze nach den berücksichtigten Robustheitskriterien vgl. Freiwald (2005, S. 135 ff.).

nimax-Regret-Kriterium als Entscheidungsmaß verwendet. Die Ansätze dieser Klasse beruhen auf der ersten Veröffentlichung von Kouvelis/Kurawarwala/Gutiérrez¹⁾ und können keine von Aversion verschiedenen Grade der Risikoeinstellung des Planers abbilden. Gleichzeitig werden Informationen über die Eintrittswahrscheinlichkeiten vernachlässigt. Demnach sind sie für die vorliegende Problemstellung nicht geeignet.

Die zweite Klasse der robusten Optimierungsmodelle, die eine *stetige* Verteilung der stochastischen Parameter annimmt, nutzt eine Intervallbildung. Dies führt dazu, dass die Eintrittswahrscheinlichkeiten der möglichen Szenarien „null“ sind. Diese Ansätze fokussieren auf die Zulässigkeitsrobustheit, wobei das Spektrum von vollständig risikoaversen Worst-Case-Ansätzen, die bei Verzicht auf Optimalität die Zulässigkeit für alle Szenarien einfordern²⁾, bis zu weniger risikoaversen Ansätzen, die die Zulässigkeitsrobustheit zu Gunsten der Optimalitätsrobustheit nur verringern³⁾, reicht. Den Ansätzen dieser Klasse ist gemein, dass sie entweder nur einen stochastischen Parameter für jede Nebenbedingung zulassen oder keine Möglichkeit zur Abbildung der individuellen Risikoeinstellung des Planers enthalten. Darüber hinaus ist die Anwendung von Szenarien der Beschreibung durch Verteilungsfunktionen in taktischen und strategischen Problemstellungen überlegen, da nur eine unzureichende Anzahl an Vergangenheitsdaten zur Verfügung steht, um eine adäquate Verteilungsfunktion zu berechnen⁴⁾. Aus diesen Gründen sind sie nicht für die vorliegende Problemstellung geeignet.

Zeitgleich zu den aufgeführten Modellen ohne Eintrittswahrscheinlichkeiten wurde die auf Mulvey, Vanderbei und Zenios zurückgehende Klasse von Ansätzen entwickelt, die eine *diskrete* Verteilung für die unsicheren Parameter annehmen⁵⁾. Diese Klasse kann aufgrund zweier Kriterien in Unterklassen gegliedert werden, die die folgenden Aspekte in den Vorder-

1) Vgl. Kouvelis/Kurawarwala/Gutiérrez (1992, S. 289 ff.).

2) Vgl. Soyster (1973, S. 1154 ff.), der die Modellierung über konvexe Mengen, in denen alle Lösungen zulässig sind, vornimmt.

3) Vgl. z. B. Ben-Tal/Nemirovski (2000, S. 413 ff.); Bertsimas/Sim (2004, S. 38 ff.).

4) Vgl. Birge/Louveaux (2011, S. 61).

5) Vgl. Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995, S. 270 ff.).

grund rücken: die *zugrundeliegende Modellstruktur* sowie die *Gewährleistung der Zulässigkeit der Lösung*.

Nach dem Kriterium der *zugrundeliegenden Modellstruktur* können zwei Unterklassen geformt werden:

- In der ersten Unterklasse wird eine Zerlegung des Optimierungsmodells in eine Design- und eine Kontrollkomponente vorgenommen¹⁾. Hierbei wird durch die (deterministische) Designkomponente die grundsätzliche (szenariounabhängige) Lösungsstruktur festgelegt, die nach Eintritt eines Szenarios nicht mehr verändert werden kann (Here-and-Now-Entscheidung). Die (stochastische) Kontrollkomponente hingegen ermöglicht Kompensationsentscheidungen nach Eintritt eines Szenarios (Wait-and-See-Entscheidung). Die vollständige Lösung aus beiden Komponenten liegt somit erst mit dem Eintritt eines Szenarios fest. Die Annahme, dass die Stochastizität nur in der Kontrollkomponente enthalten ist, ist in praktischen Problemstellungen nur selten einzuhalten.
- Die zweite Unterklasse umfasst Ansätze, die auf diese Zerlegung verzichten und auf eine für alle Szenarien identische Lösung vor Eintritt eines Szenarios abzielen²⁾.

Weiterhin können die folgenden Unterklassen auf Grundlage des Kriteriums der *Gewährleistung der Zulässigkeit* einer generierten Lösung, d. h. in welcher Form mit der Verletzung von Restriktionen umgegangen wird, gebildet werden:

- In einer ersten Unterklasse werden Nebenbedingungsverletzungen abgebildet, indem die Zielfunktion um einen weiteren Term ergänzt wird³⁾. Dies kann einerseits zu unzulässigen Lösungen führen, birgt jedoch gleichzeitig den Vorteil, dass die Starrheit der generierten Lösung abnimmt. Etwaige Nebenbedingungsverletzungen gehen in dieser Unterklasse mit einem Trade-Off zwischen Optimalität und Zulässigkeit einher, der auf verschiedenen Wegen genutzt werden kann:

1) Vgl. z. B. Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995, S. 265 ff.); Scholl (2001, S. 174 f.).

2) Vgl. z. B. Yu/Li (2000, S. 387 ff.); Dembo (1991, S. 64 ff.).

3) Vgl. z. B. Dembo (1991, S. 65 ff.); Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995, S. 271 ff.); Yu/Li (2000, S. 388 ff.).

- Durch die Verwendung von regretbasierten Kriterien kann das Verhältnis von Optimalität und Zulässigkeit einer Lösung festgelegt werden¹⁾. Hierbei kann jedoch im Optimierungsmodell keine individuelle Risikoeinstellung des Planers abgebildet werden.
 - Diese Abbildung der Risikoeinstellung wird durch die Einführung von Gewichtungsfaktoren möglich, die die Beeinflussung der Bedeutung der beiden Kriterien Optimalität und Zulässigkeit sen²⁾.
- Die zweite betrachtete Unterklasse verbietet Nebenbedingungsverletzungen und rückt die Zulässigkeit in den Fokus³⁾. Die entstehenden Lösungen sind vollständig zulässigkeitsrobust, aber äußerst starr. Diese Zulässigkeitsrobustheit kann in vielen Fällen zum Verlust der Optimalitätsrobustheit führen.

Vor dem Hintergrund der dargestellten Überlegungen zur Klasse der robusten Optimierungsansätze mit diskreten Eintrittswahrscheinlichkeiten der Szenarien lassen sich hinsichtlich der Eignung für die vorliegende Problemstellung folgende Schlussfolgerungen ziehen. Zunächst sind die Ansätze auszuschließen, die die Teilung in eine Design- und eine Kontrollkomponente vornehmen. Dies ist in der Tatsache begründet, dass die zu modellierende Designkomponente in der vorliegenden Problemstellung keine Entscheidungsvariable beinhalten würde⁴⁾ und somit keine Problemstruktur vor Eintritt eines Szenarios aufgebaut werden könnte. Weiterhin sind Ansätze, die Nebenbedingungsverletzungen ausschließen für die vorliegende Problemstellung als ungeeignet einzustufen, weil so kein Trade-Off zwischen Optimalität und Zulässigkeit abgebildet und zur Entscheidungsunterstützung genutzt werden kann. Gleichzeitig ist nur durch die Einführung von Gewichtungsfaktoren eine Integration der individuellen Risikoeinstellung des Planers realisierbar.

1) Vgl. z. B. Dembo (1991, S. 65 ff.).

2) Vgl. z. B. Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995, S. 272 ff.); Yu/Li (2000, S. 387 ff.).

3) Vgl. z. B. Kouvelis/Yu (1997, S. 8 ff.).

4) Vgl. Gupta/Maranas (2003, S. 1219), in deren Modell die Produktionsentscheidungen als Designvariablen festgelegt sind, wodurch kaum Freiheitsgrade für die als Kontrollvariablen modellierten Transportentscheidungen zur Verfügung stehen. Diese Vorgehensweise führte die Modellierung für die vorliegende Fragestellung ad absurdum.

Diese Überlegungen unterstreichen die besondere Eignung des von Yu/Li¹⁾ formulierten Ansatzes, der auf der von Mulvey/Vanderbei/Zenios²⁾ in die Literatur eingeführten Modellierung aufbaut. Der Ansatz lässt Nebenbedingungsverletzungen und die Gewichtung der Robustheitskriterien zu, während auf eine Zerlegung in Design- und Kontrollkomponente verzichtet wird. Die Idee dieses Ansatzes soll daher für die vorliegende Problemstellung angepasst und erweitert werden und somit die Grundlage für die Modellierung des robusten Modells zur distributionsbasierten Beschaffungsplanung bilden.

4.3 Modellierung des robusten Modells für die distributionsbasierte Beschaffungsplanung

Das robuste Modell für die vorliegende Problemstellung soll den Anforderungen genügen, möglichst optimalitäts- sowie zulässigkeitsrobuste Lösungen zu generieren und die Risikoeinstellung des Planers explizit abzubilden. Bei Zugrundelegung und Erweiterung des Ansatzes von Yu/Li³⁾ kann ein robustes Modell formuliert werden, das diesen Anforderungen Rechnung trägt.

Mit dem Ziel der Abbildung des Kriteriums der *Optimalitätsrobustheit* wird für jedes Szenario die Abweichung der szenariooptimalen Lösung von dem berechneten Erwartungswertes der Lösung eines Szenarios untersucht. Diese Abweichungen werden mit ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit gewichtet über alle Szenarien kumuliert und bilden einen ersten Teil der Zielfunktion des robusten Modells:

$$Z_{Opt} = \sum_{s=1}^S p_s \cdot |K_s - K_s^*|$$

Die optimalen Gesamtkosten für ein Szenario werden hierbei durch Berechnung des deterministischen Grundmodells ermittelt.

1) Vgl. Yu/Li (2000, S. 390 ff.).

2) Vgl. Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995, S. 266 ff.).

3) Vgl. Yu/Li (2000, S. 390 ff.).

Das Kriterium der *Zulässigkeitsrobustheit* wird über die mengenmäßige Betrachtung der in der Lösung enthaltenen Bedarfsbedingungsverletzungen implementiert. Diese werden über die Differenz der zu einem Kunden in einer Periode gelieferten Menge und dessen Nachfrage in dieser Periode berechnet. Die Differenzen über alle Szenarien und alle Perioden werden mit der entsprechenden Eintrittswahrscheinlichkeit multipliziert und gehen als ein zweiter Teil in die Zielfunktion ein:

$$Z_{Zul} = \sum_{s=1}^S p_s \cdot \left| \sum_{t=1}^h \left(\sum_{i=1}^{2n} x_{ijt} - b_{jst} \right) \right|$$

Die Risikoeinstellung des Planers wird mit Hilfe von Gewichtungsfaktoren berücksichtigt, die das vollständige Spektrum der Risikoeinstellungsmöglichkeiten abbilden können:

- Die Bedeutung der Optimalitätsrobustheit wird über den Gewichtungsfaktor λ erfasst. Je höher dieser gewählt wird, desto mehr liegt die Optimalitätsrobustheit im Fokus der Betrachtung und desto mehr wird Risikofreude des Planers unterstellt.
- Die Bedeutung der Zulässigkeitsrobustheit wird über den Gewichtungsfaktor ω_{jst} gesteuert. Dieser Faktor kann für jeden Kunden j in jedem Szenario s und in jeder Periode t individuell festgelegt werden. Durch die Erhöhung dieses Faktors rückt die Zulässigkeitsrobustheit in den Mittelpunkt der Optimierung und bildet eine risikoaverse Einstellung des Planers ab.

Unter Berücksichtigung der Anforderungen der Problemstellung an die robuste Modellierung kann damit die folgende Zielfunktion (3.1) aufgestellt werden, die sich aus dem gewichteten Term für die Optimalitätsrobustheit und aus dem gewichteten Term der Zulässigkeitsrobustheit zusammensetzt:

$$\begin{aligned} \text{Minimiere } Z &= \lambda \cdot Z_{Opt} + \omega_{jst} \cdot Z_{Zul} \\ &= \lambda \cdot \sum_{s=1}^S p_s \cdot |K_s - K_s^*| + \sum_{s=1}^S p_s \cdot \left(\sum_{j=1}^m \omega_{jst} \cdot \left| \sum_{t=1}^h \left(\sum_{i=1}^{2n} x_{ijt} - b_{jst} \right) \right| \right) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Die Zielfunktion des Grundmodells ist hierbei nur indirekt in der Zielfunktion des robusten Modells enthalten, so dass die Berechnung der Summe

aus Transport-, Bestell- und Strafkosten in die erste Nebenbedingung überführt wird:

$$K_s = \sum_{t=1}^h \sum_{i=1}^{2n} \sum_{j=1}^m \alpha_{ijt} \cdot d_{ij} \cdot x_{ijt} + \sum_{t=1}^h \sum_{i=1}^{2n} \sum_{j=1}^m k_{it} \cdot x_{ijt} + \sum_{t=1}^h \sum_{i=1}^{2n} y_{it} \cdot k_{it} \cdot \left(U_{it} - \sum_{j=1}^m x_{ijt} \right) \quad \forall s = 1, \dots, S \quad (3.2)$$

Weiterhin können die Restriktionen in Bezug auf die Maximalabnahmemengen (1.4) und die Nutzung der zweiten Staffel (1.6) aus dem Grundmodell übernommen werden. Die Variablendefinitionen (1.2), (1.5), (1.7) und (1.8) werden beibehalten und um die folgenden Parameterdefinition ergänzt:

$$\lambda \geq 0 \quad (3.3)$$

$$\omega_{jst} \geq 0 \quad \forall j = 1, \dots, m; s = 1, \dots, S; t = 1, \dots, h \quad (3.4)$$

Das formulierte robuste Modell kann der Klasse der gemischt-ganzzahligen Optimierungsprobleme zugeordnet werden. Es enthält $S + 5nh$ Nebenbedingungen und $2nh \cdot (j + 1) + Smh + 1$ Variablen.

Zur Berechnung des vorgestellten robusten Modells zur distributionsbasierten Beschaffungsplanung mit Hilfe von Standardsolvern ist eine *Linearisierung* vorzunehmen. Dafür sind die Beträge in der Zielfunktion und die Variablenmultiplikationen in den Nebenbedingungen umzuformen. Während für die Variablenmultiplikation eine Methode gewählt wird, die analog zur Linearisierung des Grundmodells vorgeht, muss die Betragsfunktion in den Zielfunktionstermen durch ein anderes Verfahren umgewandelt werden¹⁾: Mit Hilfe einer Entscheidungsvariablen δ und einer zusätzlichen Nebenbedingung zur Definition der Entscheidungsvariablen wird eine lineare Zielfunktion aufgestellt. Formal ergibt sich folgendes Vorgehen:

1) Vgl. Yu/Li (2000, S. 390).

4 Erweiterung des Grundmodells um die Berücksichtigung von Unsicherheiten

$$\text{Minimiere } Y = |f(X) - g|$$

u.d.N.

$$x \geq 0; g \geq 0$$

$X \in F, F$ ist Menge

zulässiger Lösungen



$$\text{Minimiere } Z = f(X) - g + 2 \cdot \delta$$

u.d.N.

$$g - f(X) - \delta \leq 0$$

$$x \geq 0; g \geq 0; \delta \geq 0$$

$X \in F, F$ ist Menge

zulässiger Lösungen

Auf dieser Grundlage wird die Hilfsvariable θ_s in der Zielfunktion (4.1) sowie in der zusätzlichen Nebenbedingung (4.2) verwendet, um die Linearisierung des Betrags im gesamtkostenbezogenen ersten Term der Zielfunktion abzubilden. In Analogie hierzu bildet die Hilfsvariable δ_{jst} in der Zielfunktion und in der Nebenbedingung (4.3) die Linearisierung des Betrags des zweiten Zielfunktionsterms ab, der die Bedarfsbedingungsverletzungen berechnet.

Dabei ist es im Rahmen der Entscheidungsunterstützung von Vorteil, wenn positive und negative Abweichungen der Bedarfsbedingungsverletzungen getrennt gewichtet werden können, d. h. eine etwaige Überbelieferung eines Kunden wird eher akzeptiert als eine Nichteinhaltung der vertraglich vereinbarten Liefermenge. Diese Überbelieferungen können auftreten, falls für ein Szenario eine geringere als die erwartete Nachfragemenge vorliegt. In diesem Fall sorgt die betragsmäßige Minimierung der Kostenabweichungen (erster Zielfunktionsterm) dafür, dass trotzdem die erwartete Nachfragemenge geliefert wird und somit positive Bedarfsbedingungsverletzungen im Sinne von Überbelieferungen entstehen. Daher werden die Möglichkeiten dieser Linearisierung genutzt und zwei verschiedene Faktoren eingeführt, wobei ω_{jst}^+ eine positive und ω_{jst}^- eine negative Bedarfsbedingungsverletzung gewichtet. Mit Hilfe dieser Gewichtungsfaktoren können dann positive Abweichungen schwächer bestraft werden als negative. Die erörterten Überlegungen führen zu der folgenden linearen Zielfunktion:

$$\begin{aligned} \text{Minimiere } Z = & \lambda \cdot \sum_{s=1}^S p_s \cdot (K_s - K_s^* + 2 \cdot \theta_s) \\ & + \sum_{s=1}^S p_s \cdot \left(\sum_{j=1}^m \left(\omega_{jst}^+ \cdot \left[\sum_{t=1}^h \left(\sum_{i=1}^{2n} x_{ijt} - b_{jst} \right) + \delta_{jst} \right] + \omega_{jst}^- \cdot \delta_{jst} \right) \right) \end{aligned} \quad (4.1)$$

Die Nebenbedingungen des Modells werden um die zusätzlichen Hilfsrestriktionen (4.2) und (4.3) ergänzt und die linearisierte Zielfunktion des Grundmodells wird in die Nebenbedingung (4.4) umgewandelt:

$$K_s^* - K_s - \theta_s \leq 0 \quad \forall s = 1, \dots, S \quad (4.2)$$

$$\sum_{t=1}^h \left(b_{jst} - \sum_{i=1}^{2n} x_{ijt} \right) - \delta_{jst} \leq 0 \quad \forall j = 1, \dots, m; s = 1, \dots, S \quad (4.3)$$

$$K_s = \sum_{t=1}^h \sum_{i=1}^{2n} \sum_{j=1}^m \alpha_{ijt} \cdot d_{ij} \cdot x_{ijt} + \sum_{t=1}^h \sum_{i=1}^{2n} \sum_{j=1}^m k_{it} \cdot x_{ijt} + \sum_{t=1}^h \sum_{i=1}^n s_{it} \cdot k_{it} \quad \forall s = 1, \dots, S \quad (4.4)$$

Die Nebenbedingungen (1.4) zur Einhaltung der Maximalabnahmemengen und die Nebenbedingungen (2.2) bis (2.8) zur Linearisierung der Strafkosten und der Staffelnutzung können übernommen werden. Die Variablendefinitionen (1.7), (1.8), (2.9) und (3.3) werden übertragen und durch weitere Variablen- und Parameterdefinitionen vervollständigt:

$$\omega_{jst}^+, \omega_{jst}^- \geq 0 \quad \forall j = 1, \dots, m; s = 1, \dots, S \quad (4.5)$$

$$\theta_s \geq 0 \quad s = 1, \dots, S \quad (4.6)$$

$$\delta_{jst} \geq 0 \quad \forall j = 1, \dots, m; s = 1, \dots, S; t = 1, \dots, h \quad (4.7)$$

Um das aufgestellte robuste Modell für die Entscheidungsunterstützung in der distributionsorientierten Beschaffungsplanung einzusetzen, ist ein Vergleichsmaßstab zur Einschätzung der Lösungsgüte des robusten Modells erforderlich. Eine intuitive Möglichkeit zur Berechnung dieses Vergleichsmaßstabs ist die Erstellung eines deterministischen Ersatzwertmodells¹⁾. Für das Ersatzwertmodell werden die Zielfunktion und die Nebenbedingungen aus dem Grundmodell (vgl. Kapitel 3.2) übernommen und die unsicheren Parameter durch deterministische Erwartungswerte ersetzt:

- Die stochastischen Kundennachfragen pro Periode b_{jt} werden durch ihren Erwartungswert \bar{b}_{jt} ersetzt:

1) Vgl. Friedrich (2007, S. 24); Vladimirov/Zenios (1997, S. 12.9 ff.).

4 Erweiterung des Grundmodells um die Berücksichtigung von Unsicherheiten

$$\bar{b}_{jt} = \sum_{s=1}^S p_s \cdot b_{jts} \quad \forall j = 1, \dots, m; t = 1, \dots, h \quad (5.1)$$

- Darüber hinaus wird der stochastische Transportkostenfaktor α_{ijt} durch den entsprechenden Erwartungswert $\bar{\alpha}_{ijt}$ substituiert:

$$\bar{\alpha}_{ijt} = \sum_{s=1}^S p_s \cdot \alpha_{ijts} \quad \forall i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m; t = 1, \dots, h \quad (5.2)$$

Die jeweiligen Erwartungswerte werden hierbei wiederum durch die prognostizierten Szenarien und ihre Eintrittswahrscheinlichkeiten gebildet. Dieses Modell unterstellt die Risikoneutralität des Planers, liefert aber im Sinne eines Vergleichsmaßstabs Informationen zur Entscheidungsunterstützung bei der vorliegenden Problemstellung.

Anhand der aufgestellten Modelle für die distributionsbasierte Beschaffungsplanung lassen sich die Anforderungen, die sich aus der vorliegenden Problemstellung ergeben, erfüllen und die Entscheidungen in der taktischen Beschaffungsplanung können unterstützt werden. Die Eignung der Vorgehensweise soll auf Grundlage des in Kapitel 2 skizzierten praktischen Problems untersucht werden.

5 Numerische Ergebnisanalyse des robusten Modells

Die Untersuchung der Ergebnisse des robusten Modells zur distributionsbasierten Beschaffungsplanung wird auf der Grundlage der zur Verfügung gestellten Daten des Kooperationspartners aus dem Flüssiggashandel durchgeführt. Darauf aufbauend lässt sich die Eignung der Modellierung für praktische Problemstellungen darstellen und analysieren. Zur Wahrung der Vertraulichkeit werden alle einbezogenen Daten ohne Einfluss auf die Lösungsstruktur entfremdet, ohne dabei die Lösungsstruktur zu beeinflussen.

Zunächst soll die vorgenommene Analyse weiter spezifiziert werden. Hierzu werden die Datenlage präzisiert und verschiedene Konstellationen definiert, die für die folgende Analyse genutzt werden.

5.1 Spezifikation der Analyse

5.1.1 Datenlage

Ziel des dargestellten Modells ist es, die von einem Lieferanten an einen Kunden zu liefernden Mengen (Entscheidungsvariablen) unter minimalen Transport- und Bestellkosten bei gleichzeitig möglichst hoher Nachfragebefriedigung zu bestimmen. Dafür ist eine Vielzahl von Parametern zu bestimmen, die als Inputfaktoren in die Berechnung einfließen. Hierbei ist zwischen Preis- und Mengenparametern sowie Distanzen zu unterscheiden. Zu den mengenbezogenen Parametern gehören:

- die Minimalabnahmemenge eines Lieferanten pro Monat,
- die Maximalabnahmemenge der ersten Staffel eines Lieferanten pro Monat,
- die (Maximalabnahme-)Menge der zweiten Staffel eines Lieferanten pro Monat und
- die Nachfragemenge eines Kunden pro Monat.

Weiterhin sind die folgenden preisbezogenen Parameter zu definieren:

- der Bestellpreis der ersten Staffel eines Lieferanten pro Monat,

- der Bestellpreis der zweiten Staffel eines Lieferanten pro Monat und
- der Transportkostensatz für jede Kunden-Lieferanten-Beziehung für jeden Monat.

Die benötigten preis- und mengenbezogenen Daten stehen für 12 Monate zur Verfügung. Auch die Distanzdaten zwischen den Kunden und den Lieferanten liegen als Matrix vor. Um die Nachfragemengen der Kunden und den Transportkostensatz als stochastische Daten in die Untersuchung einfließen zu lassen, werden weitere Datensätze simulativ mit Hilfe der Berechnungssoftware Matlab (Version 7.14/R2012a) generiert. Hierbei wird ein symmetrisches Intervall um den Realwert gebildet, das die gewünschten Schwankungen umfasst. Innerhalb des Intervalls lassen sich dann durch den Einsatz von normalverteilten Zufallszahlen Hilfwerte für die als stochastisch angenommenen Parameter ermitteln¹⁾.

Anhand der beschriebenen Daten ergeben sich verschiedene Möglichkeiten, um das aufgestellte robuste Modell im Rahmen der Entscheidungsunterstützung zu nutzen. Aufgrund der Einbeziehung der Unsicherheit und der Risikoeinstellung des Planers in die Modellierung stehen hierbei Darstellungs- und Interpretationsmöglichkeiten zur Verfügung, die über die Ergebnisanalyse des Grundmodells hinausgehen.

Um einen systematischen Vergleich von Ergebnissen vorzunehmen, die für die vorliegende Problemstellung von Relevanz sind, ergibt sich die Notwendigkeit, Konstellationen zu definieren. Konstellationen stellen dabei eine Kombination spezieller Realisationen der betrachteten unsicheren Parameter dar²⁾.

-
- 1) Hierbei wird keine Beschränkung der Verallgemeinerbarkeit im Hinblick auf die Verteilung der Werte innerhalb der Intervalle vorgenommen. Vgl. Anhang D für den Quellcode der zugrundeliegenden Berechnungen.
 - 2) In der Literatur wird auch von Szenarien gesprochen (vgl. z. B. Comes/Hiete/Schultmann (2013, S. 29); Dembo (1991, S. 64); Thorn (2002, S. 159)). Die hier betrachteten Konstellationen sind jedoch von den Szenarien der robusten Optimierung zu unterscheiden, so dass durch den Begriff der Konstellationen eine eindeutige Bezeichnung vorgenommen wird.

5.1.2 Untersuchte Konstellationen

Zur Aufstellung relevanter Konstellationen bietet es sich an, die folgenden Merkmale heranzuziehen, die aufbauend auf den praktischen Erfahrungen und Prognosen der Planer in der kooperierenden Unternehmung gebildet werden können¹⁾:

- Die Höhe der *Kundenbedarfe* (B) kann gering, mittel oder stark um den Vorjahreswert oder den auf Basis mehrerer Vorjahreswerte berechneten Bedarfswert schwanken. Hierbei können die konjunkturelle Entwicklung, rechtliche Rahmenbedingungen und speziell im Flüssiggashandel das Wetter eine entscheidende Rolle spielen²⁾.
- Ferner ist eine Änderung des *Anteils der unsicheren Aufträge* (A) an der Gesamtmenge der Aufträge möglich.
- Die Schwankungen des *Transportkostenfaktors* (T) können in veränderten Treibstoffpreisen oder der Fremdvergabe des Transports an Speditionen begründet sein. Daher werden auch diese Schwankungen in die Bildung der Konstellationen einbezogen.

Die dargestellten Merkmale können unterschiedliche Ausprägungen aufweisen, wobei Intervalle genutzt werden, die in Gesprächen mit den Planungsexperten des Kooperationspartners abgefragt wurden. Es ergibt sich die folgende Tabelle 3:

1) Vgl. Badel/Corsten/Wolff (2013, S. 794). Die robuste Optimierung per se enthält keine Methoden zur Aufstellung oder Auswahl von Konstellationen (vgl. Vladimirov/Zenios 1997, S. 12.16)). Die hier vorgenommene Definition der Konstellationen (diskursive Szenarienkonstruktion, vgl. Comes/Hiete/Schultmann (2013, S. 30)) kann mit Hilfe einer computergestützten Berechnung der Konstellationen (vgl. z. B. Huss (1988, S. 380); Mißler-Behr (1993, S. 117 ff.); Postma/Liebl (2005, S. 164)) unterstützt werden.

2) Vgl. Bopp et al. (1996, S. 512).

Merkmal	Ausprägungen					
	gering ($B \leq 5\%$)		mittel ($5\% < B \leq 20\%$)		stark ($B > 20\%$)	
Bedarfsschwankungen	B1	B2	B3			
Anteil unsicherer Aufträge	gering ($A \leq 5\%$)		mittel ($5\% < A \leq 50\%$)		hoch ($A > 50\%$)	
	A1	A2	A3			
Schwankungen des Transportkostensatzes	gering ($T \leq 1\%$)		mittel ($1\% < T \leq 3\%$)		hoch ($T > 3\%$)	
	T1	T2	T3			

Tabelle 3: Merkmale und Merkmalsausprägungen zur Konstellationsgenerierung

Aus der Kombination verschiedener Ausprägungen der Merkmale können dann die folgenden Konstellationen mit praktischer Relevanz gebildet werden:

- Bei nur geringer Änderung von Auftragslage und Transportkostensatz ergibt sich die nur mit leichten Schwankungen verbundene Konstellation [B1, A1, T1].
- Bei schwacher Änderung der Auftragslage, jedoch hoher Schwankung des Transportkostensatzes ergibt sich die Konstellation [B1, A1, T3].
- Eine sehr starke Änderung von Auftragslage und Transportkostensatz bildet die mit hohen Schwankungen einhergehende Konstellation [B3, A3, T3] ab.
- Bei starker Schwankung der Auftragslage aber nur geringer Schwankung des Transportkostensatzes leitet sich die Konstellation [B3, A3, T1] ab.
- Mittlere Schwankungen werden durch die Konstellation [B2, A2, T2] dargestellt.
- Bei einer Zunahme der Bedarfsschwankungen kleinerer Kunden bei gleichzeitig annähernd konstanten Bedarfen der Großkunden entsteht die Konstellation [B3, A1, T2].

Auf Basis dieser aufgestellten Konstellationen können die Ergebnisse der robusten Modellierung zur Entscheidungsunterstützung in der distributi-

onsbasierten Beschaffungsplanung einer ausführlichen Analyse unterzogen werden.

5.2 Vergleich der Ergebnisse

Die Ergebnisse der robusten Modellierung werden für zwölf Perioden unter Beachtung unterschiedlicher Risikoeinstellungen berechnet und mit den Ergebnissen des deterministischen Ersatzwertmodells (DEM) verglichen. Dabei bietet es sich an, die angegebene Risikoeinstellung des Planers im Sinne einer Bernoulli-Nutzenbetrachtung graduell zu variieren. Anhand der in Kap. 5.1 erörterten Konstellationen kann dann ein Vergleich und die darauf basierende Interpretation der Ergebnisse vorgenommen werden.

Zur Gegenüberstellung der Ergebnisse werden verschiedene Kriterien in Betracht gezogen, die in der Beschaffungsplanung relevant sind:

- Es gilt die Kosten der robusten Modelllösung zu untersuchen. Die kostenbezogenen Kriterien können dabei in
 - Bestellkosten,
 - Transportkosten,
 - Strafkosten und
 - Gesamtkostenunterteilt werden.
- Die Fehlmengen pro Periode, die zur vollständigen Bedarfserfüllung der Kunden noch erforderlich wären, sind zu analysieren. Hierbei wird zwischen
 - den kumulierten absoluten Fehlmengen und
 - den kumulierten, zum Gesamtbedarf relativen Fehlmengenunterschieden.
- Als weiteres Kriterium zur Einschätzung der Lösung wird die Anzahl der unvollständig befriedigten Kunden untersucht. Dabei wird
 - einerseits die absolute Anzahl an Kunden mit Fehlmengen betrachtet und
 - andererseits die Anzahl unvollständig befriedigter Kunden in Relation zur Gesamtanzahl der Kunden gemessen.

Das erste Kriterium dient der Erzielung möglichst niedriger Kosten und kann als Indikator für die Optimalitätsrobustheit herangezogen werden. Die beiden letztgenannten Kriterien geben Aufschluss über die Zulässigkeitsrobustheit der Lösung und damit über den mit dieser Lösung zu realisierenden Grad der Bedarfsbefriedigung¹⁾.

Eine detaillierte Interpretation der Lösung soll zunächst anhand einer ausgewählten Konstellation vorgenommen werden, bevor auf den konstellationsübergreifenden Vergleich der Ergebnisse eingegangen wird. Abschließend sind die Ergebnisse hinsichtlich einer Entscheidungsunterstützung zur Parametrisierung der robusten Modellierung zu untersuchen. Dabei ergeben sich verschiedene Darstellungsmöglichkeiten der Informationen, wobei die aus der Literatur zur robusten Optimierung²⁾ bekannten Methoden kombiniert und erweitert werden.

5.2.1 Konstellationsspezifische Untersuchung

Um die relevanten Zusammenhänge in der robusten Beschaffungsplanung deutlich darstellen zu können bietet es sich an, die Konstellation [B2, A2, T2] als Ausgangspunkt der numerischen Analyse zu wählen. Sie geht von mittleren Schwankungen der drei Merkmale Höhe des Bedarfs, Anteil unsicherer Aufträge und Transportkostenfaktor aus. Um die Übersichtlichkeit der Analyse zu wahren, sollen die Ergebnisse der Berechnungen für diese Konstellation anhand des deterministischen Ersatzwertmodells sowie drei

-
- 1) Es ist hervorzuheben, dass die Monetarisierung von Fehlmengen generell über Konventionalstrafen möglich ist. Dieser Vertragsgestaltungsparameter ist jedoch einerseits für den Flüssiggashandel nicht relevant. Andererseits würden scheinoptimale Lösungen resultieren, da Effekte wie der Verlust von Folgeaufträgen nur schwierig quantifizierbar sind.
 - 2) Vgl. z. B. Hahn (2012, S. 142); Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995, S. 267 f.); Vladimirov/Zenios (1997, S. 12.19 f.). Chica et al. (2013, S. 766) nutzen Kreisdurchmesser und Farben zur Darstellung unterschiedlicher Robustheitswerte für jede nicht dominierte Lösung. Dieses Vorgehen ist jedoch nur bei wenigen Entscheidungsvariablen übersichtlich und kann daher nicht für die vorliegende Problemstellung angewandt werden.

verschiedenen Risikoeinstellungen aufgezeigt werden, wobei die folgenden Parameterwerte gewählt wurden¹⁾:

- Eine niedrige Risikoaversion wird durch den Gewichtungsfaktor $\omega^- = 50$ für negative Abweichungen von den Kundenbedarfen abgebildet.
- Eine mittlere Risikoaversion spiegelt der Faktor $\omega^- = 250$ wider und
- durch den Gewichtungsfaktor $\omega^- = 500$ wird eine stark ausgeprägte Risikoaversion dargestellt.

Ferner gelten die folgenden Parameter für alle drei Risikoeinstellungen:

- Die Gewichtungsfaktoren für alle Kunden und Szenarien werden als identisch ($\omega_{js}^+ \equiv \omega^+$ bzw. $\omega_{js}^- \equiv \omega^-$) angenommen, d. h., dass keine Bevorzugung von (langjährigen) Kunden vorgenommen wird.
- Weiterhin werden die positiven Abweichungen für alle Risikoeinstellungen jeweils mit dem Faktor eins gewichtet ($\omega^+ = 1$), da in der vorliegenden Modellierung positive Bedarfsabweichungen durch die resultierenden Transportkosten, die in die Zielfunktion einfließen, minimiert werden.
- Der Faktor zur Gewichtung der Kostenabweichungen wird zunächst ebenfalls für alle Risikoeinstellungen eins gesetzt ($\lambda = 1$), um die Ergebnisse der Risikoaversion vergleichbar zu gestalten.

Auf die Illustration von Ergebnissen eines risikofreudigen Entscheiders wird aufgrund der Vertrauensbasis im Flüssiggashandel sowie der daraus resultierenden Anforderungen eines hohen Servicegrades verzichtet.

Die Darstellung der Ergebnisse für die Konstellation [B2, A2, T2] ist zunächst einzeln für die genannten Kriterien vorgenommen, um grundlegende Zusammenhänge der robusten Optimierung darzustellen. Auf dieser Grundlage sind die verschiedenen Kriterien zu kombinieren, um aus dem direkten Vergleich eine spezifische und direkt interpretierbare Entscheidungsunterstützung zu generieren.

1) Diese Parameterwerte sind problemspezifische Größen, die sich anhand von verschiedenen Untersuchungen und Intuition als für die Problemstellung relevant herausgestellt haben. Zum Vorgehen zur Parametrisierung vgl. Kapitel 5.3.

5.2.1.1 Einkriterielle Ergebnisanalyse

Ausgehend von der singulären Betrachtung der verschiedenen Kriterien können Tendenzaussagen im Hinblick auf die Lösungsqualität und die mit der robusten Optimierung verbundenen Effekte getroffen werden.

Dabei werden die in einer Lösung berechneten Kosten getrennt nach Bestell- und Transportkosten analysiert. Strafkosten fallen in keiner Lösung an und können daher vernachlässigt werden. Die Bestellkosten der Lösung des deterministischen Ersatzwertmodells sowie der drei Risikoeinstellungen sind in Abbildung 16 abgetragen. Auffällig ist hierbei insbesondere, dass die Lösung des deterministischen Ersatzwertmodells in jedem Monat mit den geringsten Bestellkosten einhergeht. Weiterhin lässt sich konstatieren, dass die Bestellkosten der Lösungen der robusten Modellierung (erwartungsgemäß) mit der Stärke des Absicherungsbedürfnisses, also der Höhe der Risikoaversion ($\omega^- \in \{50, 250, 500\}$), steigen.

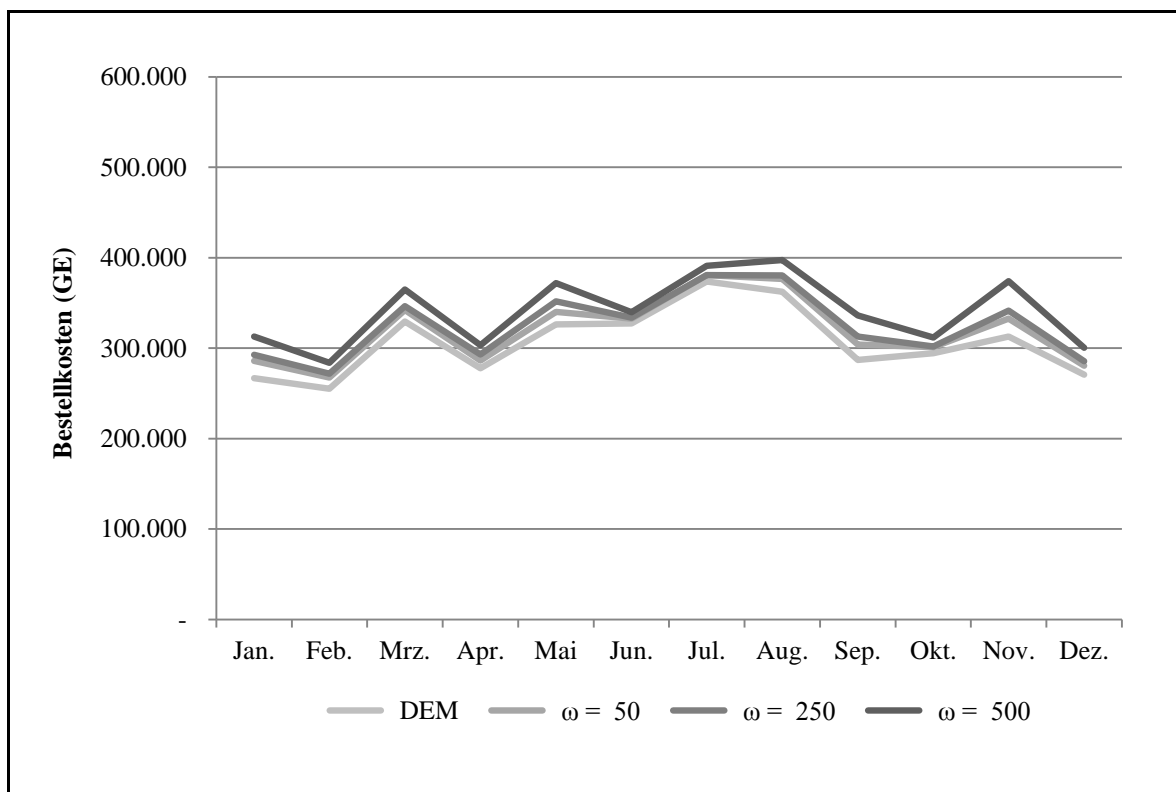


Abbildung 16: Bestellkosten der robusten Modellierung im Vergleich zum deterministischen Ersatzwertmodell (DEM)

Hierbei fällt auf, dass die Bestellkosten vergleichsweise eng beieinander liegen. Für die geringe Risikoaversion liegen die minimale Abweichung von der Lösung des deterministischen Ersatzwertmodells im Juni bei 1,6 % und die maximale im November bei 6,3 %. Für die starke Risikoaversion werden die minimale Abweichung mit 3,8 % im Juni und die maximale Abweichung mit 19,6 % im November erreicht. Insgesamt liegen die Kosten der robusten Lösungen durchschnittlich 4,1 % für die geringe, 5,8 % für die mittlere und 11,2 % für die starke Risikoaversion über denen des deterministischen Ersatzwertmodells. D. h., dass selbst eine starke Risikoaversion eine relativ geringe Erhöhung der Bestellkosten zur Folge hat.

Im Vergleich der Transportkosten der Lösungen kann ein ähnlicher Rückschluss gezogen werden: Die Transportkosten steigen mit zunehmender Risikoaversion, wobei die Unterschiede zum deterministischen Ersatzwertmodell relativ gering sind (vgl. Abbildung 17):

- Die Transportkosten der Lösung mit geringer Risikoaversion weichen durchschnittlich um 3,6 % von der Lösung des deterministischen Ersatzwertmodells ab. Die minimale Abweichung (3,6 %) ist im Juli und die maximale Abweichung (6,5 %) im November abgezeichnet.
- Die Lösung mit mittlerer Risikoaversion geht mit einer durchschnittlichen Abweichung von 4,4 % von den Transportkosten des deterministischen Ersatzwertmodells einher. Das Minimum der Abweichung liegt im Juli bei 1,6 % und das Maximum zeigt sich im November mit 7,2 %.
- Bei Zugrundelegung einer starken Risikoaversion entstehen durchschnittlich 10,8 % höhere Kosten als im deterministischen Modell. Eine minimale Abweichung von 4,2 % kann im Juli und eine maximale Abweichung von 19,2 % kann im November beobachtet werden.

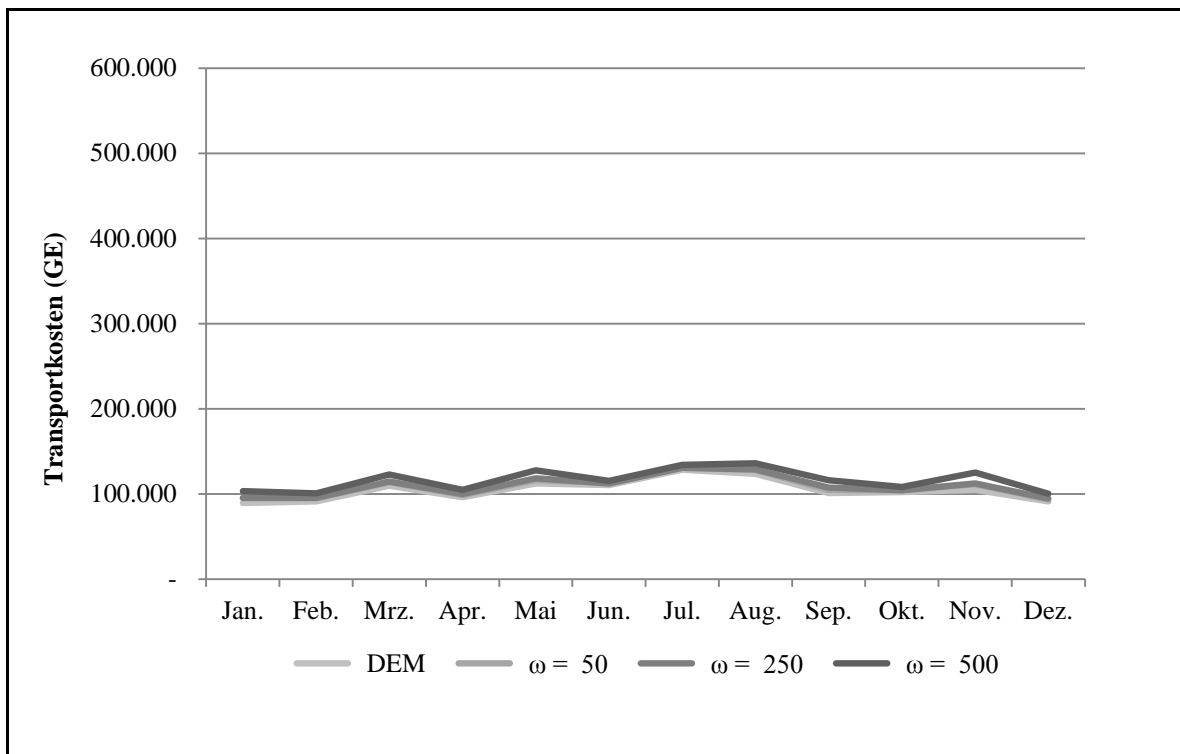


Abbildung 17: Transportkosten der robusten Modellierung im Vergleich zum deterministischen Ersatzwertmodell (DEM)

Durch entsprechende Zusammenhänge ergeben sich Übereinstimmungen der Tendenzaussagen bei Betrachtung der Gesamtkosten, die sich aus Bestell- und Transportkosten zusammensetzen. Es wird deutlich, dass eine maximale Abweichung von 6,4 % für die geringe, 8,7 % für die mittlere und 19,5 % für die starke Risikoaversion realisiert wird. Insgesamt kann eine durchschnittliche Abweichung von 3,9 % für die geringe, 5,4 % für die mittlere und 11,1 % für die starke Risikoaversion gemessen werden (vgl. Abbildung 18). Der Planer kann die mit einer Risikoeinstellung einhergehenden Kosten anhand dieser Daten quantifiziert in seine Entscheidungen einfließen lassen.

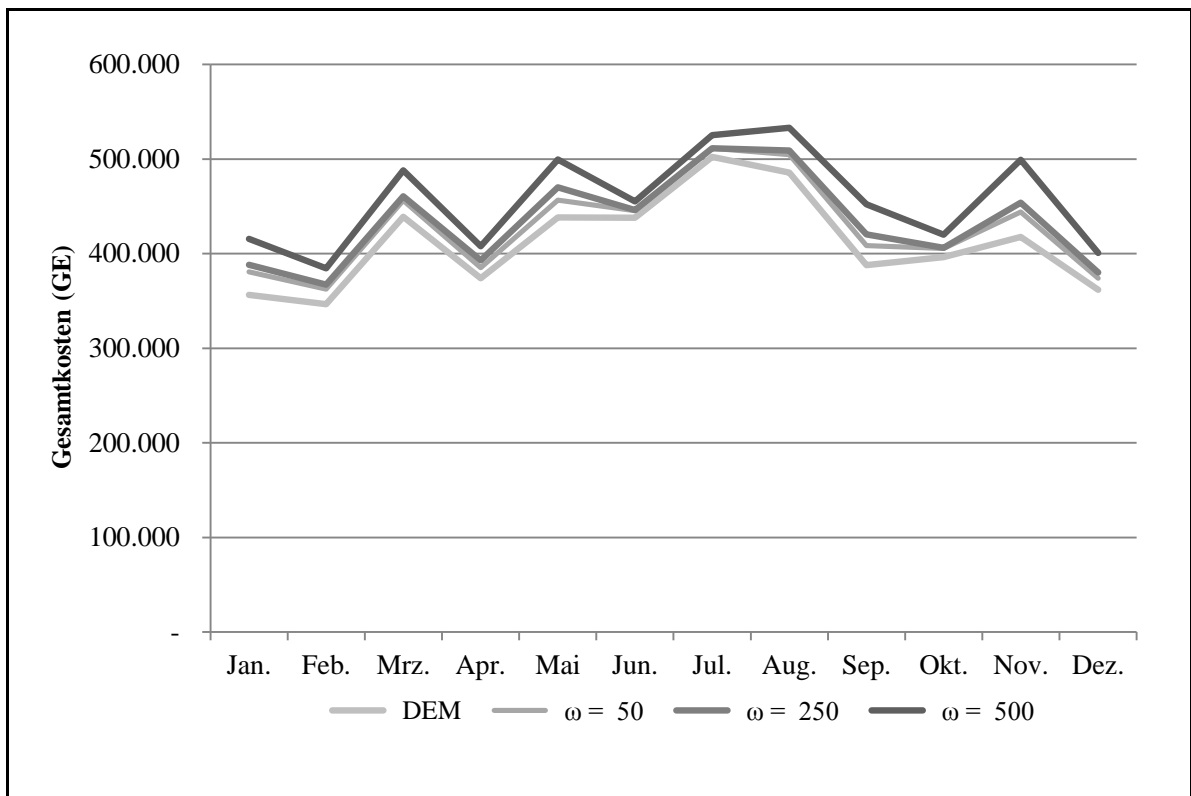


Abbildung 18: Gesamtkosten der robusten Modellierung im Vergleich zum deterministischen Ersatzwertmodell (DEM)

Im Rahmen der Entscheidungen in der Beschaffungsplanung sind quantifizierte Abwägung von Kosten (Optimalität) und befriedigten Kundenbedarfen (Zulässigkeit) vorzunehmen. Hierfür müssen die Kosten simultan mit den in einer Lösung realisierten Bedarfsverletzungen betrachtet werden. Um diesem Sachverhalt Rechnung zu tragen, werden im Hinblick auf die Bedarfsverletzungen einerseits die Fehlmengen und andererseits die Anzahl nicht vollständig bedienter Kunden in die Betrachtung einbezogen.

Der linke Teil von Abbildung 19 zeigt die in den robusten Ergebnissen sowie in der deterministischen Lösung entstehenden absoluten Fehlmengen in Tonnen für zwölf Monate. Es wird deutlich, dass das deterministische Modell mit hohen Fehlmengen von durchschnittlich 220,9 Tonnen verbunden ist. Im Vergleich hierzu erreicht die Lösung mit geringer Robustheit durchschnittlich 102 Tonnen. Bei Annahme mittlerer Risikoaversion entstehen durchschnittlich 75,6 Tonnen und bei Annahme starker Risikoaversion fehlen nur 0,6 Tonnen zur vollständigen Bedarfsbefriedigung. Die Lösung mit starker Risikoaversion sieht für acht Monate eine vollständige und für 4

Monate eine fast vollständige Bedarfsbefriedigung vor. Insgesamt lässt sich konstatieren, dass schon bei der Lösung mit leichter Risikoaversion eine deutliche Reduktion der Fehlmengen von 54,6 % zu vermerken ist. Bei der Lösung mit starker Risikoaversion können 99,6 % der Fehlmengen im Vergleich zum deterministischen Ersatzwertmodell vermieden werden.

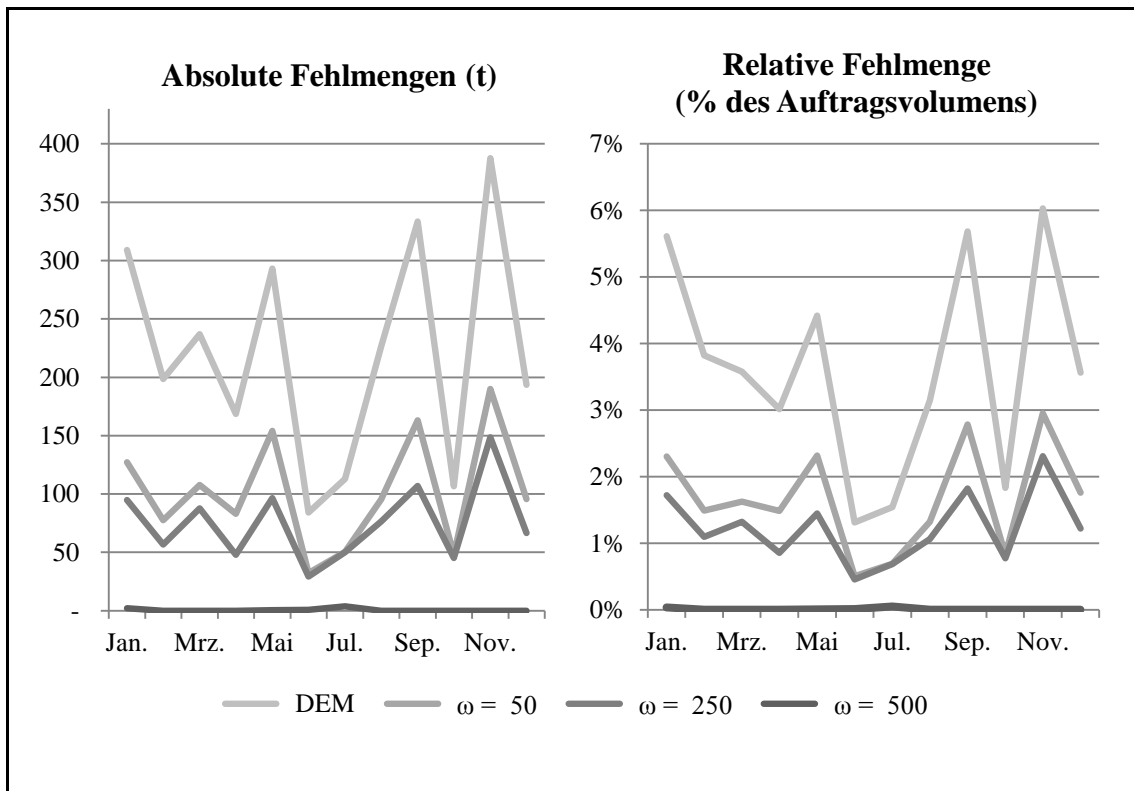


Abbildung 19: Absolute und relative Fehlmengen als Ergebnis der robusten Modellierung im Vergleich zum deterministischen Ersatzwertmodell (DEM)

Werden die absoluten Fehlmengen in Relation zum zu befriedigenden Gesamtbedarf gesetzt, zeigt sich ein ähnlicher Effekt (vgl. rechte Spalte der Abbildung 19). Trotz unterschiedlicher Mengen in den verschiedenen Monaten verlaufen die verschiedenen Graphen annähernd parallel. Auffallend in beiden Abbildungen ist die Relation der Fehlmengen zu den Gesamtkosten und somit zur monatlichen Liefermenge. In den Sommermonaten mit hohen Bedarfen (Juni, Juli, August) werden vergleichsweise wenige Fehlmengen realisiert. Die Kurve wirkt hierdurch wie eine horizontale Spiegelung der Kostenkurve. Dies hat den Vorteil, dass gerade in Monaten, in denen die Flüssiggase nur unzureichend zur Verfügung stehen und ein Aus-

gleich durch konkurrierende Lieferanten unmöglich ist, die vertrauensvolle Zusammenarbeit mit den Kunden sichergestellt wird.

Neben den Fehlmengen erscheint im Kontext des vertrauensbasierten Flüssiggashandels die Anzahl der Kunden relevant, die durch die realisierte Lösung nicht vollständig bedient werden können. Abbildung 20 (links) zeigt diese Kundenanzahl im Vergleich der robusten Lösungen mit der des deterministischen Ersatzwertmodells. Auch hier sind in der deterministischen Lösung starke Schwankungen zu erkennen, die mit maximal 93 (im November) und mindestens 24 (im Juni) unvollständig bedienten Kunden einhergehen. Im Vergleich zur Gesamtzahl der Kunden werden dann maximal 36,4 % und minimal 11 % nicht vollständig bedient. Es ist zu berücksichtigen, dass diese Kunden in der Folgeperiode von einem Auftrag Abstand nehmen und die Reputation des Händlers dauerhaft geschädigt wird. In den robusten Lösungen können hingegen maximal 45 (17,5 %; leichte Aversion), 37 (14,3 %; mittlere Aversion) und 1 (0,1 %; starke Aversion) Kunde(n) nicht vollständig bedient werden.

Insgesamt wird durch die Lösung mit leichter Risikoaversion die Anzahl unvollständig bedienter Kunden um durchschnittlich 54,5 % reduziert. Die Lösung der starken Risikoaversion verzeichnet eine Verringerung der Anzahl unbefriedigter Kunden um 99,8 %. Mit dieser Lösung kann also von einer vollständigen Befriedigung der Nachfrager ausgegangen werden.

Dieses Ergebnis geht auch bei Betrachtung der zur Gesamtkundenanzahl relativen Anzahl an unvollständig befriedigten Kunden deutlich hervor (vgl. Abbildung 20 rechts). Trotz geringer Änderungen (bspw. im Februar) führt die robuste Modellierung zu Lösungen mit deutlichen Verringerungen der Anzahl der Kunden mit unvollständig befriedigten Bedarfen.

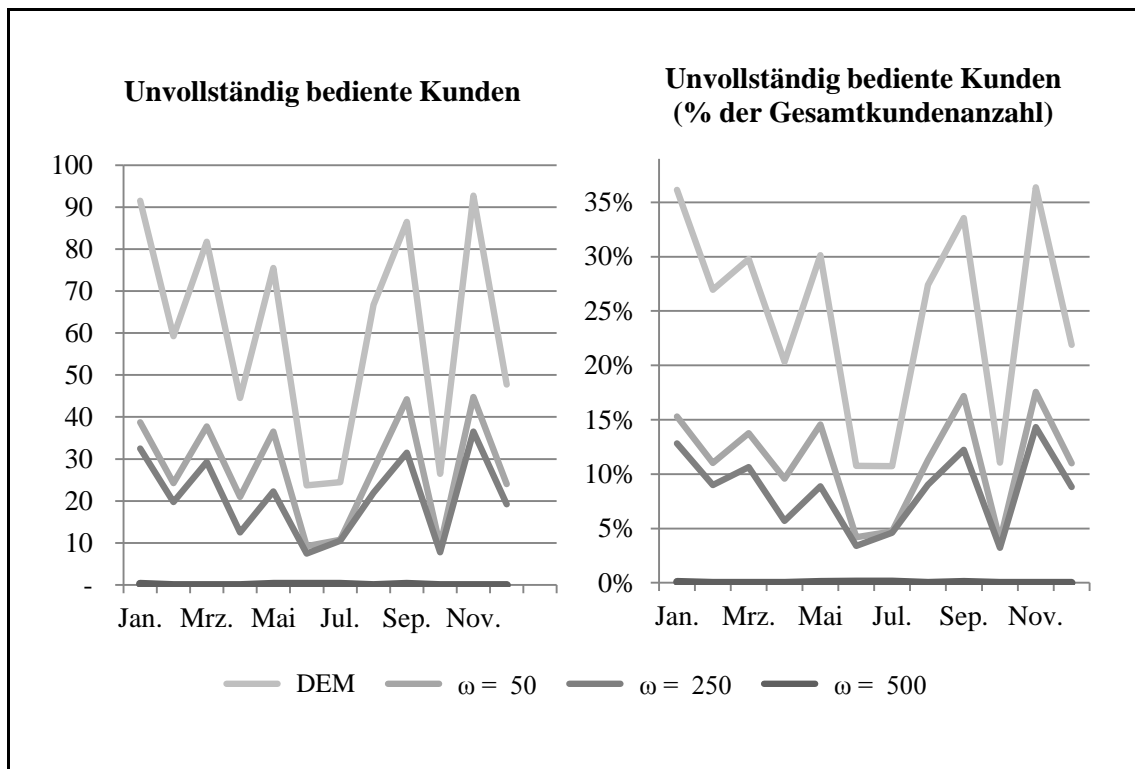


Abbildung 20: Absolute und relative Anzahl unvollständig befriedigter Kunden als Ergebnis der robusten Modellierung im Vergleich zum deterministischen Ersatzwertmodell (DEM)

Die betrachteten Kriterien geben Hinweise auf die Eignung der robusten Vorgehensweise in der Beschaffungsplanung des Flüssiggashandels und stellen grundlegende Mechanismen der robusten Optimierung dar. Aufgrund der kombinatorischen Komplexität der im Rahmen der Beschaffungsplanung zu treffenden Entscheidungen ergibt sich jedoch die Notwendigkeit, die verschiedenen Kriterien miteinander zu verknüpfen und eine simultane Ergebnisanalyse vorzunehmen.

5.2.1.2 Mehrkriterielle Ergebnisanalyse

Zunächst stellt sich die Frage nach dem Verhalten der verschiedenen Kriterien unter Variation des Risikoaversionsgrades. Hierfür werden exemplarisch die Ergebnisse des Monats Mai als Ausgangspunkt der Analyse genutzt, da er mit durchschnittlichen Bedarfsmengen einhergeht und so die Darstellung aller relevanten Zusammenhänge ermöglicht. Auf dieser Grundlage kann dann eine Verknüpfung der Kosten und Fehlmengenkriterien vorgenommen werden, die Informationen zur Abwägung beschaf-

fungspolitischer Entscheidungen bietet. Die Variation des Risikoaversionsgrades wird dabei über den Gewichtungsfaktor ω^- ($\omega^- = 1, \dots, 500$) mit Hilfe einer Ceteris-Paribus-Betrachtung der anderen Parameter ausgedrückt.

Im Rahmen der Untersuchung zeigen sich die folgenden Tendenzen. Wie in der einkriteriellen Betrachtung schon angedeutet, steigen die drei kostenorientierten Kriterien mit steigendem Risikoaversionsgrad an (vgl. Abbildung 21). Beim Vergleich fällt auf, dass die Verläufe unterschiedliche Steigungen aufweisen und keinen linearen Zusammenhang darstellen. Die Gesamtkosten wachsen um 9,5 % von 456.411 GE auf 499.638 GE, um dem höheren Sicherheitsbedürfnis gerecht zu werden. Die Transportkosten steigen insgesamt um 9,8 % und die Bestellkosten um 9,4 %, wobei alle drei Kriterien von $\omega = 137$ bis $\omega = 269$ und ab $\omega = 392$ auf identischem Niveau verbleiben¹⁾. In diesen Bereichen verhalten sich die Kosten unabhängig von der Risikoeinstellung, so dass die Entscheidungen des Planers hier rein basierend auf den Bedarfsverletzungen getroffen werden können.

1) Die Kosten scheinen im Bereich von $\omega = 0$ bis $\omega = 90$ horizontal zu verlaufen. Dies ist jedoch der Skalierung der Graphik geschuldet. Bei detaillierter Betrachtung wird eine allmähliche Zunahme der Kosten deutlich.

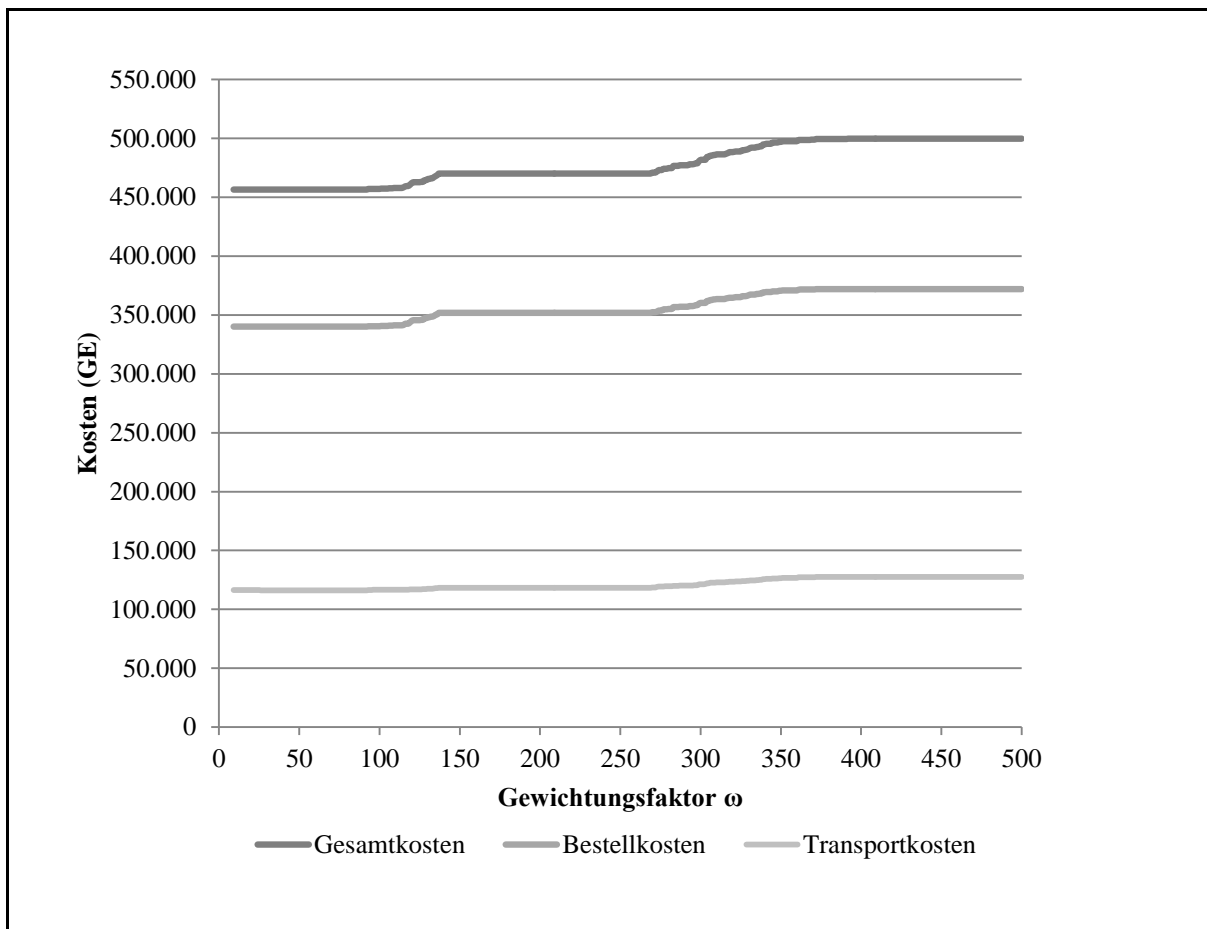


Abbildung 21: Kosten der robusten Modellierung in Abhängigkeit von der Risikoeinstellung

Im Vergleich zu den Kosten fallen die Maße zur Darstellung der Bedürfniserfüllung mit steigender Risikoaversion (vgl. Abbildung 22). Die absolute Fehlmenge wird von 165,4 ME auf 0 ME reduziert. Auch in dieser Abbildung zeigt sich, dass kein lineares Verhältnis zwischen Risikoeinstellung und Fehlmengen vorliegt: Die Fehlmengen weisen einen partiell horizontalen Verlauf auf, bei dem wiederum die Gesamtkosten als Entscheidungskriterium genügen. Daher rückt eine simultane Betrachtung beider Graphen ins Zentrum des Interesses.

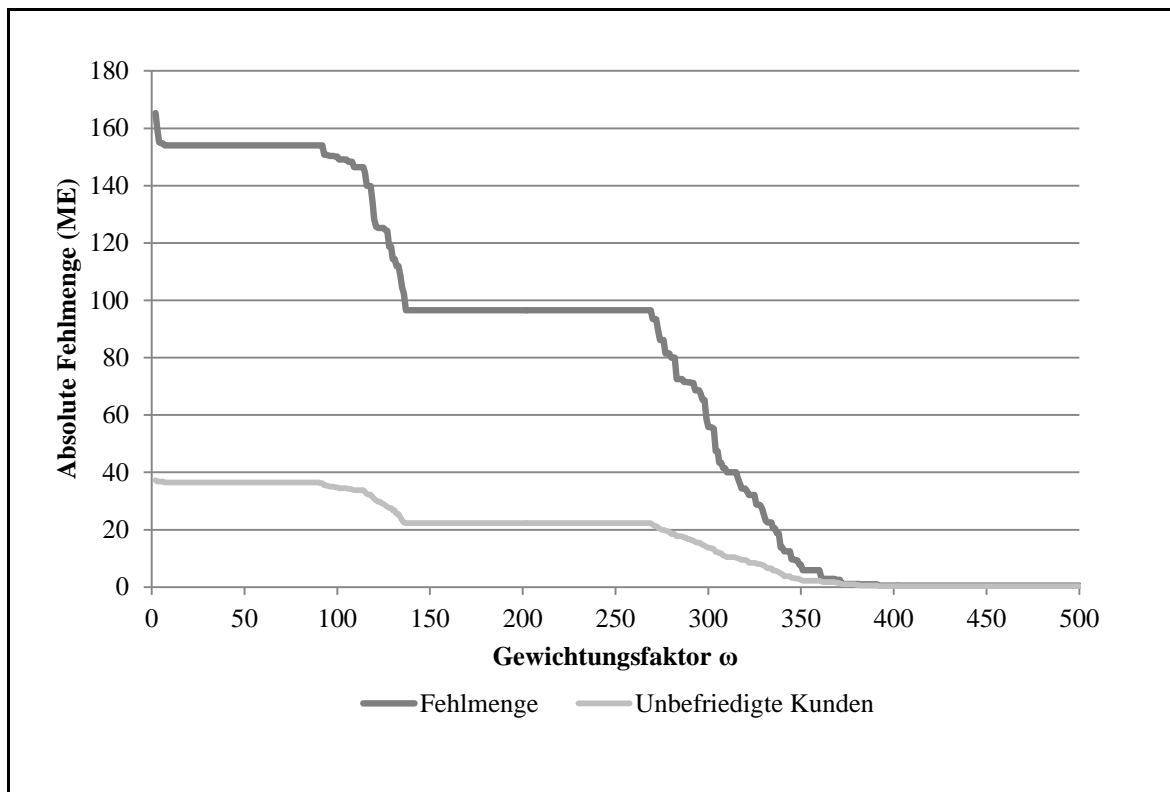


Abbildung 22: Fehlmengen der robusten Modellierung in Abhängigkeit von der Risikoeinstellung

Werden die Gesamtkosten als Maß der Optimalitätsrobustheit und die absolute Fehlmenge als Indikator für die Zulässigkeitsrobustheit zu einer Abbildung verbunden, kann der Planer direkt die für ihn günstige Kombination ablesen und die verschiedenen Bereiche des Einflusses der Risikoeinstellung quantifizieren (vgl. Abbildung 23). Es ist zu bemerken, dass der Schnittpunkt der beiden Linien mit Vorsicht zu interpretieren ist, da die unterschiedlichen Achsenbezeichnungen keine analytische Break-Even-Beziehung zulassen. Auf der Grundlage der Ergebnisgraphik lassen sich sechs markante Bereiche des Einflusses der Risikoeinstellung identifizieren:

- I. Im Bereich von $\omega = 1$ bis $\omega = 5$ ist eine starke Sensitivität der Ergebnisse in Bezug auf die Risikoeinstellung zu beobachten.
- II. Eine leichte Abhängigkeit der Ergebnisse von der Risikoeinstellung kann im Bereich von $\omega = 6$ bis $\omega = 90$ konstatiert werden, in dem geringfügige Änderungen der Lösungswerte bei Variation des Parameters erzielt werden.

- III. Dieser Bereich ist gefolgt von einem Bereich ($\omega = 91$ bis $\omega = 137$) der starken Veränderung der Lösung bei Variation des Gewichtungsfaktors, der durch schnell sinkende bzw. steigende Kurven gekennzeichnet ist.
- IV. Von $\omega = 138$ bis $\omega = 269$ verlaufen beide Linien parallel zur Abszissenachse auf einem konstanten Niveau. In diesem Bereich ist also keine Abhängigkeit der Lösung von der Risikoeinstellung gegeben.
- V. Hierauf folgt erneut ein Bereich der starken Sensitivität gegenüber der gewählten Risikoeinstellung ($\omega = 270$ bis $\omega = 392$).
- VI. Abschließend erreichen beide Funktionen ihr Maximum bzw. Minimum und weisen ab $\omega = 392$ konstante Werte auf. Hier zeigt sich keine Abhängigkeit von der Risikoeinstellung mehr¹⁾.

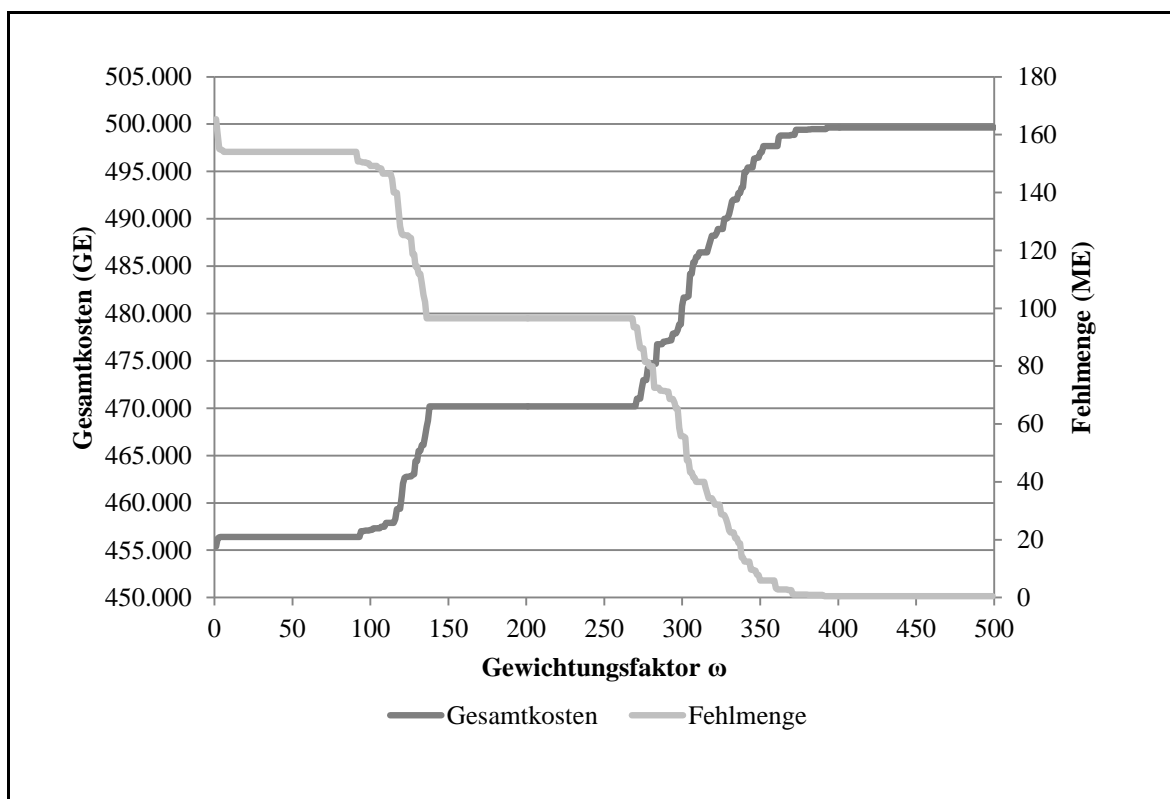


Abbildung 23: Abwägung von Optimalitäts- und Zulässigkeitsrobustheit in Abhängigkeit von der Risikoeinstellung

1) Bei Berechnung der Ergebnisse wurde ω von 0 bis 2.500 variiert. Da sich ab $\omega = 392$ keine Veränderungen der Lösung ergeben, wird auf die Darstellung für Werte $\omega \geq 500$ verzichtet.

Der Planer kann also mit Hilfe dieses Diagramms eine quantifizierte Abwägung der Kosten und der Fehlmengen bei verschiedenen Risikoeinstellungen vornehmen.

Die dargestellten Zusammenhänge und Möglichkeiten zur Entscheidungsunterstützung können für jede untersuchte Periode in jedem Szenario berechnet und untersucht werden. In dieser Arbeit wird jedoch auf eine detaillierte Darstellung der anderen Monate verzichtet, da diese nicht zu einem weiteren Verständnis der Zusammenhänge beitragen.

Die bisherigen Untersuchungen geben jedoch keinen Aufschluss darüber,

- ob bzw. in welchem Ausmaß sich die Schwankungen der verschiedenen analysierten Merkmale auf die Optimalitäts- und Zulässigkeitsrobustheit der Lösung auswirken (Lösungsqualität), und
- in welcher Weise die Wahl der Risikoeinstellung Einfluss auf die Lösungen der verschiedenen Konstellationen nimmt (Lösungssensitivität).

Um diese Fragen zu beantworten, bietet es sich an, eine konstellationsübergreifende Analyse der Ergebnisse vorzunehmen.

5.2.2 Konstellationsübergreifende Untersuchung

Die Ergebnisse der übergreifenden Analyse der sechs definierten Konstellationen werden anhand der drei Merkmale *Bedarfsschwankungen*, *Anteil unsicherer Aufträge* und *Schwankungen des Transportkostenfaktors* betrachtet. Da die Konstellationen durch die verschiedenen Ausprägungskombination nicht vollständig nach steigender Unsicherheit geordnet werden können und der Einfluss der einzelnen Merkmale von besonderem Interesse für die Ergebnisauswertung ist, wird deutlich, dass die folgenden Entwicklungen einer detaillierten Untersuchung zu unterziehen sind:

- die gleichzeitige Zunahme der Unsicherheit in allen drei Merkmalen,
- die Zunahme der Unsicherheit in den Bedarfsmengen (B),
- die Zunahme der Unsicherheit des Anteils unsicherer Aufträge (A) und
- die Zunahme der Unsicherheit in den Transportkosten (T).

Hierfür sind die Konstellationen nach steigender Unsicherheit des jeweiligen Merkmals zu ordnen, so dass Tendenzaussagen bezüglich der Lösungsqualität bzw. -sensitivität getroffen werden können. Im Hinblick auf

die Lösungen der robusten Modellierung ist zwischen verschiedenen Risikoereinstellungen zu unterscheiden, wobei der Schwerpunkt zunächst auf die Gewichtungsfaktoren $\omega = 250$ für leichte Risikoaversion und $\omega = 500$ für starke Risikoaversion gelegt wird.

5.2.2.1 Simultane Schwankungen der Merkmale

Durch Betrachtung der simultanen Unsicherheitserhöhung aller drei Merkmale können generelle Verhaltensweisen der Lösung bezogen auf ihre Qualität und ihre Sensitivität veranschaulicht werden. Hierfür sind die folgenden Konstellationen von Interesse für die Ergebnisanalyse:

- Die Konstellation [B1, A1, T1] repräsentiert geringe Änderungen aller Merkmale.
- Mittlere Schwankungen werden durch die Konstellation [B2, A2, T2] dargestellt.
- Starke Änderungen sind in Konstellation [B3, A3, T3] abgebildet.

Zunächst sollen die Auswirkungen der Zunahme der Schwankungen (d. h. der Unsicherheit) in den drei Konstellationen auf die Optimalität und die Zulässigkeit der Lösung mit Hilfe ausgewählter Kriterien untersucht werden. Hierfür werden die Gesamtkosten sowie die Fehlmengen in den zwölf Monaten kumuliert für die leichte (vgl. Abbildung 24) und die starke (vgl. Abbildung 25) Risikoaversion abgetragen.

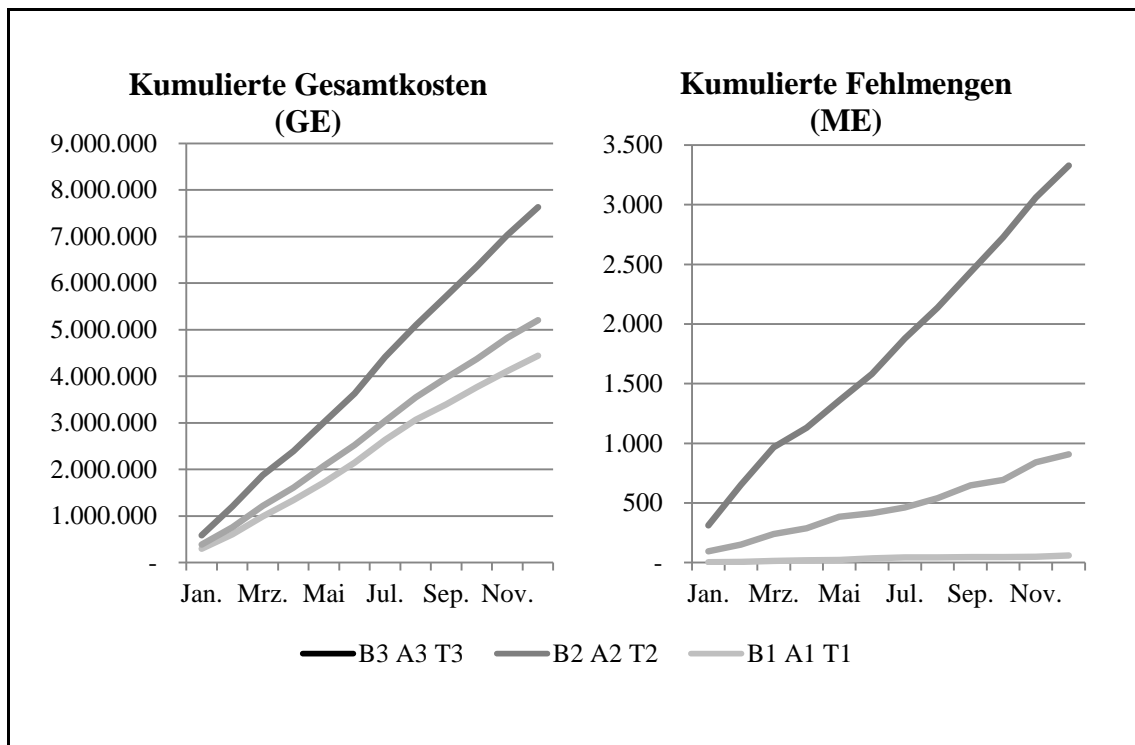


Abbildung 24: Auswirkungen der steigenden Unsicherheit auf die Optimalität und die Zulässigkeit der robusten Lösungen mit leichter Risikoaversion

In diesem Zusammenhang wird deutlich, dass die Kosten monoton ansteigen, wobei bei geringen Änderungen (Konstellation [B1, A1, T1]) ein flacherer Anstieg zu beobachten ist als bei starken Schwankungen (Konstellation [B3, A3, T3]). So entsteht der für die Konstellationsanalyse typische Trichter.

Insbesondere von Interesse ist die unsicherheitsinduzierte Zunahme der Fehlmengen über die Konstellationen. Hierbei werden bei leichter Risikoaversion noch insgesamt 3.329 ME für die hohen Schwankungen bzw. 907 ME für die mittleren Schwankungen realisiert. Für die geringen Schwankungen ist bei beiden Aversionsgraden von nur marginalen Fehlmengen (59 bzw. 0 ME) auszugehen. Die Lösung mit starker Risikoaversion beinhaltet für die mittleren Schwankungen eine fast vollständige Reduktion der Fehlmengen auf 7 ME. Für die Konstellation mit starken Schwankungen kann die Lösung bei starker Risikoaversion zwar eine deutliche Verringerung vornehmen, die entstehenden Fehlmengen von 62 ME sind jedoch trotzdem deutlich ersichtlich.

Über die Konstellationen hinweg kann die robuste Optimierung mit starker Risikoaversion zu einer deutlichen Reduktion der Fehlmengen bei verhältnismäßig geringen Kosten beitragen.

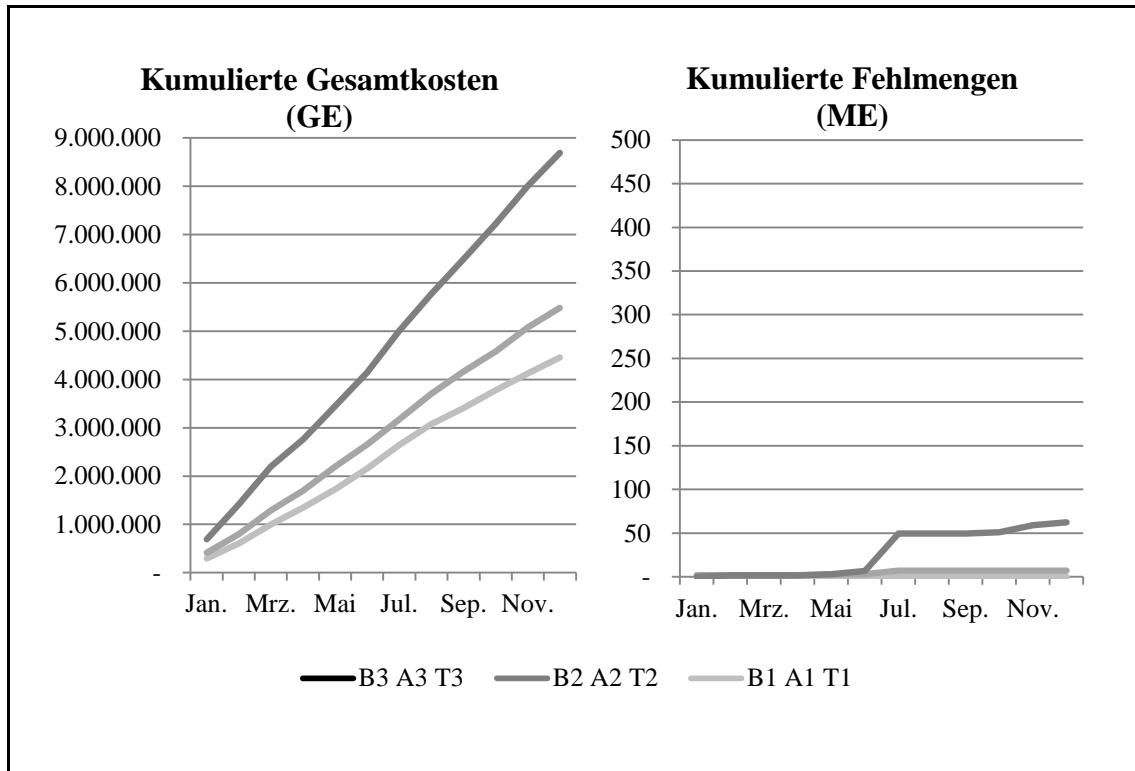


Abbildung 25: Auswirkungen der steigenden Unsicherheit auf die Optimalität und die Zulässigkeit der robusten Lösungen mit starker Risikoaversion

Nach dieser Analyse der Lösungsqualität ist weiterhin zu untersuchen, welchen spezifischen Einfluss der Grad der Risikoaversion auf die Lösungen der Konstellationen ausübt. Hierfür können verschiedene aufeinander aufbauende Darstellungsweisen gewählt werden. Zunächst werden am Beispiel des Monats Mai die Gesamtkosten sowie die Fehlmengen für die leichte und die starke Risikoaversion sowie die Lösung des deterministischen Modells vergleichend gegenübergestellt (vgl. Abbildung 26).

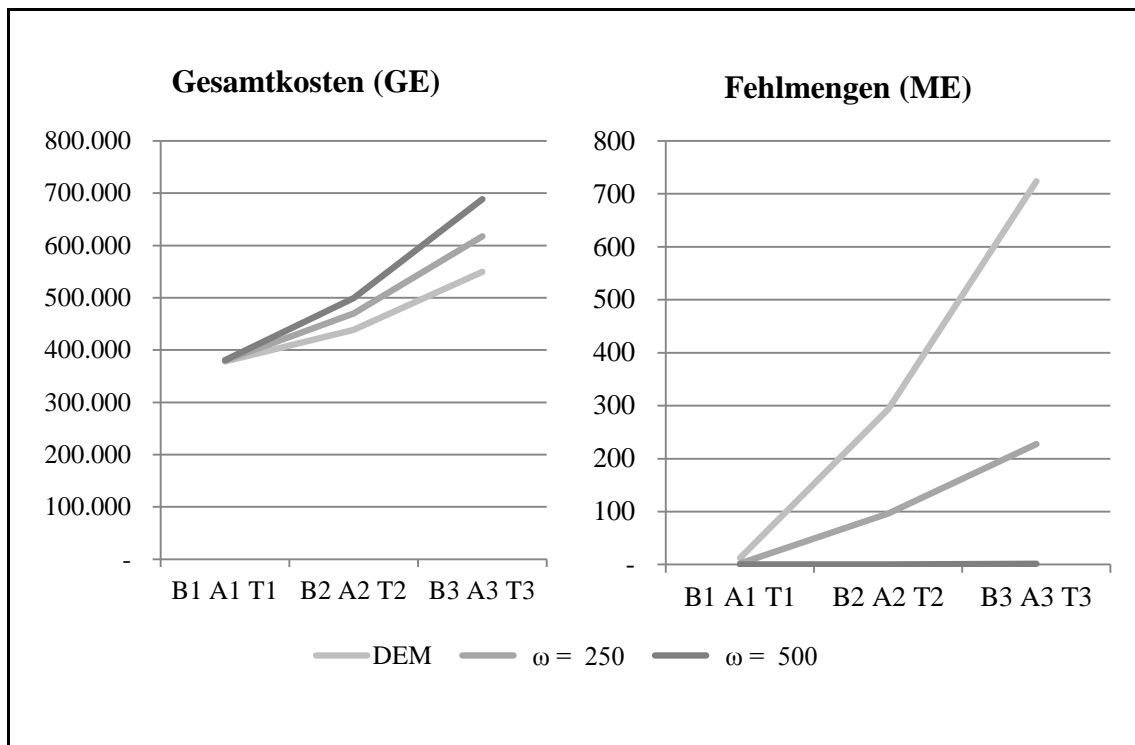


Abbildung 26: Auswirkungen der Risikoeinstellung auf die Optimalität und die Zulässigkeit der robusten Lösungen in den verschiedenen Konstellationen

Es fällt auf, dass die höchsten Kosten und gleichzeitig die geringsten Fehlmengen bei der starken Risikoaversion ($\omega = 500$) anfallen. Gleichzeitig ist in dieser Risikoeinstellung auch die höchste Steigung der Kostengeraden zu beobachten, d. h. mit der Höhe der Schwankungen wachsen die Gesamtkosten überproportional. Ein identischer Effekt gilt für Entwicklung der Fehlmengen für die Lösung des deterministischen Ersatzwertmodells und der leichten Risikoaversion.

Diese generellen Tendenzen gilt es detailliert zu untersuchen. Dafür können analog zur mehrkriteriellen Betrachtung Gesamtkosten- und Fehlmengenentwicklungen bei zunehmender Risikoaversion simultan für die drei Konstellationen betrachtet werden. Dafür wird der Gewichtungsfaktor ω in Abbildung 27 von 0 bis 500 variiert.

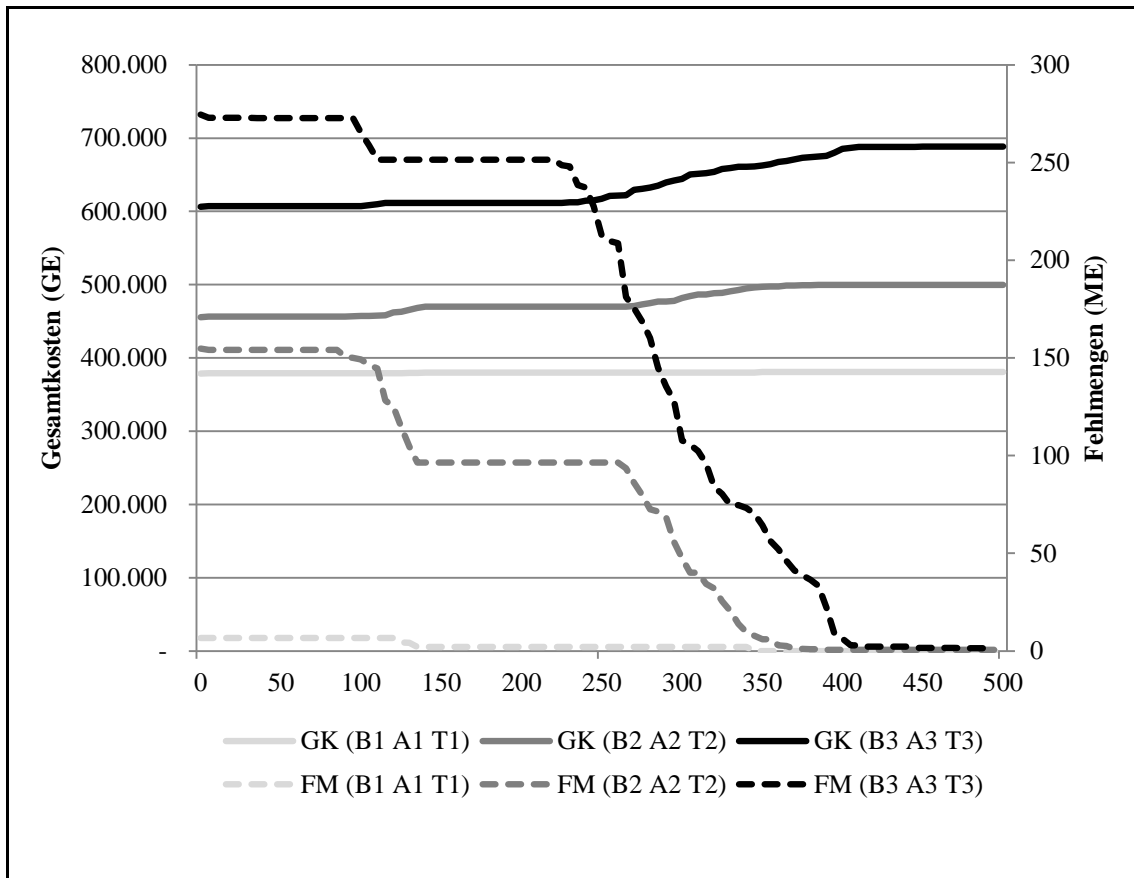


Abbildung 27: Detaillierte Betrachtung der Auswirkungen der Risikoeinstellung auf die Optimalität (Gesamtkosten, GK) und die Zulässigkeit (Fehlmengen, FM) der robusten Lösungen in den verschiedenen Konstellationen

Die Verläufe der Gesamtkosten- und Fehlmengenfunktionen haben gemeinsam, dass sie zur Abszissenachse parallele Bereiche aufweisen. Diese Bereiche beginnen und enden je nach Konstellation an unterschiedlichen Punkten, die jedoch gleichzeitig für die Fehlmengen- und die Gesamtkostenlinie gelten. Darüber hinaus ist festzustellen, dass geringere Schwankungen mit einer geringeren Sensitivität der Lösung gegenüber der Risikoeinstellung einhergehen et vice versa. Dies führt dazu, dass bei starken Schwankungen hohe Kostensenkungsmöglichkeiten durch riskantere Entscheidungen und hohe Fehlmengensenkungen durch weniger riskante Entscheidungen realisiert werden können.

Eine übersichtliche und pointierte Darstellung des Sachverhalts kann im Rahmen eines Gesamtkosten-Fehlmengen-Diagramms erzielt werden (vgl.

Abbildung 28), das die Variation der Risikoeinstellung $\omega^- = 0, \dots, 500$ zur Berechnung der verschiedenen dominanten (und damit optimalen) Gesamtkosten-Fehlmengen-Punkte für jede Konstellation nutzt. Die Konzentration der verschiedenen optimalen Lösungen wird durch die Häufung der Markierung auf den Linien veranschaulicht. Es zeigt sich, dass die höchsten Kosten mit den geringsten Fehlmengen bei der höchsten Risikoaversion et vice versa entstehen.

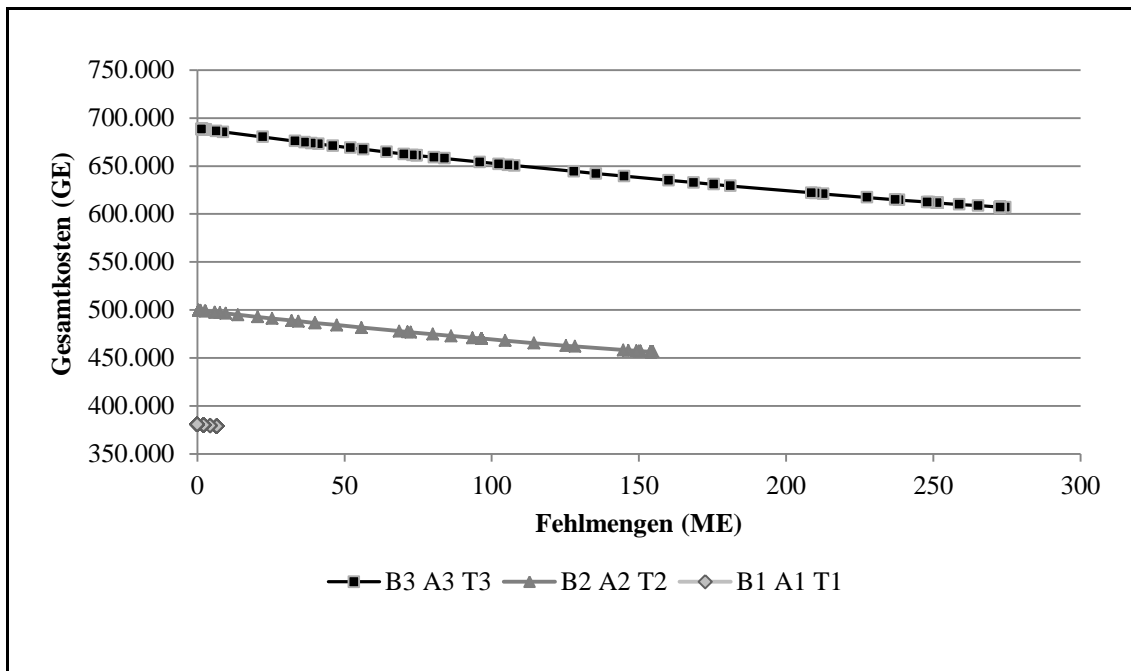


Abbildung 28: Einfluss der Höhe der steigenden Unsicherheit auf die Möglichkeiten zur Kostensenkung

Es wird jedoch auch deutlich, dass die verschiedenen Konstellationen und somit die verschiedenen Unsicherheitsgrade einen Einfluss auf die Möglichkeiten zur Kosten- bzw. Fehlmengenreduktion ausüben. Bei der Konstellation mit starken Schwankungen aller drei Merkmale können die Kosten um 12 % von 688.540 GE auf 607.134 GE gesenkt werden. Dies entspricht einer Steigerung der Fehlmengen von 1,5 ME auf 275 ME und wird durch eine vergleichsweise lange und steil fallende Kurve dargestellt. In der Konstellation mit mittleren Schwankungen kann eine Reduktion der Kosten um 8,6 % von 499.638 GE auf 456.407 GE erreicht werden, während die Fehlmengen von 0,5 ME auf 155 ME steigen. Die Kurve der zweiten Konstellation ist etwas kürzer und flacher fallend. Bei der Konstellation der geringen Schwankungen wird eine sehr kurze, sehr flache Kurve dargestellt,

die Kostensenkungen von 380.784 GE auf 378.895 GE (0,5 %) und eine Fehlmengensteigerung von 0 ME auf 7 ME abbildet.

In der Gesamtsicht kann konstatiert werden, dass die Möglichkeiten zur Kostensenkung mit der Stärke der Unsicherheiten zunehmen, wobei sie im Gesamtkosten-Fehlmengen-Diagramm anhand der folgenden Merkmale definiert werden können:

- die *Länge* der Kurve gibt die minimal und maximal zu realisierenden Fehlmengen und Gesamtkosten und somit das Spektrum der Variation an und
- die *Steigung* der Kurve stellt die Stärke der gegenseitigen Abhängigkeit einer Erhöhung bzw. Verringerung der Kriterien dar.

Die dargestellten Möglichkeiten zur Interpretation bieten dem Planer eine Entscheidungsunterstützung im Rahmen der konstellationsabhängigen Veränderung der Lösungsqualität sowie der Lösungssensitivität. Insbesondere die Darstellung der Auswirkungen einer Unsicherheitserhöhung auf die Optimalität und auf die Zulässigkeit der Lösung sowie das Gesamtkosten-Fehlmengen-Diagramm können zur weiteren Analyse des merkmalspezifischen Einflusses auf die Lösung genutzt werden.

5.2.2.2 Singuläre Schwankungen einzelner Merkmale

5.2.2.2.1 Schwankungen des Bedarfs

Das Merkmal der Bedarfsschwankungen zielt auf die steigende Unsicherheit in der Nachfrage ab. Die Bedarfsschwankungen (B) können gering ($B \leq 5\%$), mittel ($5\% < B \leq 20\%$) und hoch ($B > 20\%$) ausfallen, so dass die folgenden Konstellationen von Interesse für die Ergebnisanalyse sind:

- Die Konstellation [B1, A1, T1] ist durch geringe Änderungen aller Merkmale gekennzeichnet.
- Starke Nachfrageschwankungen bei geringen Ausprägungen der anderen beiden Merkmale werden durch Konstellation [B3, A1, T2] dargestellt.

Um die Änderungen der Lösungsqualität im Hinblick auf die zwei genannten Konstellationen aufzuzeigen, werden zunächst die Gesamtkosten und

die Fehlmengen für zwölf Monate kumuliert für die leichte (vgl. Abbildung 29) und die starke (vgl. Abbildung 30) Risikoaversion dargestellt.

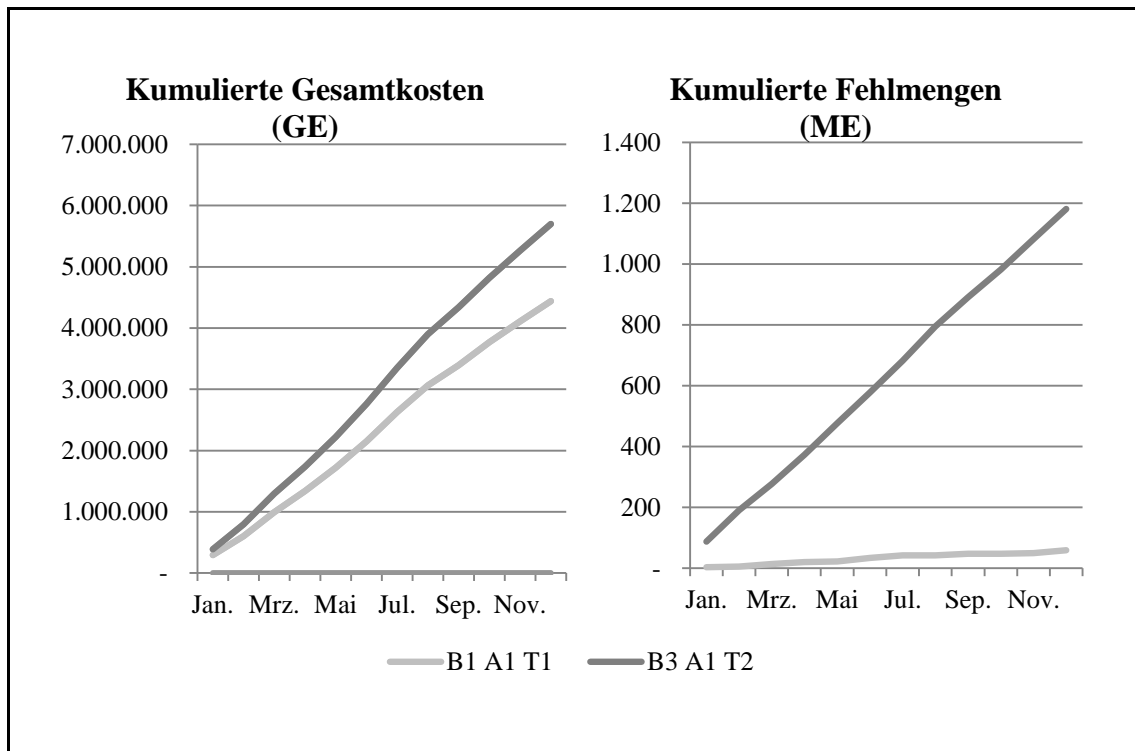


Abbildung 29: Auswirkungen der Bedarfsschwankungen auf die Optimalität und die Zulässigkeit der robusten Lösungen mit leichter Risikoaversion

Auffällig ist insbesondere, dass bei Zugrundelegung einer leichten Risikoaversion die Gesamtkosten stark ansteigen, wobei die Kostenunterschiede zwischen den zwei Konstellationen im Vergleich zur starken Risikoaversion geringe Ausprägungen aufweisen. Die Fehlmengen und auch die Diskrepanz der Steigungen der Fehlmengenfunktionen sind bei der leichten Risikoaversion deutlich stärker ausgeprägt. Im Hinblick auf die starke Risikoaversion kann von lediglich geringfügigen Fehlmengen in beiden Konstellationen ausgegangen werden.

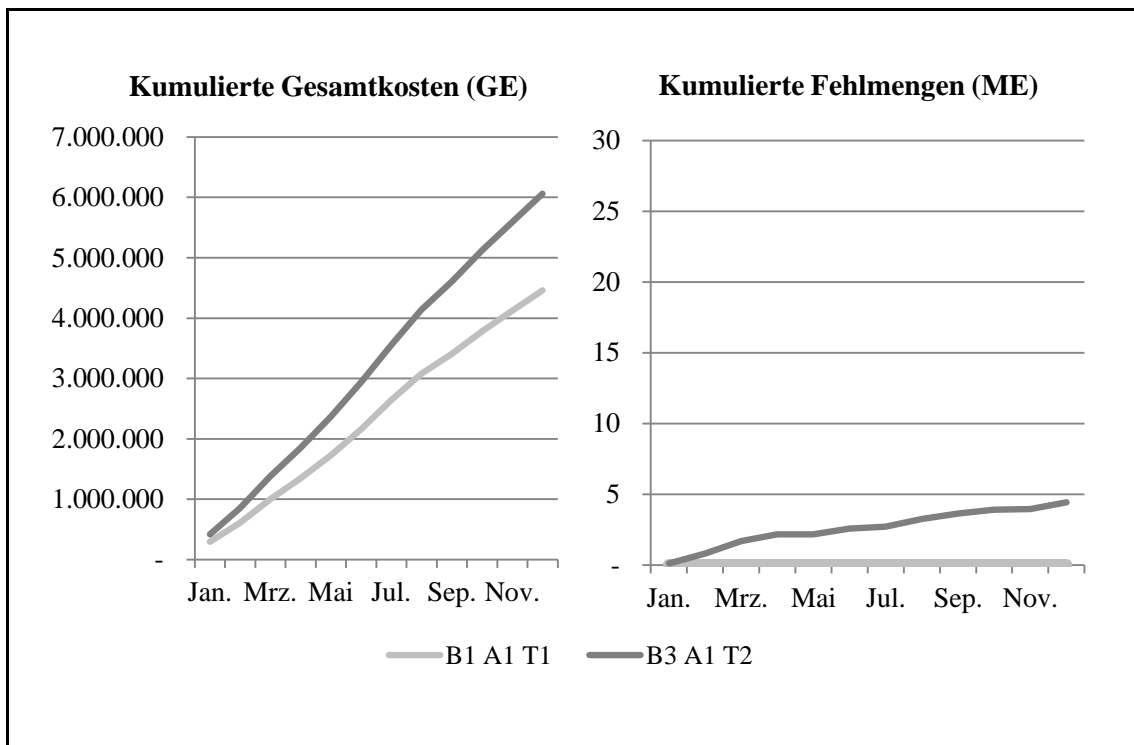


Abbildung 30: Auswirkungen der Bedarfsschwankungen auf die Optimalität und die Zulässigkeit der robusten Lösungen mit starker Risikoaversion

Im Rahmen der Analyse der Lösungssensitivität kann das folgende Gesamtkosten-Fehlmengen-Diagramm zugrunde gelegt werden, das für die Konstellation mit geringen Bedarfsschwankungen eine Kostensenkung von 380.784 GE auf 378.895 GE und eine Fehlmengenerhöhung von 0 ME auf 7 ME abträgt (vgl. Abbildung 31). Für die zweite Konstellation mit hohen Bedarfsschwankungen werden die Fehlmengen von 0 ME bis 126 ME und die Gesamtkosten von 517.412 GE bis 481.016 GE variiert.

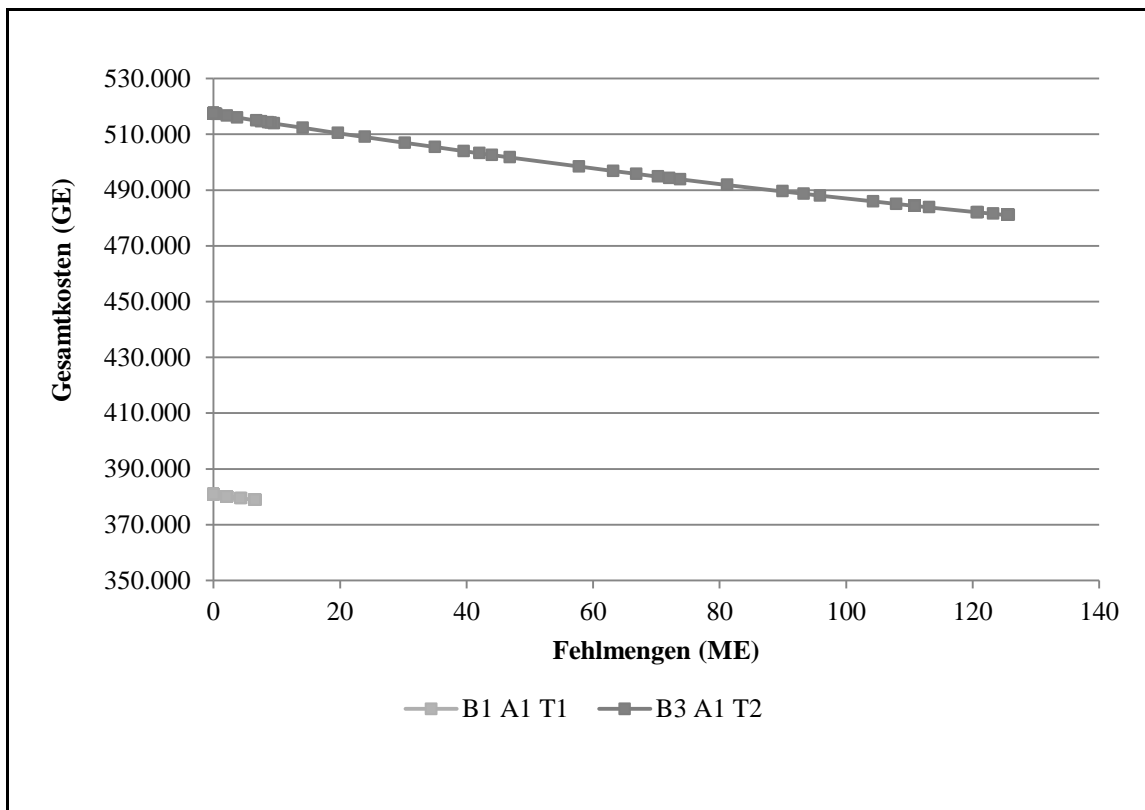


Abbildung 31: Einfluss der Höhe der Bedarfsschwankungen auf die Möglichkeiten zur Kostensenkung

Im Vergleich ist ein hoher Unterschied in der Länge und Steigung der beiden konstellationsbezogenen Graphen zu verzeichnen. Die Erhöhung der Schwankungen des Merkmals *Bedarfsschwankungen* geht demnach mit vergleichsweise starkem Einfluss auf die Lösungsqualität und -sensitivität einher.

5.2.2.2.2 Schwankungen des Anteils unsicherer Aufträge

Der Anteil unsicherer Aufträge (A) wird ebenfalls in drei Ausprägungen unterteilt, die in geringe Schwankungen ($A \leq 5\%$), mittlere Schwankungen ($5\% < A \leq 50\%$) und hohe Schwankungen ($A > 50\%$) eingeteilt werden. Zur Analyse des Merkmals können die folgenden Konstellationen herangezogen werden:

- In der Konstellation [B3, A1, T2] sind nur geringe Schwankungen des Anteils unsicherer Aufträge enthalten.

- Zur Gegenüberstellung dient dann die Konstellation [B3, A3, T1], die von hohen Schwankungen des Merkmals ausgeht.

Durch eine analoge Vorgehensweise lässt sich dann der Einfluss der Konstellation auf die Gesamtkosten und die Fehlmengen ermitteln, um dann die Lösungsqualität und -sensitivität zu analysieren.

Die Abbildungen 32 und 33 zeigen die Lösungsqualität anhand der Kriterien der kumulierten Gesamtkosten und der kumulierten Fehlmengen für eine leichte und eine starke Risikoaversion.

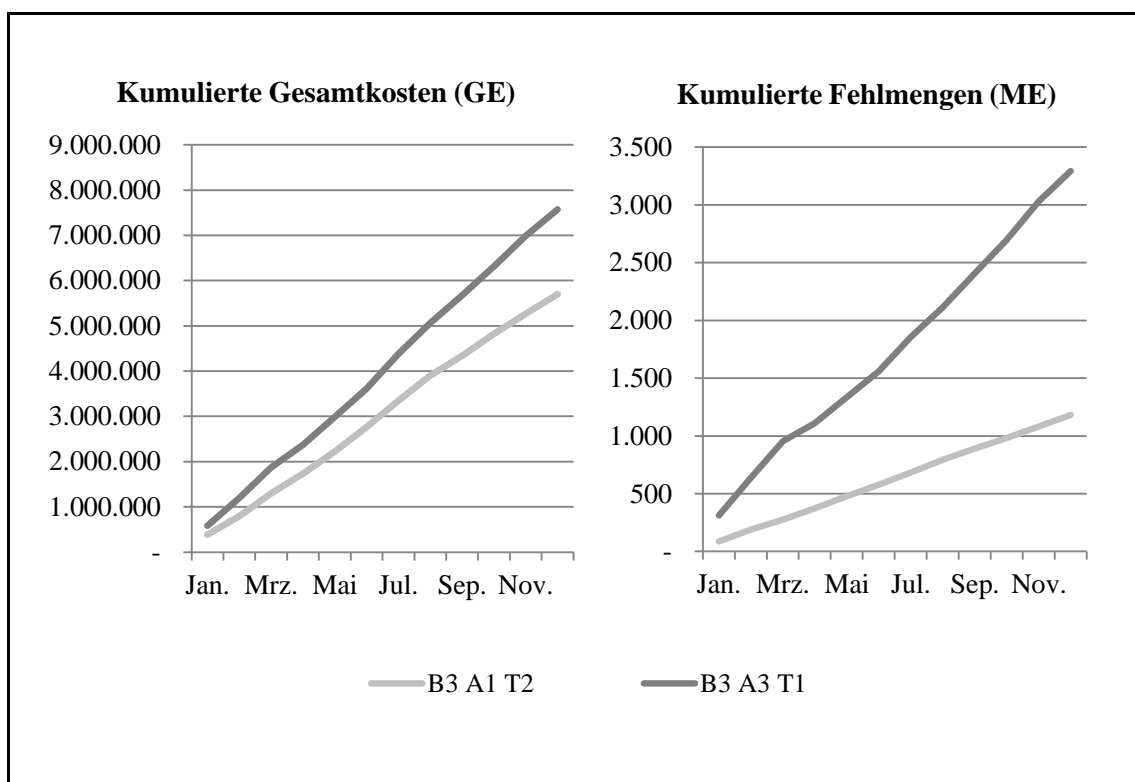


Abbildung 32: Auswirkungen der Bedarfsschwankungen auf die Optimalität und die Zulässigkeit der robusten Lösungen mit leichter Risikoaversion

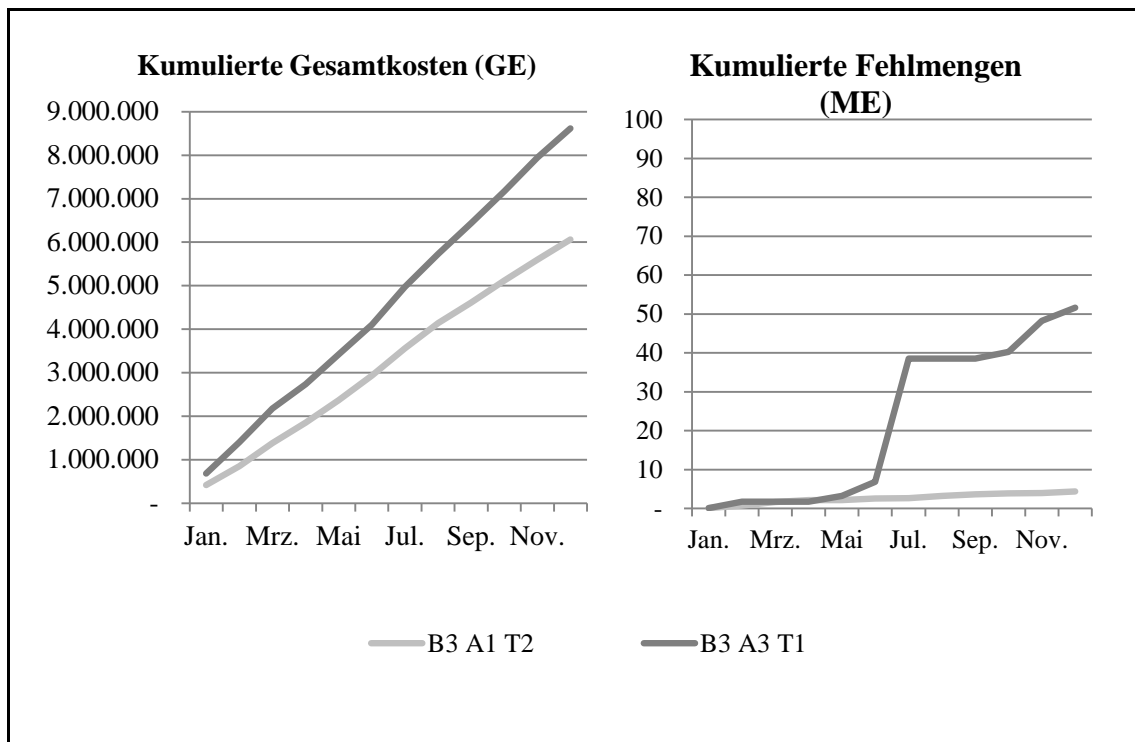


Abbildung 33: Auswirkungen der Bedarfsschwankungen auf die Optimalität und die Zulässigkeit der robusten Lösungen mit starker Risikoaversion

Es wird deutlich, dass in der Lösung mit leichter Risikoaversion deutlich höhere Fehlmengen anfallen, wobei die Fehlmengen auch in der Lösung mit starker Risikoaversion nicht vollständig vermieden werden können. Dieser Sachverhalt liegt ebenfalls in der hohen Schwankung der Bedarfsmengen begründet. Für die Konstellation mit starken Schwankungen des Anteils unsicherer Aufträge verläuft die Gesamtkostenfunktion deutlich oberhalb der Funktion für die Konstellation mit schwachen Schwankungen. Die Diskrepanz zwischen den beiden Kostenfunktionen bleibt bei beiden Risikoeinstellungen annähernd gleich.

Neben dieser Einschätzung der Lösungsqualität kann anhand des Gesamtkosten-Fehlmengen-Diagramms auch die Lösungssensitivität gegenüber Änderungen der Risikoeinstellung abgebildet werden (vgl. Abbildung 34).

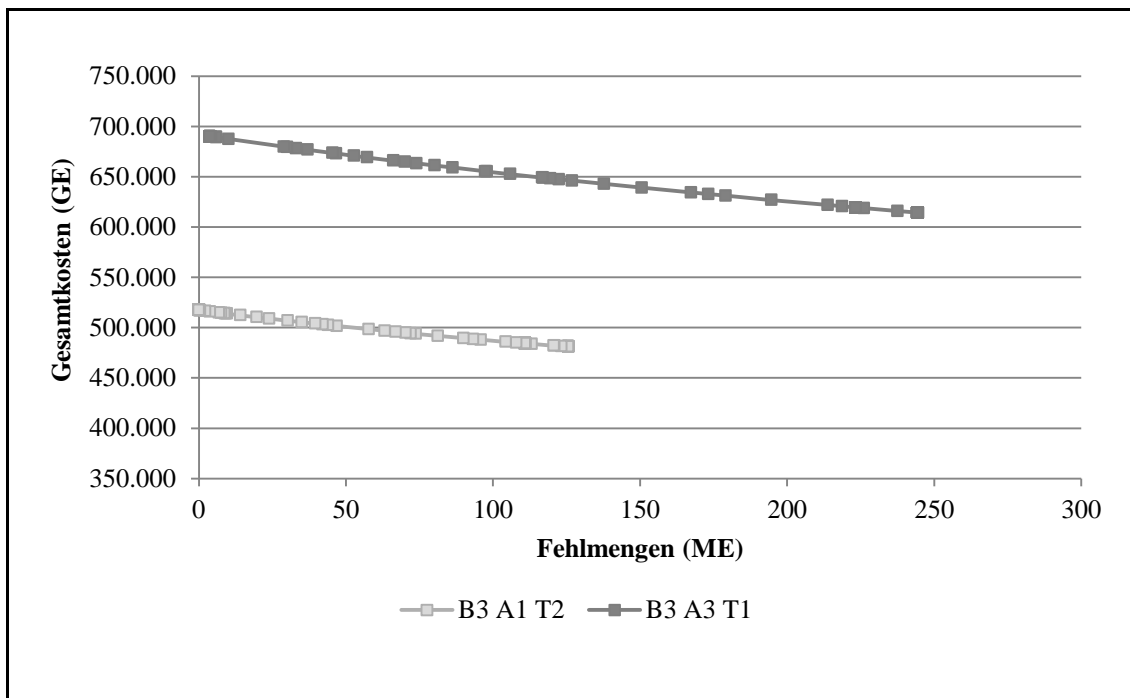


Abbildung 34: Einfluss der Höhe der Bedarfsschwankungen auf die Möglichkeiten zur Kostensenkung

Hierbei fällt auf, dass beide Linien einen vergleichsweise steilen Verlauf aufweisen. Für die Konstellation mit geringen Schwankungen des Anteils unsicherer Aufträge können Kostensenkungen von 517.412 GE auf 481.016 GE bei einer Fehlmengenerhöhung von 0 ME auf 126 ME realisiert werden. Demgegenüber können in der Konstellation mit den höheren Schwankungen die Kosten von 690.089 GE auf 614.229 GE reduziert werden, wobei die Fehlmengen von 3,6 ME auf 244 ME steigen würden. Diese zweite Linie weist eine wesentlich geringere Länge auf als die erste. Die Erhöhung der Schwankungen des Anteils der unsicheren Aufträge ist daher ebenfalls mit einem starken Einfluss auf die Lösungsqualität und -sensitivität verbunden.

5.2.2.2.3 Schwankung des Transportkostenfaktors

Bezogen auf das Merkmal des Transportkostenfaktors (T) können schwache Schwankungen ($T \leq 1\%$), mittlere Schwankungen ($1\% < T \leq 3\%$) und hohe Schwankungen ($T > 3\%$) unterschieden werden. Zur Analyse des Merkmals bietet es sich an, die folgenden Konstellationen zu wählen:

- Während die Konstellation [B1, A1, T1] geringe Schwankungen aller Merkmale repräsentiert,
- werden hohe Schwankungen des Transportkostenfaktors durch die Konstellation [B1, A1, T3] dargestellt.

Die Analyse der Ergebnisse kann zunächst Aufschluss über die Auswirkungen der Konstellationen auf die Lösungsqualität geben. Hierfür werden in den Abbildungen 35 und 36 die kumulierten Gesamtkosten und Fehlmengen für zwei Risikoeinstellungen veranschaulicht. Dabei kann ungeachtet der Überschneidungen der Linien von ähnlichen Verläufen der kumulierten Fehlmengen der beiden Konstellationen ausgegangen werden, da die Abweichungen für die Untersuchung irrelevant geringe Höhen aufweisen.

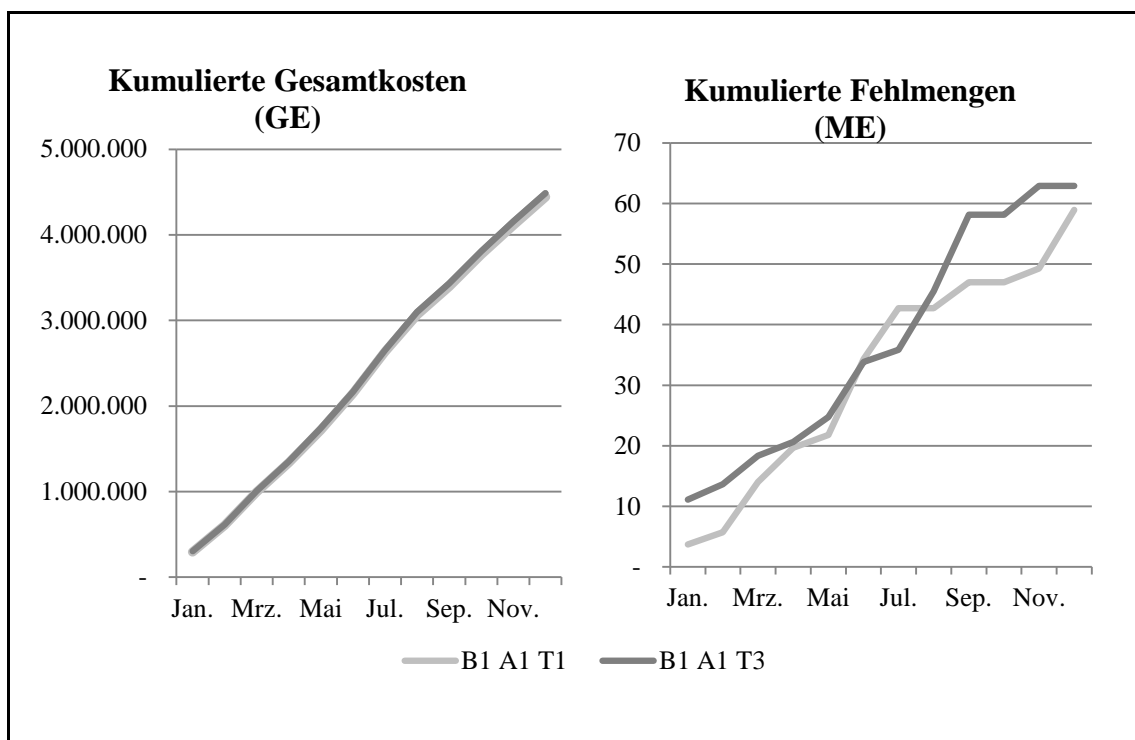


Abbildung 35: Auswirkungen der Bedarfsschwankungen auf die Optimalität und die Zulässigkeit der robusten Lösungen mit leichter Risikoaversion

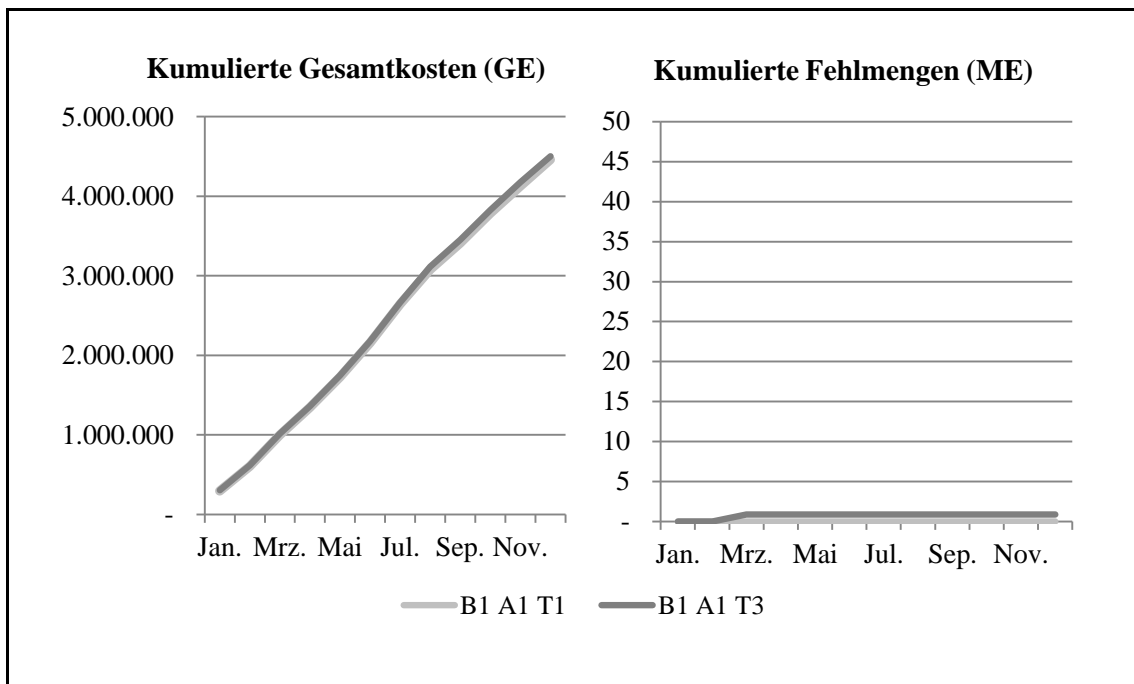


Abbildung 36: Auswirkungen der Bedarfsschwankungen auf die Optimalität und die Zulässigkeit der robusten Lösungen mit starker Risikoaversion

Im Vergleich der Lösungen für beide Konstellationen ergeben sich lediglich geringe Abweichungen der Gesamtkosten. Diese Beobachtung gilt für beide Risikoaversionsgrade. Im Hinblick auf die Fehlmengen sind für beide Konstellationen ähnliche Verläufe für beide Konstellationen zu erkennen, wobei die Fehlmengen bei hoher Risikoaversion nur noch in vernachlässigbar geringem Maße auftreten.

Der Einfluss der Schwankungen des Transportkostensatzes auf die Lösungsqualität kann folglich als gering eingeschätzt werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass das größte Schwankungsintervall von den Planern in der Praxis als $>3\%$ angegeben wurde. Im Vergleich zu den anderen zwei Merkmalen ist dies ein nur geringer Prozentsatz. Somit ist der Einfluss des Merkmals bezogen auf die Richtung (je höher die Schwankungen, desto höher die Kosten und Fehlmengen) mit den anderen Merkmalen vergleichbar, die Höhe kann jedoch anhand der angegebenen Konstellationen nur vorsichtig eingestuft werden.

Die Einschätzung der Sensitivität der Lösung der genannten zwei Konstellationen wird durch ein Gesamtkosten-Fehlmengeendiagramm ermöglicht (vgl. Abbildung 37).

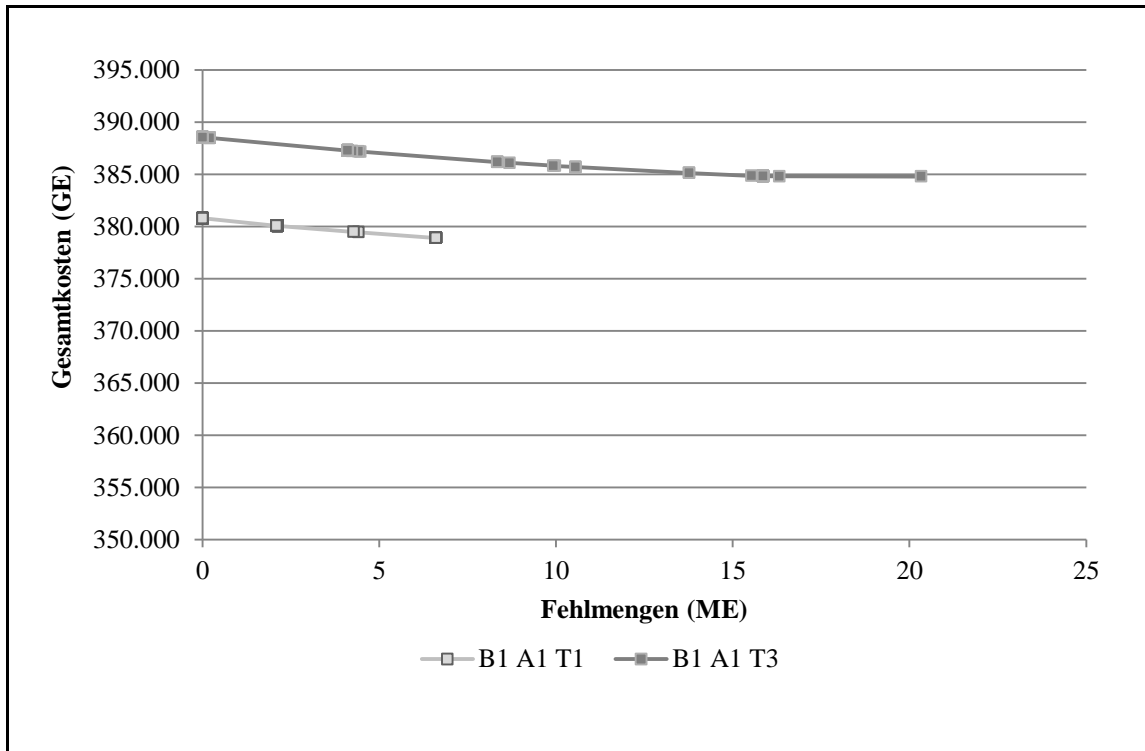


Abbildung 37: Einfluss der Höhe der Bedarfsschwankungen auf die Möglichkeiten zur Kostensenkung

Anhand der geringen Länge beider Graphen und der sehr flachen Steigung kann von einer geringen Sensitivität ausgegangen werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Kostensenkung bei großen Schwankungen des Transportkostensatzes nur von 388.552 GE auf 384.783 GE vorgenommen werden kann. Die Fehlermengen steigen hierbei lediglich von 0 ME auf 20 ME. Eine noch geringere Veränderung ist bei kleinen Schwankungen des Transportkostensatzes zu verzeichnen. Die Kosten können von 380.784 GE auf 378.895 GE gesenkt werden, wobei die Fehlermengen von 0 ME auf 7 ME steigen. Zudem ist zu beobachten, dass die Erhöhung der Schwankungen des Transportkostensatzes demnach mit geringem Einfluss auf Lösungsqualität und -sensitivität verbunden ist.

Insgesamt geht aus den Ergebnissen hervor, dass von der Erhöhung der Schwankungen der Merkmale *Bedarfshöhe* und *Anteil unsicherer Aufträge*

ein wesentlich stärkerer Einfluss auf die Lösungsqualität und -sensitivität ausgeübt wird als von dem Merkmal *Transportkostensatz*. Diese Effekte zeigen sich sowohl für die geringe als auch für die starke Risikoaversion.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die dargestellte Vorgehensweise zur Untersuchung verschiedener Merkmalsausprägung und Konstellationen wichtige Informationen zur Entscheidungsunterstützung in der Beschaffungsplanung liefert.

Da in der dargelegten Analyse (abgesehen vom Risikoaversionsgrad ω^-) von gegebenen Gewichtungsfaktoren für die robuste Optimierung ausgegangen wird, stellt sich die Frage nach dem Effekt der Variation aller Gewichtungsfaktoren. In diesem Zusammenhang bietet es sich an, eine Analyse der Parametrisierung der robusten Modellierung vorzunehmen.

5.3 Parametrisierung

Die Modelle der robusten Optimierung sind parametrische Programme, wobei kein Mechanismus zur a-priori Spezifikation der Parameter angegeben werden kann¹⁾. Die Parametrisierung kann daher nur durch die Untersuchung der Auswirkungen von Parameteränderungen auf die Lösung einer konkreten Problemstellung vorgenommen werden.

Im Rahmen der Bestimmung der Parameterwerte für die robuste Optimierung in der Beschaffungsplanung werden folgende Gewichtungsfaktoren in die Analyse einbezogen:

- Über den Gewichtungsfaktor λ kann das Maß der Optimalitätsrobustheit im Vergleich zur Zulässigkeitsrobustheit gesteuert werden.
- Der Gewichtungsfaktor ω^- bewertet die Bestrafung negativer Abweichungen der gelieferten Mengen von den Kundenbedarfen.
- Die Bestrafung positiver Abweichungen der Liefermengen von den Kundenbedarfen wird über den Gewichtungsfaktor ω^+ bestimmt.

1) Vgl. Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995, S. 270); Vladimirov/Zenios (1997, S. 12.16).

5.3.1 Untersuchung des Einflusses der Parameter

Zur Darstellung der Zusammenhänge wird auf die Lösungen des Monats Mai in der Konstellation [B2, A2, T2] mit mittleren Schwankungen aller Merkmale zurückgegriffen, wobei eine umfassende Darstellung die in Tabelle 4 strukturierten vierdimensionalen Analysen enthält. Hierbei ist zu beachten, dass sich die Untersuchung auf je drei Ausprägungen des Parameters der vierten Dimension beschränkt, um die Anzahl an Abbildungen und damit die Komplexität der Analyse übersichtlich zu gestalten.

Variation von Applikate	ω^- und ω^+	ω^- und λ	ω^+ und λ
Gesamtkosten bzw. absolute Fehlmengen	bei $\lambda = 1$	bei $\omega^+ = 1$	bei $\omega^- = 1$
	bei $\lambda = 250$	bei $\omega^+ = 250$	bei $\omega^- = 250$
	bei $\lambda = 500$	bei $\omega^+ = 500$	bei $\omega^- = 500$

Tabelle 4: Varianten simultaner Parametervariation

5.3.1.1 Einfluss von positiven und negativen Abweichungen der Bedarfsmengen

Zunächst soll der Einfluss der Variation von negativen und positiven Abweichungen der Liefermenge von den Kundenbedarfen auf die Lösung der robusten Optimierung veranschaulicht werden. Hierfür sind die Verläufe beider Parameter für leichte, mittlere und starke Optimalitätsforderungen zu analysieren. Die Optimalitätsforderungen sind über den Gewichtungsfaktor ($\lambda \in \{1, 250, 500\}$) beschrieben, der als vierte Dimension der Darstellung von Relevanz ist. Die Berechnung ergibt die in Abbildung 38 enthaltenen Hyperebenen.

In der linken oberen Darstellung für ($\lambda = 1$) ist die Funktion der Gesamtkosten in Abhängigkeit des Gewichtungsfaktors für die negativen Bedarfsabweichungen (ω^-) identisch mit den in Kapitel 5.2.1.2 herausgestellten Abbildungen 21 und 23: Die sich abwechselnden steigenden bzw. horizontalen Bereiche entlang der ω^+ -Gesamtkosten-Ebene sind zu erkennen. Während in Abbildung 20 das Verhalten der Gesamtkosten im Hinblick auf die negativen Abweichungen für die Parameterwerte $\lambda = 1$ und $\omega^+ = 1$

durchgeführt wurde, ist ebenfalls eine Alterierung vorzunehmen, um ein umfassendes Bild des Einflusses der verschiedenen Parameter zu erhalten.

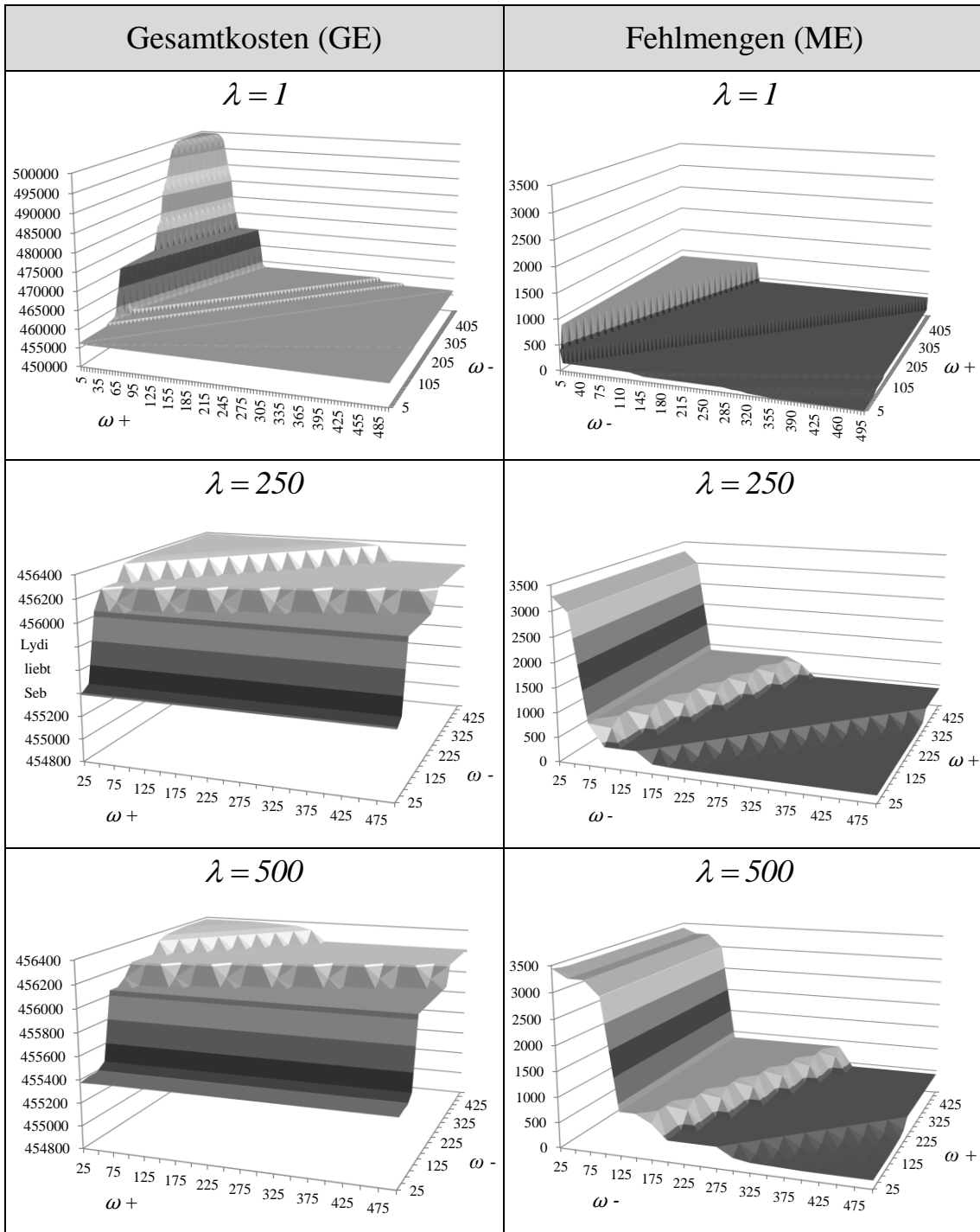


Abbildung 38: Einfluss der Gewichtungsfaktoren für positive und negative Abweichungen der Bedarfsmengen auf die Lösung der robusten Optimierung

Bei Betrachtung der entstehenden Hyperebene fallen in diesem Kontext folgende Sachverhalte auf:

- Bei Steigerung des Gewichtungsfaktors für negative Abweichung (ω^-) kann die Zunahme der Gesamtkosten konstatiert werden.
- Im Gegensatz hierzu weist der Verlauf der Ebene bei steigenden Werten für den Gewichtungsfaktor für positive Abweichungen von den Kundenbedarfen (ω^+) eine monoton negative Steigung auf. Je höher die positiven Abweichungen gewichtet werden, desto geringer sind die Gesamtkosten der Lösung.
- Hierbei ist keine Symmetrie in der Ebene erkennbar, d. h., die Parameter kompensieren und substituieren sich nicht vollständig.
- Die Hyperebene weist horizontale Flächen auf, so dass die Parameterkombinationen zu teilweise konstanten Werten der Gesamtkosten führen. Diese Flächen sind damit von Isokostenlinien begrenzt.
- Ferner wird bei sehr geringen Werten für ω^- und sehr hohen Werten für ω^+ unabhängig von dem jeweils anderen Parameter eine Fläche von konstanten, minimalen Applikatenwerten erreicht.
- Die maximalen Gesamtkosten entstehen bei sehr hohen Werten für ω^- und sehr geringen Werten für ω^+ . D. h., dass die starke Bestrafung von Unterbelieferungen (erwartungsgemäß) zu hohen Kosten führt.

Im Rahmen der Untersuchung der Ebene bei Erhöhung der geforderten Optimalitätsrobustheit kann für $\lambda = 250$ (links mittig in Abbildung 37) eine Verringerung des Lösungsraums beobachtet werden¹⁾, die mit einer deutlichen Verringerung des Kostenmaximums um 43.247 GE einhergeht. Die Gesamtkosten werden nur noch zwischen 456.390 GE und 455.390 GE variiert, wobei die maximalen Kosten bei deutlich geringerer (höherer) Ausprägung des Faktors ω^- (ω^+) erreicht werden. Darüber hinaus sind ähnliche Verhaltensweisen der Ebene wie in dem zuvor diskutierten Abbildungsteil erkennbar, so dass die Wahl der Parameter ω^- und ω^+ trotz erhöhter Forderung nach Optimalitätsrobustheit von Bedeutung für die Parametrisierung des robusten Modells bleibt.

1) Es ist zu bemerken, dass eine andere Skalierung für die Ebene gewählt wurde, da nur so die Entwicklungen der Gesamtkosten bei Variation der Parameter weiterhin erkennbar sind.

Bei einer Steigerung der Optimalitätsrobustheit auf $\lambda = 500$ kann wiederum eine Senkung des Gesamtkostenmaximums beobachtet werden, wobei der Unterschied lediglich 10 GE beträgt. Es ist daher zu schließen, dass zwar mit steigender Optimalitätsrobustheit eine Kostensenkung bei allen Parameterkombinationen erreicht werden kann. Die Höhe dieser Kostensenkungen nimmt jedoch mit steigendem λ ab und konvergiert gegen null. Darüber hinaus ist eine Veränderung der zur -Fläche parallelen Stufen zu beobachten, so dass die Parameterkonstellationen zu Beginn und Ende der Stufen mit steigendem Grad der Optimalitätsrobustheit ein geringeres ω^+ und ein höheres ω^- aufweisen.

Neben dem Einfluss der Parameter auf die Gesamtkosten können Rückschlüsse auf das Verhalten der in einer Lösung realisierten Fehlmengen bei Parametervariation gezogen werden. In der rechten oberen Ecke von Abbildung 37 ist die Hyperebene bei steigender Bestrafung der positiven und negativen Abweichungen von den Kundenbedarfen abgetragen, wobei die formale Kantenlinie entlang der Abszisse in Abbildung 21 eingeführt wurde. Mit dem Ziel einer klareren Darstellung sind Abszisse und Ordinate im Vergleich zur Ebene der Gesamtkosten vertauscht. In der nun entstehenden Fläche werden folgende Tendenzen deutlich:

- Bei steigender Bestrafung der negativen Abweichungen (ω^-) sinkt die Fehlmenge monoton.
- ω^+, ω^- Gleichzeitig ist eine Erhöhung der Fehlmenge mit steigender Bestrafung der positiven Abweichungen (ω^+) erkennbar.
- Die Hyperfläche weist einige Stufen, d. h. Flächen mit konstanten Werten über mehrere Parameterausprägungen hinweg, auf.
- Eine maximale Fehlmenge tritt bei sehr hoher Bedeutung der positiven Abweichungen und sehr geringen Bestrafungen der negativen Abweichungen auf. Durch die hieraus entstehende Akzeptanz der Unterbelieferungen und die dadurch nicht in die Bestellkosten einfließenden Mengen werden geringe Gesamtkosten realisiert.

Bei einer Steigerung der Forderung nach Optimalitätsrobustheit auf $\lambda = 250$ wird die Kostenminimierung weiter in den Fokus der Optimierung gerückt (mittlere Graphik rechts). Das Fehlmengenmaximum steigt deutlich an, da so noch geringere Kosten entstehen. Insbesondere die hohe Sensitivität der Fehlmengen bei geringen Werten für ω^- ist auffallend.

Für eine sehr starke Gewichtung der Optimalitätsrobustheit ($\lambda = 500$) wird der Bereich der hohen Sensitivität von ω^- leicht nach hinten verlagert, wobei das Fehlmengenmaximum eine marginale Erhöhung erfährt. Es kann daher geschlossen werden, dass die Fehlmengen mit steigendem Optimalitätsfaktor um immer geringere Werte zunehmen.

In der Betrachtung der Hyperebenen zur Fehlmengengenerierung wird deutlich, dass beiden Faktoren ω^- und ω^+ eine entscheidende Rolle zukommt, wobei insbesondere die Sensitivität von ω^- bei stärkeren Optimalitätsforderungen von Relevanz für die Parametrisierung der robusten Modellierung ist.

5.3.1.2 Einfluss von Optimalitätsforderung und negativer Abweichung der Bedarfsmengen

Weiterhin soll der Zusammenhang der verschiedenen Einflüsse der Parameter Optimalitätsforderung (λ) und Bestrafung negativer Bedarfsabweichungen (ω^-) untersucht werden. Diese Untersuchung ist von besonderem Interesse, da die beiden Faktoren in klarem Gegensatz zueinander stehen: Der Parameter λ fokussiert auf die Kostensenkung, wobei der Parameter ω^- auf die möglichst vollständige Bedarfsbefriedigung abzielt. Es ist daher anzunehmen, dass diese Faktoren in direktem (linearen) Zusammenhang stehen. Anhand der berechneten Hyperebenen kann eine Überprüfung dieser These vorgenommen werden. Die Variation der Parameter in Bezug auf die Gesamtkosten und die Fehlmenge zeigt die Übersicht in Abbildung 39.

In den linken Abbildungen fällt auf, dass die Gesamtkosten mit steigendem ω^- zunehmen. Eine hohe Bestrafung von Unterlieferungen geht also mit hohen Kosten einher, da der Fokus der Optimierung auf die möglichst vollständige Bedarfserfüllung gelegt wird und so kostenintensive Lieferanten in die Lösung einbezogen werden.

Die Erhöhung der Optimalitätsrobustheit (λ) verlagert den Fokus wieder in Richtung der Kosten zurück und senkt diese zumindest für geringe Werte von ω^- . Für mittlere bis hohe Werte des Bestrafungsparameters weist die Erhöhung von λ nur einen geringen Effekt auf die Lösung auf: Es entsteht eine zur ω^-, λ -Fläche annähernd parallele Ebene.

Die in den Abbildungen erkennbaren Stufen haben im Vergleich zu den in Kapitel 5.3.1 beschriebenen Einflüssen des Parameters ω^+ keine lineare Begrenzung, sondern sind stark von der betrachteten Parameterkombination abhängig. Sie weisen nichtlineare Bereiche auf, so dass die Wahl der Parameter je nach Zielstellung der robusten Optimierung vorsichtig und unter Beachtung der dargestellten Effekte erfolgen sollte.

Wird zusätzlich der Grad der Bestrafung positiver Abweichungen von den Kundenbedarfen variiert, ist eine Verschiebung der Stufen zu konstatieren. Der Einfluss des Parameters λ steigt hierbei stetig, so dass die zur ω^-, λ -Fläche parallele Ebene erst bei deutlich höherem ω^- erreicht wird. Mit steigender Bestrafung der positiven Bedarfsabweichung ω^+ können also auch bei mittleren Werten für ω^- noch geringere Kosten realisiert werden.

Dies ist insbesondere bei gleichzeitiger Betrachtung der für jede Parameterkombination entstehenden Fehlmengen von Bedeutung, die für steigende Werte des Parameters für positive Abweichungen (ω^+) deutlich sinken.

Ferner kann der Einfluss der beiden untersuchten Parameter auf die realisierten Fehlmengen einer Lösung wie folgt beschrieben werden:

- Mit steigendem λ und sinkendem ω^- ist eine starke und stufenweise erfolgende Erhöhung der Fehlmengen verbunden.
- Hierbei enden und beginnen die Stufen jeweils mit nichtlinearen Verläufen, so dass eine vollständige Substitution der Parameter ausgeschlossen werden kann.

Im Vergleich der Gesamtkosten- mit den Fehlmengenebenen wird die gegenläufige Entwicklung bei den untersuchten Parametern besonders deutlich. Zusammenfassend ist der nichtlineare Zusammenhang der beiden Parameter in Bezug auf die beiden untersuchten Kriterien zu betonen. Im Rahmen der Wahl der Parameterwerte kann demnach anhand der dargestellten Ebenen eine ziel- und risikoeinstellungsadäquate Entscheidung getroffen werden.

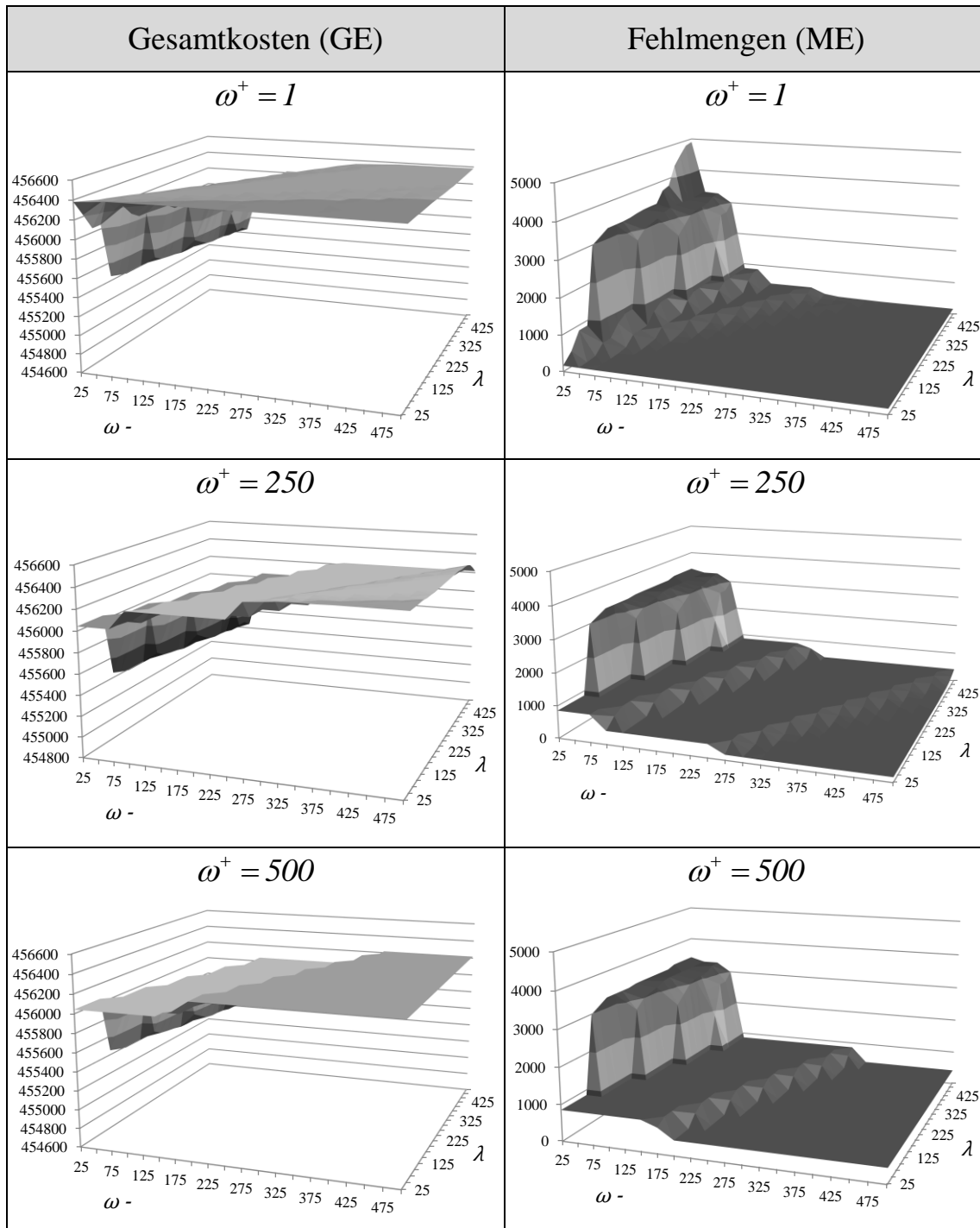


Abbildung 39: Einfluss der Gewichtungsfaktoren für negative Abweichungen der Bedarfsmengen und Optimalitätsforderung auf die Lösung der robusten Optimierung

5.3.1.3 Einfluss von Optimalitätsforderung und positiver Abweichung der Bedarfsmengen

Um dem Ziel einer umfassenden Darstellung der Parametrisierungseffekte der robusten Optimierung gerecht zu werden, wird abschließend eine Untersuchung der Kombination der Parameter zur Steuerung der Optimalitätsforderung (λ) sowie der Bestrafung positiver Bedarfsabweichungen (ω^+) vorgenommen (vgl. Abbildung 40).

Bei der Betrachtung der Kombination der zwei Parameter können aufgrund der starken Veränderungen im Rahmen der Steigerung des dritten Faktors ω^- kaum allgemeingültige Tendenzen formuliert werden. Diese starken Veränderungen gilt es, detaillierter zu untersuchen. Hierfür ist in Abbildung 41 eine geringere Schrittweite für den Parameter zugrunde gelegt. Es wird ersichtlich, dass die zu untersuchenden Parameter die Gesamtkosten auf stark unterschiedliche Weise beeinflussen, wobei insbesondere bei niedrigen Werten des Faktors zur Bestrafung der negativen Abweichungen deutliche Unterschiede auftreten.

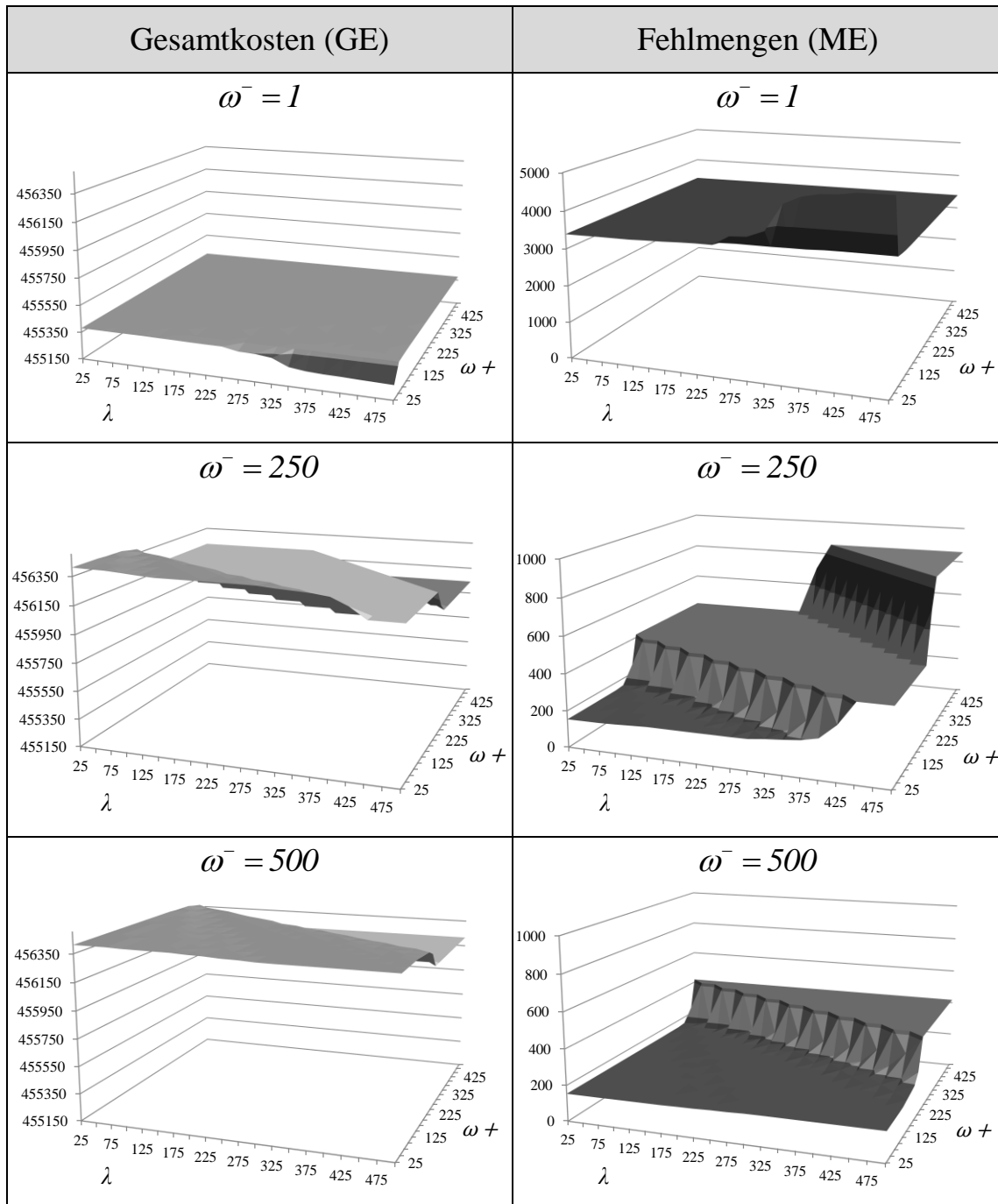


Abbildung 40: Einfluss der Gewichtungsfaktoren für positive Abweichungen der Bedarfsmengen und Optimalitätsforderung auf die Lösung der robusten Optimierung

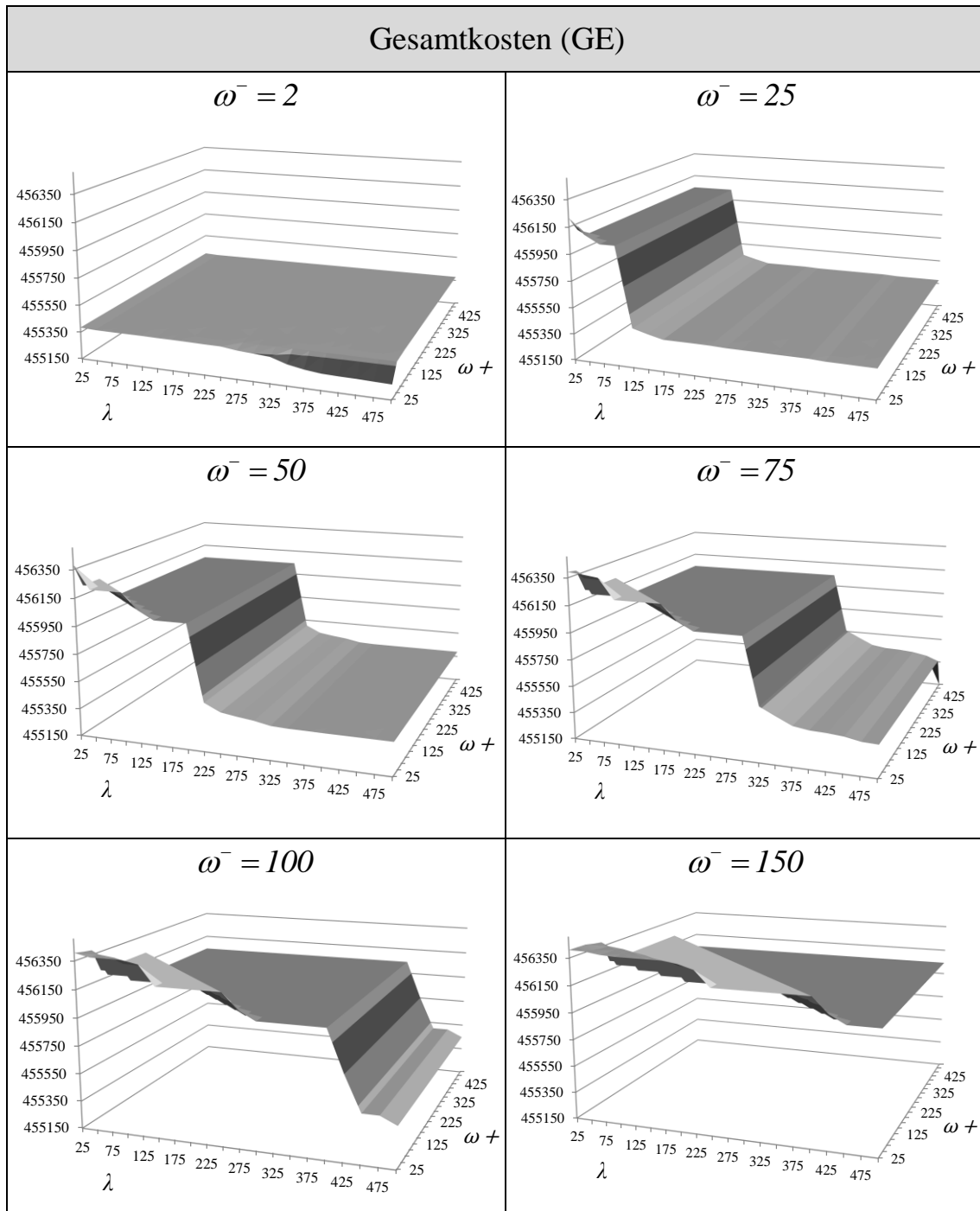


Abbildung 41: Detaillierte Analyse der Gesamtkostenentwicklung bei Variation der Parameterkombination λ und ω^+ für geringe Werte des Parameters ω^-

Hierbei ist zu beachten, dass die Gesamtkosten in allen Fällen bei Verringerung von λ steigen oder konstant bleiben, bei der Variation von ω^+ jedoch keine klare Aussage getroffen werden kann. Bei $\omega^- = 1$ sinken die

Gesamtkosten bei Verringerung von ω^+ , bei $\omega^- = 250$ und $\omega^- = 500$ steigen die Gesamtkosten bei Reduzierung von ω^+ .

Ein ähnlicher Effekt ist bei der Analyse der Fehlmengen festzustellen. Bei Erhöhung von λ steigen die Fehlmengen monoton an. Hinsichtlich des Parameters ω^+ ist wiederum eine differenzierte Analyse bei der Wertewahl durchzuführen, da die Fehlmengen für geringe Werte von ω^- mit steigendem ω^+ fallen, für höhere Werte von ω^- jedoch steigen.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Spezifikation der Werte für die drei Parameter zur Steuerung der Optimalitätsrobustheit, der Bestrafung negativer Abweichungen und der Bestrafung positiver Abweichungen von den Kundenbedarfen einen entscheidenden Einfluss auf die Lösung des robusten Modells ausüben, d. h. dass sowohl die Gesamtkosten als auch die Fehlmengen stark von der Ausprägung der Parameter abhängig sind. Ferner ist zu betonen, dass die Parameterwahl immer in Abhängigkeit von der konkreten Problemstellung vorgenommen wird und somit kein Anspruch auf Allgemeingültigkeit erhoben wird. Es ist jedoch zu schließen, dass anhand der dargestellten umfassenden Untersuchungen aller Parameterkombinationen tendenzielle Entwicklungen und somit Hinweise zu einer Parametrisierung abgeleitet werden können, die der Risikoeinstellung und den Zielen des Planers gerecht wird.

5.3.2 Entscheidungsunterstützung zur Parametrisierung

Bei den dargestellten Überlegungen bleibt jedoch unbeachtet, dass der Prozess der Parameterkalibrierung auch mit Hilfe der dargestellten Hyperebenen einen hohen Komplexitätsgrad aufweist. Durch drei Parameter und zwei Lösungskriterien sind hierbei fünf Dimensionen zu koordinieren und die Vorteile der verschiedenen Lösungen gegeneinander abzuwägen. Somit entsteht die Notwendigkeit einer Entscheidungsunterstützung zur Parametrisierung als Metaoptimierungsproblem.

In diesem Rahmen soll auf die in der Literatur diskutierten Möglichkeiten zur Ableitung der Präferenzen des Planers¹⁾ bezogen auf die Eigenschaften der Lösung verwiesen werden²⁾. Insbesondere kann für das in dieser Arbeit

1) Diese können unter Sicherheit bei Julia, Sven und Franz gesucht werden.

2) Vgl. z.B. Klein/Scholl (2011, S. 55 ff.).

vorgestellte Modell ein Würfel zur Durchsuchung des Lösungsraums zur Anwendung gelangen (vgl. Abbildung 42).

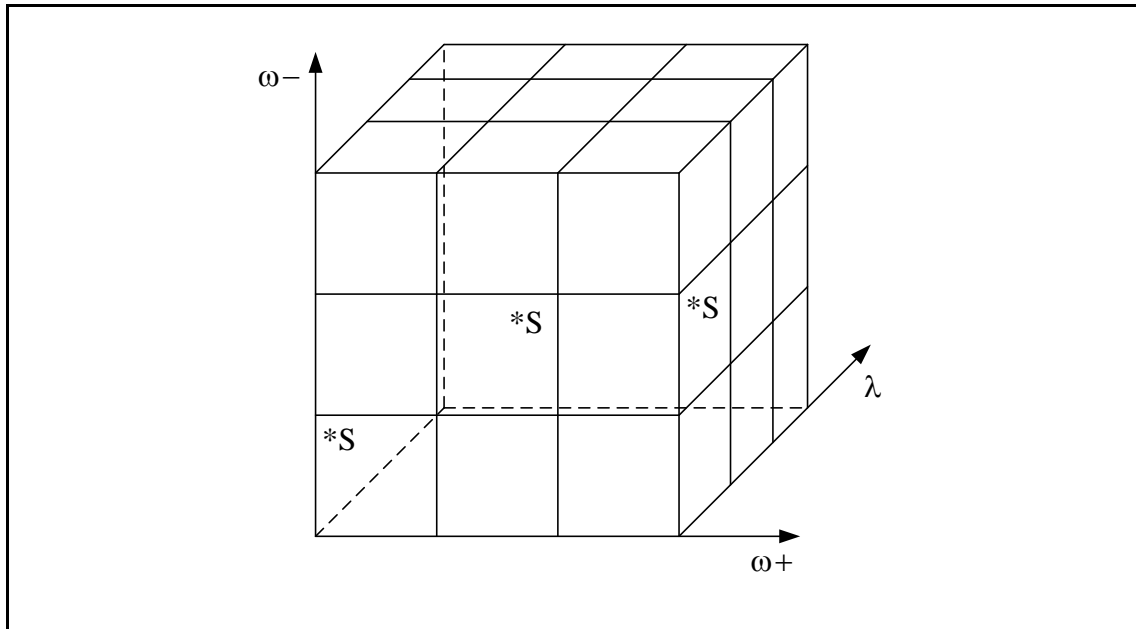


Abbildung 42: Würfel als Entscheidungsunterstützung zur Parametrisierung

Auf Grundlage eines Vergleichs der mit dem Buchstaben S dargestellten Lösungen (beispielsweise im Rahmen einer Conjoint-Analyse oder eines paarweisen Vergleichs) aus verschiedenen Würfelteilen kann dann eine Annäherung an die von einem Planer bevorzugte Parametrisierung vorgenommen werden. Die relevanten Würfelteile werden schrittweise eingegrenzt und die Parameterwahl somit konkretisiert. Weitere Möglichkeiten wie die Konditionierung eines neuronalen Netzes oder Bayesscher Netze können ergänzend im Rahmen der Parametrisierung von Vorteil sein, so dass die optimalen Parameterwerte für einen Planer festgelegt werden können.

6 Abschließende Bemerkungen und Ausblick

Die Beschaffung zielt auf die Bereitstellung aller nicht selbst produzierbaren, jedoch für die Sachzielerfüllung benötigten Produktionsfaktoren ab. Der in der Literatur beschriebene Phasenumfang der Beschaffung umfasst dabei die Erlangung der Verfügungsrechte und die innerbetriebliche Behandlung. In der vorliegenden Arbeit erfährt dieses Beschaffungsverständnis eine Erweiterung, die auf der folgenden Beschaffungssituation eines Händlers beruht: Falls der Händler die Beschaffungslogistik selbst übernimmt und keine Lagerung und Umgruppierung der Handelswaren möglich bzw. notwendig ist, können die Distributions- und die Beschaffungslogistik kombiniert durchgeführt werden. In diesem Falle werden distributionslogistische Aufgaben durch die Beschaffung übernommen. Dies ist ein Sachverhalt, der in der Regel nicht den Aufgaben der Beschaffung zuzuordnen ist und zu einer erheblichen Komplexitätssteigerung der Beschaffungsaufgaben führt. Speziell in Branchen, in denen die Transportkosten einen entscheidenden Anteil an den Gesamtkosten der Unternehmung ausmachen, übt die Einbeziehung der Transportkosten erheblichen Einfluss auf die Beschaffungsplanung aus. Die Auswahl der günstigsten Lieferanten in Bezug auf die Bestellpreise ist dann nicht mehr vorteilhaft, da hohe Transportkosten die Bestellkostenvorteile überkompensieren und zu höheren Gesamtkosten führen können. Somit ist an dieser Stelle der Beschaffungsplanung eine simultane Abstimmung von Bestell- und Transportkosten vorzunehmen. Diese in der Literatur bisher nicht behandelte Erweiterung der Beschaffungsplanung um zwischenbetriebliche Aspekte wird als *distributionsbasierte Beschaffungsplanung* bezeichnet.

Zur Lösung dieser Problemstellung sind komplexe Abwägungen zu vollziehen, die die kognitiven Leistungen und das Zeitkontingent der Beschaffungsplaner in der unternehmerischen Praxis in der Regel übersteigen. Ausgehend von diesen Überlegungen ergibt sich die Notwendigkeit einer wissenschaftlich fundierten und computergestützten Entscheidungsunterstützung für die erweiterten Aufgaben des Handels.

Als Grundlage für die Konzeption und Validierung einer Entscheidungsunterstützung zur distributionsbasierten Beschaffungsplanung dient für die

vorliegende Arbeit die Kooperation mit einem Praxispartner aus dem Flüssiggashandel, der einerseits Einblicke in reale Problemdimensionen gibt und andererseits ausführliche Datensätze zur numerischen Analyse des konzipierten Vorgehens zur Verfügung stellt.

Der Flüssiggashandel geht dabei mit einigen Besonderheiten einher, die Eingang in die formale Modellierung der Entscheidungsunterstützung im Rahmen des zu lösenden Problems finden. Hierbei ist insbesondere die Vertrauensbasis im Flüssiggashandel zu betonen, die zu einer Risikoaversion des Händlers bezüglich der zugesicherten Mengen bei der Verhandlung mit Lieferanten führt. Ferner sind die kurzen, meist eintägigen Verhandlungsphasen zu berücksichtigen, die dem einjährigen Planungshorizont gegenüberstehen. Weiterhin sind spezifische Vertragsgestaltungsparameter wie Minimal- und Maximalmengen sowie gestaffelte Preise und Mengen abzubilden. Im Kontext der Beschaffungsplanung obliegt dem Planer in der Praxis des Flüssiggashandels also die Aufgabe, die folgenden Fragestellungen zu beantworten:

- Welche jährlichen Mengen sollen zu welchem Preis mit einem Lieferanten vereinbart werden, um eine möglichst vollständige Bedarfsbefriedigung sicherzustellen?
- Welche Auswirkungen im Hinblick auf die relevanten Kosten und den Servicegrad sind mit Veränderungen der prognostizierten Bedarfe verbunden?

Die Anforderungen an die Lösung und die besonderen Vertragsgestaltungsparameter des Flüssiggashandels fließen in die formale Modellierung eines gemischt-ganzzahligen Programms ein, das auf die simultane Minimierung von Transport- und Bestellkosten abzielt. Das Modell ist dabei sowohl im Hinblick auf die Koordination und Entscheidungsunterstützung bei der Lieferantenwahl als auch zur Vorbereitung von Vertragsverhandlungen einsetzbar. Weiterhin können die Ergebnisse des Modells einerseits als Orientierungshilfe für die operative Transportplanung dienen und andererseits Hinweise zur Beantwortung strategischer Fragestellungen bezüglich einer möglichen Eigenfertigung oder der Standortwahl des Fuhrparks geben.

Erste Berechnungen weisen auf eine Eignung der Modellierung für umfangreiche praktische Fragestellungen hin. Es zeigt sich jedoch, dass die

Modellierung durch den indirekten Umgang mit Unsicherheiten der Nachfrage und der Transportkosten nur stark aggregierte Ergebnisse erzeugen kann. Daher wird eine Übersicht der Methoden zur Unsicherheitsabbildung erarbeitet und vergleichend gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass die robuste Optimierung einen problemadäquaten Umgang mit Unsicherheit bietet, da die Risikoeinstellung des Planers direkt abgebildet und verschiedene Prognosewerte in eine Konstellationsanalyse integriert werden können.

Auf dieser Grundlage wird das Grundmodell zu einem robusten Modell erweitert. Diese mehrwertige Abbildung der Unsicherheit führt zu einer Entscheidungsunterstützung, in der die Vor- und Nachteile jeder Lösung im Hinblick auf verschiedene Kriterien vergleichend gegenübergestellt werden. Der Planer erhält die Möglichkeit, eine quantifizierte und graphisch unterstützte Abwägung der entstehenden Kosten und der Zufriedenheit der Kunden vorzunehmen.

Eine exemplarische Darstellung der entsprechenden Zusammenhänge der robusten Optimierung zur distributionsbasierten Beschaffungsplanung erfolgt im Rahmen der numerischen Untersuchung, wobei Realdaten für zwölf Monate als Ausgangspunkt genutzt werden. Im Rahmen der Untersuchung werden die Kriterien *Gesamtkosten der Lösung* und *realisierte Fehlmengen* einer detaillierten Analyse unterzogen und die wesentlichen Unterschiede verschiedener Risikoaversionsgrade und Unsicherheitskonstellationen herausgearbeitet. Die Lösung der Probleminstanzen nimmt dabei kurze Rechenzeiten von wenigen Sekunden pro Optimierungsvorgang in Anspruch. In der Gesamtsicht der Ergebnisse ergeben sich die folgenden Tendenzen:

- Es wird deutlich, dass abhängig vom Risikoaversionsgrad eine Verringerung von Fehlmengen bei relativ geringen Gesamtkostensteigerungen erreicht werden kann.
- Die nötigen Kostensteigerungen sind dabei in hohem Maße vom Grad der prognostizierten Unsicherheit abhängig. Diese kosten- und mengenmäßigen Veränderungen können in konstellationsübergreifenden Analysen quantifiziert werden, wobei deutlich wird, dass mit zunehmender Unsicherheit die Kostensteigerungen, die zur Reduktion der Fehlmengen nötig sind, zunehmen.

6 Abschließende Bemerkungen

- Die Wahl der Parameterwerte des robusten Modells übt einen hohen Einfluss auf die Lösung aus, wobei die maximalen Kosten bei Steigerung des Gewichtungsfaktors für negative Bedarfsabweichungen zunehmen und bei Steigerung der Gewichtungsfaktoren für die Optimalitätsforderung und für positive Bedarfsabweichungen abnehmen.

Abschließend ist festzustellen, dass die dargestellte Modellierung zur distributionsbasierten Beschaffungsplanung die Möglichkeit bietet, quantitative Aussagen über die kosten- und servicegradbezogenen Auswirkungen von Beschaffungsalternativen in Bezug auf verschiedene Probleminstanzen und Risikoeinstellungen zu treffen und diese übersichtlich darzustellen. Sie ist daher für die Entscheidungsunterstützung in der taktischen Beschaffungsplanung geeignet.

Die vorliegende Arbeit bietet ferner eine Grundlage für zukünftige Forschungen:

- Einerseits können problemadäquate Prognosemethoden zum Einsatz gelangen. Im Rahmen der Bedarfsprognose werden durch die bisherige Nutzung von Durchschnittswerten sporadisch auftretende Bedarfe vernachlässigt. Diese treten jedoch im Flüssiggashandel häufig auf und können durch die Anwendung von entsprechenden Prognosemethoden abgebildet werden. Weiterhin kann die Schätzung des Transportkostenfaktors durch die Integration von Informationen in Bezug auf Gefahrguttransporte oder mittelfristige Streckensperrungen verbessert werden. Für beide zu prognostizierende Parameter gilt, dass kundenspezifische Faktoren, wie die Branchenzugehörigkeit oder die Bedarfshöhe, in die Prognose integriert werden können, um eine höhere Ergebnisqualität zu realisieren. Diese Erweiterungen gehen jedoch mit Kosten der Informationsbeschaffung und -auswertung einher, so dass eine Auswahl geeigneter (Kombinationen von) Prognosemethoden vorgenommen werden muss.
- Andererseits geht die vorgestellte robuste Modellierung mit dem Nachteil einher, dass die Gewichtungsfaktoren zur Bestrafung negativer und positiver Bedarfsabweichungen sowie zur Abbildung der Optimalitätsanforderung manuell kalibriert werden müssen. Diese Kalibrierung erfordert detaillierte Problemkenntnis und eine Vielzahl vorläufiger Simulationen. Eine systematische Vorgehensweise zur Parametrisierung einer

6 Abschließende Bemerkungen

konkreten Problemstellung kann den Planern die notwendige Hilfestellung für einen weitreichenden Einsatz der Modellierung bieten.

Literatur

- Abel, P.: Stochastische Optimierung bei partieller Information, in: *Mathematical Systems in: Economics*, Vol. 96 (1984), S. 1-257
- Adam, D.: Koordinationsprobleme bei dezentralen Entscheidungen, in: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, 39. Jg. (1969), S. 615-632
- Adam, D.: Zur Problematik der Planung in schlechtstrukturierten Entscheidungssituationen, in: *Neue Aspekte der betrieblichen Planung*, hrsg. v. H. Jacob, Wiesbaden 1980, S. 47-75
- Adam, D.: *Planung und Entscheidung, Modelle – Ziele – Methoden*, Wiesbaden 1996
- Adland, R.; Jia, H.; Lu, J.: Price Dynamics in the Market for Liquid Petroleum Gas Transport, in: *Energy Economics*, Vol. 30 (2008), S. 818-828
- Ahlert, D.: Warenwirtschaftsmanagement und Controlling in der Konsumgüterdistribution – Betriebswirtschaftliche Grundlegung und praktische Herausforderungen aus der Perspektive von Handel und Industrie, in: *Integrierte Warenwirtschaftssysteme und Handelscontrolling*, hrsg. v. D. Ahlert u. R. Olbrich, 3. Aufl., Stuttgart 1997, S. 3-112
- Al-Ani, A.: Das neue strategische Management. Strategieentwicklung in der Post-Reengineering-Ära, in: *Das neue strategische Management*, hrsg. v. H.-H. Hinterhuber, A. Al-Ani u. G. Handlbauer, Wiesbaden 1996, S. 11-32
- Albers, S.; Peters, K.: Die Wertschöpfungskette des Handels im Zeitalter des Electronic Commerce, in: *Marketing – Zeitschrift für Forschung und Praxis*, 19. Jg. (1997), S. 69-80
- Alexis, M.; Wilson, C.Z.: *Organizational Decision Making*, Englewood Cliffs 1967
- Andersson, H.; Christiansen, M.; Fagerholt, K.: Transportation Planning and Inventory Management in the LNG Supply Chain, in: *Energy, Natural Resources and Environmental Economics*, hrsg. v. E. Bjørndal, M. Bjørndal, P. M. Pardalos u. M. Rönnqvist, Berlin/Heidelberg 2010, S. 427-439

- Aneja, Y.P.: Bicriteria Transportation Problem, in: Management Science, Vol. 25 (1979), S. 73-78
- Anthony, R.: Planning and Control Systems: A Framework for Analysis, Boston 1965
- Apley, D.W.; Kim, J.: A Cautious Approach to Robust Design with Model Parameter Uncertainty, in: IIE Transactions, Vol. 43 (2011), S. 471-482
- Archetti, C.; Speranza, M.G.; Hertz, A.: A Tabu Search Algorithm for the Split Delivery Vehicle Routing Problem, in: Transportation Science, Vol. 40 (2006), S. 64-73
- Arnold, U.: Beschaffungsmanagement, 2. Aufl., Stuttgart 1997
- Arrow, K.J.: The Theory of Risk Aversion, in: Essays in the Theory of Risk-Bearing, hrsg. v. K.J. Arrow, Amsterdam/London 1971, S. 90-120
- Avery, W. et al.: Optimization of Purchase, Storage and Transmission Contracts for Natural Gas Utilities, in: Operations Research, Vol. 40 (1992), S. 446-462
- Axsäter, S.: Inventory Control, 2. Aufl., New York 2006
- Badel, L.; Corsten, H.: Beschaffungsplanung im Flüssiggashandel – Eine Betrachtung auf der taktischen Ebene, Nr. 92 der Schriften zum Produktionsmanagement, hrsg. v. H. Corsten, Kaiserslautern 2011
- Badel, L.; Corsten, H.; Wolff, P.: Robuste Optimierung in der distributionsbasierten Bedarfsplanung, Nr. 94 der Schriften zum Produktionsmanagement, hrsg. v. H. Corsten, Kaiserslautern 2012
- Badel, L.; Corsten, H.; Wolff, P.: Robust Optimization in Distribution-based Demand Planning: a Model for Negotiation Support, in: Journal of Business Economics, Vol. 83 (2013), S. 785-803
- Bai, D.; Carpenter, T.; Mulvey, J.: Making a Case for Robust Optimization Models, in: Management Science, Vol. 43 (1997), S. 895-907
- Bamberg, G.; Coenenberg, A.G.; Krapp, M.: Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre, 15. Aufl., München 2012

- Barth, K.: Handel, Produktion im, in: Handwörterbuch der Produktionswirtschaft, hrsg. v. W. Kern, Stuttgart 1979, Sp. 697-704
- Barth, K.; Hartmann, M.; Schröder, H.: Betriebswirtschaftslehre des Handels, 6. Aufl., Wiesbaden 2007
- Barth, U.: Das dreidimensionale Transportproblem der Linearen Planungsrechnung – Eigenschaften und Lösung, Darmstadt 1971
- Bartmann, D.: Mittelfristige Produktionsplanung bei ungewissen Szenarien, in: Zeitschrift für Operations Research, 28. Jg. (1984), S. 187-204
- Bassok, Y.; Anupindi, R.: Analysis of Supply Contracts with Total Minimum Commitment, in: IIE Transactions, Vol. 29 (1997), S. 373-381
- Bassok, Y.; Anupindi, R.: Analysis of Supply Contracts with Commitments and Flexibility, in: Naval Research Logistics, Vol. 55 (2008), S. 459-477
- Baumard, P.: Tacit Knowledge in Organizations, London 1999
- Baumgartner, K.; Fuetterer, A.; Thonemann, U.-W.: Supply Chain Design Considering Economies of Scale and Transport Frequencies, in: European Journal of Operational Research, Vol. 218 (2012), S. 789-800
- Bell, W.J. et al.: Improving the Distribution of Industrial Gases with an On-line Computerized Routing and Scheduling Optimizer; in: Interfaces, Vol. 13 (1983), No. 6, S. 4-23
- Bellinger, B.: Versuch eines Gliederungssystems betrieblicher Funktionen, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 25. Jg. (1955), S. 228–240
- Ben-Tal, A.; Nemirovski, A.: Robust Solutions of Linear Programming Problems Contaminated with Uncertain Data, in: Mathematical Programming, Vol. 88 (2000), S. 411-424
- Ben-Tal, A.; Nemirovski, A.: Robust Optimization – Methodology and Applications, in: Mathematical Programming, Series B, Vol. 92 (2002), S. 453-480
- Bernon, M. et al.: An Exploration of Supply Chain Integration in the Retail Product Returns Process, in: International Journal of Distribution and Logistics Management, Vol. 43 (2013), S. 586-608

- Bertazzi, L.; Cherubini, S.S.M.: An Inventory-transportation System with Stochastic Demand, in: Computational Management Science, Vol. 10 (2013), S. 1-20
- Bertazzi, L.; Savelsbergh, M.; Speranza, M.G.: Inventory Routing, in: The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges, hrsg. v. B. Golden, R. Raghavan u. E. Wasil, Berlin/Heidelberg 2008, S. 49-72
- Bertel, S.; Fenies, P.; Roux, O.: Optimal Cash Flow and Operational Planning in a Company Supply Chain, in: International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 21 (2008), S. 440-454
- Bertsimas, D.; Sim, M.: The Price of Robustness, in: Operations Research, Vol. 52 (2004), S. 35-53
- Bertsimas, D.; Thiele, A.: A Robust Optimization Approach to Inventory Theory, in: Operations Research, Vol. 54 (2006), S. 150-168
- Bierwirth, C.; Kirschstein, T.; Meisel, F.: On Transport Service Selection in Intermodal Rail/Road Distribution Networks, in: BuR Business Research Journal, Vol. 5 (2012), S. 198-219
- Bilsel, R.U.; Ravindran, A.: A Multiobjective Chance Constrained Programming Model for Supplier Selection under Uncertainty, in: Transportation Research Part B, Vol. 45 (2011), S. 1284-1300
- Birge, J.R.: The Value of the Stochastic Solution in Stochastic Linear Programs with Fixed Recourse, in: Journal of Mathematical Programming, Vol. 24 (1982), S. 314-325
- Birge, J.R.; Louveaux, F.: Introduction to Stochastic Programming, 2. Aufl., New York et al. 2011
- Bit, A.K.; Biswal, M.P.; Alam, S.S.: Fuzzy Programming Approach to Multicriteria Decision Making Transportation Problem, in: Fuzzy Sets and Systems, Vol. 50 (1992), No. 2, S. 135-141
- Bogaschewsky, R.: Dynamische Materialdisposition im Beschaffungsbereich – Simulation und Ergebnisanalyse, hrsg. v. Bundesverband Materialwirtschaft, Diss. Univ. Göttingen, Frankfurt a.M. 1988

- Bopp, A.E. et al.: An Optimization Model for Planning Natural Gas Purchases, Transportation, Storage and Deliverability, in: *Omega*, Vol. 24 (1996), S. 511-522
- Box, G.E.P.; Jenkins, G.M.; Reinsel, G.C.: *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, 4. Aufl., Hoboken 2008
- Bräysy, O.; Genreau, M.: Vehicle Routing Problem with Time Windows. Part I, Route Construction and Local Search Algorithms, in: *Transportation Science*, Vol. 39 (2005a), S. 104-118
- Bräysy, O.; Genreau, M.: Vehicle Routing Problem with Time Windows, Part II: Metaheuristics, in: *Transportation Science*, Vol. 39 (2005b), S. 119-139
- Bressand, A.: Dienstleistungen in der neuen „Weltwirtschaft“: Auf der Suche nach einem konzeptionellen Bezugsrahmen, in: *Perspektiven der Dienstleistungswirtschaft*, hrsg. v. E. Pestel, Göttingen 1986, S. 73-82
- Bretzke, W.-R.: *Logistische Netzwerke*, 2. Aufl., Berlin/Heidelberg 2010
- Brown, A.O.; Lee, H.L.: Impact of Demand Signal Quality, in: *Stochastic Modeling and Optimization of Manufacturing Systems and Supply Chains*, hrsg. v. J.G. Shanthikumar, D.D. Yao und W.H.M. Zijm, Massachusetts/Dordrecht 2003, S. 53-85
- Buddeberg, H.: *Betriebslehre des Binnenhandels*, Wiesbaden 1959
- Buriánek, F.: *Vertragsgestaltung bei hybriden Leistungsangeboten. Eine ökonomische Betrachtung*, Wiesbaden 2010
- Campbell, A.M.; Savelsbergh, M.W.P.: A Decomposition Approach for the Inventory-Routing Problem, in: *Transportation Science*, Vol. 38 (2004), S. 488-502
- Carlisle, J.A.; Parker, R.C.: *Beyond Negotiation: Redeeming Customer-Supplier Relationships*, New York 1989
- Carlson, R.C.; Jucker, J.V.; Kropp, D.H.: Less Nervous MRP Systems: A Dynamic Economic Lot-Sizing Approach, in: *Management Science*, Vol. 25 (1979), S. 754-761
- Chanas, S.; Kuchta, D.: A Concept of the Optimal Solution of the Transportation Problem with Fuzzy Cost Coefficients, in: *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 82 (1996), No. 3, S. 299-305

- Chandra, C.; Grabis, J.: Supply Chain Configuration. Concepts, Solutions, and Applications, Berlin et al. 2007
- Charnes, A.; Cooper, W.W.: Chance-Constrained Programming, in: Management Science, Vol. 6 (1959), S. 73-79
- Charnes, A.; Kirby, M.J.L.: Some Special P-Model in Chance-Constrained Programming, in: Management Science, Vol. 14 (1967), S. 183-195
- Chen, S.; Golden, B.; Wasil, E.: The Split Delivery Vehicle Routing Problem. Applications, Algorithms, Test Problems, and Computational Results, in: Networks, Vol. 49 (2007), S. 318-329
- Clark, J.M.: Studies in the Economics of Overhead Costs, Chicago 1923
- Coase, R.H.: The Nature of the Firm, in: Economica, Vol. 4 (1937), No. 15, S. 386-405
- Comes, T.; Hiete, M.; Schultmann, F.: An Approach to Multi-Criteria Decision Problems Under Severe Uncertainty, in: Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, Vol. 20 (2013), S. 29-48
- Corsten, H.: Gestaltungsbereiche des Beschaffungsmanagement, Diskussionsbeiträge der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät Ingolstadt Nr. 53, Ingolstadt 1994
- Cox, A.: The Art of the Possible: Relationship Management in Power Regimes and Supply Chains, in: Supply Chain Management: An international Journal, Vol. 9 (2004), No. 5, S. 346-356
- Coyle, J.J.; Bardi, E.J.; Langley, C.J.: The Management of Business Logistics: A Supply Chain Perspective, St. Paul 2002
- Crainic, T.G.; Roy, J.: OR Tools for Tactical Freight Transportation Planning, in: European Journal of Operational Research, Vol. 33 (1988), S. 290-297
- Crone, S.F.: Neuronale Netze zur Prognose und Disposition im Handel, Wiesbaden 2010
- Daniels, R.L., Kouvelis, P.: Robust Scheduling to Hedge against Processing Time Uncertainty in Single-stage Production, in: Management Science, Vol. 41 (1995), S. 363-376

- Dantzig, G.B.: Linear Programming under Uncertainty, in: Management Science, Vol. 1 (1955), S. 197-206
- Day, J.M. et al.: Improving Routing and Scheduling Decisions at a Distributor of Industrial Glasses, in: Omega, Vol. 37 (2009), S. 227-237
- Dembo, R.S.: Scenario Optimization, in: Annals of Operations Research, Vol. 30 (1991), S. 63-80
- Derigs, U.: Engpaß-Zielfunktion und Zeit/Kosten-Trade-Offs beim Transportproblem, Köln 1980
- Desaulniers, G.; Lavigne, J.; Soumis, F.: Multi-Depot Vehicle Scheduling Problems with Time Windows and Waiting Costs, in: European Journal of Operational Research, Vol. 111 (1998), S. 479-494
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 51622. Flüssiggase – Propan, Propen, Butan, Buten und deren Gemische – Anforderungen, Berlin 1985
- Dinkelbach, W.: Sensitivitätsanalyse und parametrische Programmierung, Berlin 1969
- Disney, S.M.; Towill, D.R.: A Discrete Transfer Function Model to Determine the Dynamic Stability of a Vendor Managed Inventory System, in: Computers and Industrial Engineering, Vol. 43 (2002), S. 27-58
- Domschke, W.: Logistik. Transport, 5. Aufl., München 2007
- Domschke, W.; Scholl, A.: Logistik. Rundreisen und Touren, 5. Aufl., München 2010
- Dornier, P.-P.; Ernst, R.; Fender, M.; Kouvelis, P.: Global Operations and Logistics, New York et al. 1998
- Drexel, G.: Strategische Unternehmensführung im Handel, Berlin/New York 1981
- Dror, M.; Ball, M.: Inventory/Routing: Reduction from an Annual to a Short-Period Problem, in: Naval Research Logistics, Vol. 34 (1987), S. 891-905
- DVFG Deutscher Verband Flüssiggas e.V.: Technische Regeln Flüssiggas; DVFG-TRF 2012, Berlin/Bonn 2012

- Eppen, G.D.; Iyer, A.V.: Back-Up Agreements in Fashion Buying, in: *Management Science*, Vol. 43 (1997), S. 1469-1484
- Ernenputsch, M.A.: Theoretische und empirische Untersuchungen zum Beschaffungsprozess von konsumtiven Dienstleistungen, Bochum 1986
- Escudero, L.F.: Robust Decision Making as a Decision Making Aid Under Uncertainty, in: *Decision Theory and Decision Analysis: Trends and Challenges*, hrsg. v. S. Rios, Dordrecht/Boston/London 1994, S. 127-138
- Escudero, L.F. et al.: Production Planning via Scenario Modelling, in: *Annals of Operations Research*, Vol. 43 (1993), S. 311-335
- Evans, J.R.: Sensitivity Analysis in Decision Theory, in: *Decision Science*, Vol. 15 (1984), S. 239-247
- Eversheim, W.; Schaefer, F.-W.: Planung des Flexibilitätsbedarfs von Industrieunternehmen, in: *Die Betriebswirtschaft*, 40. Jg. (1980), S. 229-248
- Fandel, G.; Giese, A.; Raubenheimer, H.: *Supply-Chain-Management. Strategien – Planungsansätze – Controlling*, Berlin/Heidelberg 2009
- Fleischmann, B.: Systeme der Transportlogistik, in: *Handbuch Logistik*, hrsg. v. D. Arnold et al., 3. Aufl., Berlin/Heidelberg 2008, S. 12-18
- Fleischmann, B.; Meyr, H.: Planning Hierarchy, Modeling and Advanced Planning Systems, in: *Supply Chain Management: Design, Coordination, Operation*, Handbooks in Operations Research and Management Science, Bd. 11, hrsg. v. A. de Kok u. S. Graves, Amsterdam 2003, S. 457-523
- Fleischmann, B.; Meyr, H.; Wagner, M.: Advanced Planning, in: *Supply Chain Management und Advanced Planning – Konzepte, Modelle und Software*, hrsg. v. H. Stadtler, C. Kilger u. H. Meyr, Heidelberg et al. 2010, S. 89-122
- Freiwald, S.: *Supply Chain Design, Robuste Planung mit differenzierter Auswahl der Zulieferer*, Diss. Univ. Bochum, Bochum 2005
- Friedl, B.: *Grundlagen des Beschaffungscontrolling*, Berlin 1990
- Friedrich, S.: *Verfahren für die taktische Planung der Supply Chain*, Diss. Univ. Hamburg, Aachen 2007

- Gallego, G.; Simchi-Levi, D.: On the Effectiveness of Direct Shipping Strategy for the One-Warehouse Multi-Retailer R-Systems, in: *Management Science*, Vol. 36 (1990), S. 240-243
- Gälweiler, A.: Strategische Unternehmensplanung, in: *Planung und Kontrolle: Probleme der strategischen Unternehmensführung*, hrsg. v. H. Steinmann, München 1981, S. 84-101
- Gebhard, M.: *Hierarchische Produktionsplanung bei Unsicherheit*, Wiesbaden 2009
- Gebhard, M.; Kuhn, H.: Robuste hierarchische Produktionsplanung mit Bedarfsszenarien, in: *Logistikmanagement. Analyse, Bewertung und Gestaltung logistischer Systeme*, hrsg. v. A. Otto u. R. Obermaier, Wiesbaden 2007, S. 161-183
- Geiger, M.J.; Sevaux, M.: The Biobjective Routing Problem – Problem Solution and Decision Support, in: *5th International Conference on Network Optimization*, Hamburg, 13.-16.06.2011, Proceedings, hrsg. v. J. Pahl et al., Hamburg 2011, S. 365-378
- Geisel, R.: *Strategien einer einsatzsynchrone Beschaffung*, Wiesbaden 2000
- Gen, M.; Altıparmak, F.; Lin, L.: A Genetic Algorithm for Two-Stage Transportation Problem Using Priority-Based Encoding, in: *OR Spectrum*, Vol. 28 (2006), S. 337-354
- Gfrerer, H.; Zäpfel, G.: Hierarchical Model for Production Planning in the Case of Uncertain Demand, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 86 (1995), S. 142-161
- Gilbert, X.; Strebel, P.: Strategies to Outpace the Competition, in: *Journal of Business Strategy*, Vol. 8 (1987), S. 28-36
- Glasserman, P.; Tayur, S.: Sensitivity Analysis for Base-Stock Levels in Multiechelon Production-Inventory Systems, in: *Management Science*, Vol. 41 (1995), S. 263-281
- Goel, A.; Gruhn, V.: A General Vehicle Routing Problem, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 191 (2008), S. 650-660
- Grahl, J.; Minner, S.: Verteilungsschätzende Verfahren zur Lösung stochastischer Transportprobleme, in: *Quantitative Methoden der Lo-*

- gistik und des Supply Chain Management, hrsg. v. M. Jaquemin et al., Hamburg 2006, S. 339-353
- Grochla, E.: Der Weg zu einer umfassenden betriebswirtschaftlichen Beschaffungslehre, in: Die Betriebswirtschaft, 37. Jg. (1977), S. 181-191
- Grochla, E.: Grundlagen der Materialwirtschaft, 3. Aufl., Wiesbaden 1978
- Grochla, E.; Kubicek, H.: Zur Zweckmäßigkeit und Möglichkeit einer umfassenden betriebswirtschaftlichen Beschaffungslehre, in: Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 28. Jg. (1976), S. 257-275
- Grochla, E.; Schönbohm, P.: Beschaffung in der Unternehmung, Stuttgart 1980
- Gudehus, T.: Logistik 2, Netzwerke, Systeme und Lieferketten, 4. Aufl., Berlin/Heidelberg/New York 2012
- Günther, H.-O.; Mattfeld, D.C.; Suhl, L. (Hrsg.): Management logistischer Netzwerke. Entscheidungsunterstützung, Informationssysteme und OR-Tools, Heidelberg 2007
- Guillem, G.; Badell, M.; Puigjaner, L.: A Holistic Framework for Short-term Supply Chain Management Integrating Production and Corporate Financial Planning, in: International Journal of Production Economics, Vol. 106 (2007), S. 288-306
- Gupta, A.; Maranas, C.D.: Managing Demand Uncertainty in Supply Chain Planning, in: Computers and Chemical Engineering, Vol. 27 (2003), S. 1219-1227
- Gutierrez, G.J.; Kouvelis, P.: A Robustness Approach to International Sourcing, in: Annals of Operations Research, Vol. 59 (1995), S. 165-193
- Hagdorn van der Meijden, L.: Decision Support for Strategic Planning in Logistics, Diss. Univ. Rotterdam, Rotterdam 1996
- Hanhart, E.W.: Marktgerechte Koordination von Einkauf und Verkauf im Warenhaus, St. Gallen 1967
- Hahn, G.J.; Kuhn, H.: Value-based Performance and Risk Management in Supply Chains: A Robust Optimization Approach, in: International Journal of Production Economics, Vol. 139 (2012), S. 135-144

- Haley, K.B.: The Solid Transportation Problem, in: *Operations Research*, Vol. 10 (1962), S. 448-463
- Halvorsen-Weare, E.E.; Fagerholt, K.: Routing and Scheduling in a Liquefied Natural Gas Shipping Problem with Inventory and Berth Constraints, in: *Annals of Operations Research*, forthcoming (2010), S. 1-20
- Hammann, P.; Lohrberg, W.: *Beschaffungsmarketing*, Stuttgart 1986
- Hansen, T.H.; Skytte, H.: Retailer Buying Behaviour: A Review, in: *The International Review of Retail, Distribution and Consumer Research*, Vol. 8 (1998), S. 277-301
- Hax, A.C.; Meal, D.: Hierarchical Integration of Production Planning and Scheduling, in: *Logistics, TIMS Studies in the Management Sciences*, hrsg. v. M.A. Geisler, Amsterdam/Oxford/New York 1975, S. 53-69
- Heikkilä, J.: From Supply to Demand Chain Management: Efficiency and Customer Satisfaction, in: *Journal of Operations Management*, Vol. 20 (2002), S. 747-767
- Hertel, J. et al.: *Supply Chain Management und Warenwirtschaftssysteme im Handel*, 2. Aufl., Heidelberg 2011
- Hertel, J.; Zentes, J.; Schramm-Klein, H.: *Supply-Chain-Management und Warenwirtschaftssysteme im Handel*, Berlin/Heidelberg 2005
- Hertz, D.B.: Risk Analysis in Capital Investment, in: *Harvard Business Review*, Vol. 42 (1964), S. 95-106
- Higle, J.L.; Wallace, S.W.: Sensitivity Analysis and Uncertainty in Linear Programming, in: *Interfaces*, Vol. 33 (2003), No. 4, S. 53-60
- Hirsch, P.: *Optimization in Round Timber Transport*, Wien 2006
- Hirsch, P.: Minimizing Empty Truck Loads in Round Timber Transport with Tabu Search Strategies, in: *International Journal of Information Systems and Supply Chain Management*, Vol. 4 (2011), No. 2, S. 15-41
- Hitchcock, F.: The Distribution of a Product from Several Sources to Numerous Localities, in: *Journal of Mathematics and Physics*, Vol. 20 (1941), S. 224-230

- Holte, K.: Integrierte Planung logistischer Netzwerke – Methoden und Modellierungsansätze zur Entscheidungsunterstützung, Diss. Univ. St. Gallen, St. Gallen 2001
- Huss, W.R.: A Move Toward Scenario Analysis, in: International Journal of Forecasting, Vol. 4 (1988), S. 377-388
- Iliev, N.: Flexibilität in Rahmenverträgen: Ansatz zur standardisierten Ausgestaltung und Risikobeherrschung für das Materialmanagement, Wiesbaden 2007
- Jacobs, F.R.; Chase, R.: Operations and Supply Chain Management, New York 2011
- Kalchschmidt, M.: Best Practices in Demand Forecasting: Tests of Universalistic, Contingency and Configurational Theories, in: International Journal of Production Economics, Vol. 140 (2012), S. 782-793
- Kall, P.; Mayer, J.: Stochastic Linear Programming: Models, Theory, and Computation, New York 2005
- Kall, P.; Wallace, S.W.: Stochastic Programming, Chichester 1994
- Kallrath, J.: Combined Strategic and Operational Planning – An MILP Success Story in Chemical Industry, in: OR Spectrum, Vol. 24 (2002), S. 315-341
- Kantorovich, L.V.: Mathematical Methods of Organizing and Planning Production, in: Management Science, Vol. 6 (1960), S. 366-422 (Übersetzung des Originalartikels: Канторович Л.В. Математические методы организации и планирования производства. Л.: Изд-во ЛГУ 1939)
- Kanyalkar, A.P.; Adil, G.K.: A Robust Optimization Model for Aggregate and Detailed Planning of a Multi-site Procurement-Production-Distribution System, in: International Journal of Production Research, Vol. 48 (2010), S. 635-656
- Karmarkar, N.: A New Polynomial-Time Algorithm for Linear Programming, in: Combinatorica, Vol. 4 (1984), No. 4, S. 373-395

- Kastsian, D.; Mönnigmann, M.: Optimization of a Vendor Managed Inventory Supply Chain with Guaranteed Stability and Robustness, in: International Journal of Production Economics, Vol. 131 (2011), S. 727-735
- Kaufmann, E.J.: Marketing für Produktivdienstleistungen, Zürich 1977
- Kern, W.: Kennzahlensysteme als Niederschlag interdependenter Unternehmensplanung, in: Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 23. Jg. (1971), S. 701-718
- Kilger, W.: Optimale Verfahrenswahl bei gegebenen Kapazitäten, Köln 1966
- Klein, R.; Scholl, A.: Planung und Entscheidung. Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse, 2. Aufl., München 2011
- Klibi, W.; Martel, A.; Guitouni, A.: The Design of Robust Value-Creating Supply Chain Networks: A Critical Review, in: European Journal of Operations Research, Vol. 203 (2010), S. 283-293
- Kloock, J.: Produktionskosten, Kontrolle der, in: Handwörterbuch Produktionswirtschaft, hrsg. v. W. Kern, Stuttgart 1979, Sp. 1525-1539
- Kloth, R.: Waren- und Informationslogistik im Handel, Wiesbaden 1999
- Knight, F.H.: Risk, Uncertainty and Profit, Boston 1921
- Knowles, T.W.; Wirick, J.P.: The Peoples Gas Light and Coke Company Plans Gas Supply, in: Interfaces, Vol. 28 (1998), No. 5, S. 1-12
- Koh, S.C.L.; Saad, S.M.; Jones, M.H.: Uncertainty under MRP-planned Manufacture: Review and Categorization, in: International Journal of Production Research, Vol. 40 (2002), S. 2399-2421
- Koppelman, U.: Beschaffungsmarketing, 4. Aufl., Berlin et al. 2004
- Kotler, P.; Levy, S. J.: Buying is Marketing too!, in: Journal of Marketing, Vol. 37 (1973), S. 54-59
- Kouvelis, P.; Kurawarwala, A.A.; Gutiérrez, G.J.: Algorithms for Robust Single and Multiple Period Layout Planning for Manufacturing Systems, in: European Journal of Operations Research, Vol. 63 (1992), S. 287-303

- Kouvelis, P.; Yu, G.: Robust Discrete Optimization and its Applications, Dordrecht 1997
- Kruschwitz, L.: Bemerkungen zur Risikoanalyse aus theoretischer Sicht, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 50. Jg. (1980), S. 800-808
- Kurbel, K.: Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management in der Industrie, 7. Aufl., München 2011
- Labitzke, N.: Wertorientierte Simulation zur taktischen Planung logistischer Prozesse der Stahlherstellung, Wiesbaden 2011
- Landeghem, H.v.; Vanmaele, H: Robust Planning. A New Paradigm for Demand Chain Planning, in: Journal of Operations Management, Vol. 20 (2002), S. 769-783
- Laporte, G.: The Vehicle Routing Problem: An Overview of Exact and Approximate Algorithms, in: European Journal of Operations Research, Vol. 59 (1992), S. 345-358
- Laporte, G.: Fifty Years of Vehicle Routing, in: Transportation Science, Vol. 43 (2009), No. 4, S. 408-416
- Lasserre, J.; Mercé, C.: Robust Hierarchical Production Planning under Uncertainty, in: Annals of Operations Research, Vol. 26 (1990), S. 73-87
- Laurent, M.: Vertikale Kooperation zwischen Industrie und Handel, Frankfurt a.M. 1996
- Lee, H.L.; Billington, C.: Material Management in Decentralized Supply Chains, in: Operations Research, Vol. 41 (1993), S. 835-848
- Lee, K.K.: Fuzzy Rule Generation for Adaptive Scheduling in a Dynamic Manufacturing Environment, in: Applied Soft Computing, Vol. 8 (2008), S. 1295-1304
- Leung, S.C.H. et al.: A Robust Optimization Model for Multi-site Production Planning Problem in an Uncertain Environment, in: European Journal of Operational Research, Vol. 181 (2007), S. 224-238
- Li, L.; Lai, K.K.: A Fuzzy Approach to the Multiobjective Transportation Problem, in: Computers and Operations Research, Vol. 27 (2000), S. 43-57

- Liebmann, H.-P.; Zentes, J.: Handelsmanagement, München 2001
- Lien, R.W. et al.: An Efficient and Robust Design for Transshipment Networks, in: Production and Operations Management, Vol. 20 (2011), S. 699-713
- Lin, J.-R.; Nozick, L.K.; Turnquist, M.A.: Strategic Design of Distribution Systems with Economies of Scale in Transportation, in: Annals of Operations Research, Vol. 144 (2006), S. 161-180
- Lindblom, C.E.: The Science of Muddling-Through, in: Public Administration Review, Vol. 19 (1959), S. 79-88
- Löffelholz, J.: Geschichte der Betriebswirtschaft und der Betriebswirtschaftslehre, Stuttgart 1935
- MacKay, D.J.C.: Information Theory, Inference, and Learning Algorithms, Cambridge, 2003
- Mandelbaum, M.; Buzacott, J.: Flexibility and Decision Making, in: European Journal of Operational Research, Vol. 44 (1990), S. 17-27
- Marti, K.: Stochastic Optimization Methods, 2. Aufl., Berlin/Heidelberg 2008
- Martínez-de-Albéniz, V.; Simchi-Levi, D.: A Portfolio Approach to Procurement Contracts, in: Production and Operations Management, Vol. 14 (2005), S. 90-114
- Meffert, H.: Größere Flexibilität als Unternehmenskonzept, in: Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 37. Jg. (1985), S. 121-137
- Meyer, A.: Dienstleistungs-Marketing. Erkenntnisse und praktische Beispiele, Augsburg 1983
- Meyr, H.: Die Bedeutung von Entkopplungspunkten für die operative Planung von Supply Chains, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 73. Jg. (2003), S. 941-962
- Miller, T.: Hierarchical Operations and Supply Chain Planning, Berlin 2001
- Mißler-Behr, M.: Methoden der Szenarioanalyse, Wiesbaden 1993

- Moin, N.H.; Salhi, S.: Inventory Routing Problems: A Logistical Overview, in: *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 58 (2007), S. 1185-1194
- Moinzadeh, K.; Nahmias, S.: Adjustment Strategies for a Fixed Delivery Contract, in: *Operations Research*, Vol. 48 (2000), S. 408-423
- Monczka, R.M. et al.: *Purchasing and Supply Chain Management*, Mason 2011
- Monge, G.: Mémoire sur la Théorie des Déblais et de Remblais, in: *Histoire de l'Académie Royale des Sciences de Paris, avec les Mémoires de Mathématique et de Physique pour la Même Année (1781)*, S. 666-704
- Mörchen, H.: *Sachgerechter Umgang mit Flüssiggasen. Sicherheitsunterweisung nach BGV A1 und ArbSchG*, Renningen-Malmsheim 2001
- Morgenstern, O.: *On the Accuracy of Economic Observations*, New Jersey 1963
- Moser, H.: *Praxis der Aktionsforschung*, München 1977
- Mula, J. et al.: Models for Production Planning under Uncertainty: A Review, in: *International Journal of Production Economics*, Vol. 103 (2006), S. 271-285
- Müller-Hagedorn, L.; Toporowski, W.; Zielke, S.: *Der Handel, Grundlagen – Management – Strategien*, Stuttgart 2012
- Mulvey, J.M.; Vanderbei, R.J.; Zenios, S.A.: Robust Optimization of Large-Scale Systems, in: *Operations Research*, Vol. 43 (1995), S. 264-281
- Murad, A. et al.: On Bi-Criteria Two-Stage Transportation Problem: A Case Study, in: *Transport Problems*, Vol. 5 (2010), No. 3, S. 103-114
- Nickel, S.; Velten, S.; Weimerskirch, G.: Strategische Supply-Chain Entscheidungen in der Stahlindustrie – Eine Fallstudie, in: *Supply Chain Management und Logistik. Optimierung, Simulation, Decision Support*, hrsg. v. H.-O. Günther et al., Heidelberg 2005, S. 157-177
- Orlicky, J.: *Material Requirements Planning*, New York 1975

- Parragh, S.N.; Doerner, K.F.; Hartl, R.F.: A Survey on Pickup and Delivery Problems, in: *Journal für Betriebswirtschaft*, 58. Jg. (2008), S. 81-117
- Pekayvaz, B.: *Strategische Planung in der Materialwirtschaft*, Frankfurt a.M./Bern/New York 1985
- Peters, K. et al.: eCommerce Revisited: The Impact of an Uncoupled Consumer Buying Process on Retailing, in: *Marketing - Journal of Research and Management*, Vol. 5 (2009), S. 85-104
- Peters, S.: Eine Erweiterung des Transportproblems, in: *Zeitschrift für Operations Research*, Vol. 16 (1972), S. B123-B143
- Pfohl, H.-C.: *Logistiksysteme, Betriebswirtschaftliche Grundlagen*, 8. Aufl., Heidelberg et al. 2009
- Picot, A.: Transaktionskosten im Handel. Zur Notwendigkeit einer flexiblen Strukturentwicklung in der Distribution, in: *Der Betriebs-Berater*, Beilage 13 (1986), S. 1-16
- Picot, A.: Ein neuer Ansatz zur Gestaltung der Logistiktiefe, in: *Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung*, 43. Jg. (1991), S. 336-357
- Polanyi, M.: *Personal Knowledge: Towards a Post-Critical Philosophy*, Chicago 1958
- Porter, M.E.: *Wettbewerbsstrategie. Methoden zur Analyse von Branchen und Konkurrenten*, 11. Aufl., Frankfurt a.M./New York 2008
- Porter, M.E.: *Wettbewerbsvorteile. Spitzenleistungen erreichen und behaupten*, 7. Aufl., Frankfurt a.M. 2010
- Postma, T.J.B.M.; Liebl, F.L.: How to Improve Scenario Analysis as a Strategic Management Tool?, in: *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 72 (2005), S. 161-173
- Prümper, W.; Pohl, J.; Thoms, J.: *Beschaffungslogistik im Handel*, in: *Handbuch Handel – Strategien, Perspektiven, Internationaler Wettbewerb*, hrsg. v. J. Zentes, Wiesbaden 2006
- Pyke, D.F.; Cohen, M.A.: Multiproduct Integrated Production-Distribution Systems, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 74 (1994), S. 18-49

- Qureshi, M.N.; Kumar, D.; Kumar, P.: Decision Support Model for Evaluation and Selection of Third Party Logistics Service Providers, in: International Journal of Logistics Systems and Management, Vol. 4 (2008), No. 3, S. 255-281
- Rakke, J.G. et al.: A Rolling Horizon Heuristic for Creating a Liquefied Natural Gas Annual Delivery Program, in: Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 19 (2011), S. 896-911
- Randall, W.S. et al.: Retail Supply Chain Management: Key Priorities and Practices, in: The International Journal of Logistics and Supply Chain Management, Vol. 22 (2011), S. 390-402
- Rathmell, J.M.: What Is Meant by Services?, in: Journal of Marketing, Vol. 30 (1966), No. 4, S. 32-36
- Reihlen, M.: Entwicklungsfähige Planungssysteme. Grundlagen, Konzepte und Anwendungen zur Bewältigung von Innovationsproblemen, Wiesbaden 1997
- Reilly, W.J.: The Law of Retail Gravitation, New York 1931
- Renaud, J.; Laporte, G.; Boctor, F.F.: A Tabu Search Heuristic for the Multi-Depot Vehicle Routing Problem, in: Computers and Operations Research, Vol. 23 (1996), S. 229-235
- Ridder, K.; Holzhäuser, J.: ADR 2011: Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt (GGVSEB), 27. Aufl., Heidelberg et al. 2011
- Rios Insua, D.; French, S.: A framework for Sensitivity Analysis in Discrete Multi-objective Decision-making, in: European Journal of Operational Research, Vol. 54 (1991), S. 176-190
- Rios Insua, D.; Martin, J.: On the Foundations of Robust Decision Making, in: Decision Theory and Decision Analysis: Trends and Challenges, hrsg. v. S. Rios, Dordrecht/Boston/London 1994, S. 103-111
- Rohde, J.; Meyr, H.; Wagner, M.: Die Supply Chain Planning Matrix, in: PPS Management, 5. Jg. (2000), Nr. 1, S. 10-15
- Rosenhead, J.: Rational Analysis for a Problematic World: Problem Structuring Methods for Complexity, Uncertainty and Conflict, West Sussex 1995

- Rosenhead, J.; Elton, M.; Gupta, S.K.: Robustness and Optimality as Criteria for Strategic Decisions, in: *Operational Research Quarterly*, Vol. 23 (1972), S. 413-431
- Rosenkranz, J.A.: Strategic Gas Supply Decisions, in: *Pipeline and Gas Journal*, Vol. 216 (1989), No. 12, S. 27-29
- Roy, B.: A Missing Link in OR-DA: Robustness Analysis, in: *Foundations of Computing and Decision Sciences*, Vol. 23 (1998), No. 3, S. 141-160
- Russell, R.A.; Gribbin, D.: A Multiphase Approach to the Period Routing Problem, in: *Networks*, Vol. 21 (1991), S. 747-765
- Sabri, E.H.; Beamon, B.M.: A Multi-Objective Approach to Simultaneous Strategic and Operational Planning in Supply Chain Design, in: *Omega*, Vol. 28 (2000), S. 581-598
- Sahinidis, N.V.: Optimization under Uncertainty: State-of-the-art and Opportunities, in: *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 28 (2004), S. 971-983
- Sandig, C.: Grundriß der Beschaffung. Teil 1, in: *Die Betriebswirtschaft*, 28. Jg. (1935), Nr. 8, S. 175-182.
- Sarmiento, A. et al.: Stability Analysis of the Supply Chain by Using Neural Networks and Genetic Algorithms, in: *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*, Washington, 09.-12.12.2007, hrsg. v. S.G. Henderson et al., Washington 2007, S. 1947-1955
- Schär, J.F.: *Allgemeine Handelsbetriebslehre*, Leipzig 1911
- Schmalenbach, E.: *Kostenrechnung und Preispolitik*, 8. Aufl., Köln/Opladen 1963
- Schmidt, A.: Operative Beschaffungsplanung und -steuerung: Konzepte und Entscheidungskalküle, in: *Planung, Information und Unternehmensführung*, hrsg. v. N. Szyperski et al., Köln 1985
- Schneeweiß, C.: *Distributed Decision Making*, 2. Aufl., Berlin 2003
- Schneeweiß, C.: *Planung 2, Konzepte der Prozeß- und Modellgestaltung*, Berlin 1992

- Schneeweiß, C.; Kühn, M.: Zur Definition und gegenseitigen Abgrenzung der Begriffe Flexibilität, Elastizität und Robustheit, in: Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 42. Jg. (1990), S. 378-395
- Scholl, A.: Robuste Planung und Optimierung. Grundlagen – Konzepte und Methoden – Experimentelle Untersuchungen, Heidelberg 2001
- Schreyögg, G.: Unternehmensstrategie: Grundfragen einer Theorie strategischer Unternehmensführung, Berlin/New York 1984
- Schrijver, A.: Theory of Linear and Integer Programming, Essex 1986
- Semet, F.; Taillard, E.: Solving Real-Life Vehicle Routing Problems Efficiently Using Tabu Search, in: Annals of Operations Research, Vol. 41 (1993), S. 469-488
- Seýffert, R.: Das Kölner Einzelhandelsinstitut 1928-1938, Bericht über 10 Jahre Forschung und Lehre, Stuttgart 1939
- Sharafali, M.; Co, H.C.: Some Models for Understanding the Cooperation between the Supplier and the Buyer, in: International Journal of Production Research, Vol. 38 (2000), S. 3425-3449
- Shostack, G.L.: Breaking Free from Product Marketing, in: Journal of Marketing, Vol. 41 (1977), No. 2, S. 73-80
- Silver, E.A.; Peterson, R.: Decision Systems for Inventory Management and Production Planning, 2. Aufl., New York 1985
- Simchi-Levi, D.; Chen, X.; Bramel, J.: The Logic of Logistics: Theory, Algorithms, and Applications for Logistics and Supply Chain Management, New York 2005
- Smith, A.: An Inquiring into the Nature and Causes of the Wealth of Nations, London 1776
- Solyali, O.; Cordeau, J.-F.; Laporte, G.: Robust Inventory Routing under Demand Uncertainty, in: Transportation Science, Vol. 46 (2012), S. 327-340
- Soyster, A.L.: Convex Programming with Set-Inclusive Constraints and Applications to Inexact Linear Programming, in: Operations Research, Vol. 21 (1973), S. 1154-1157

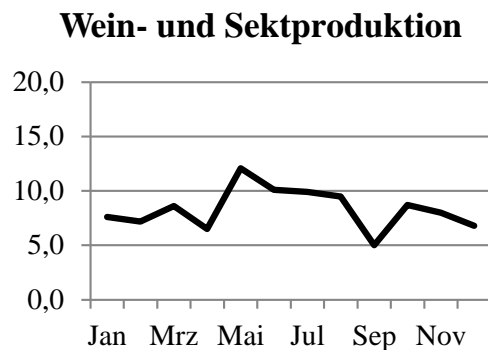
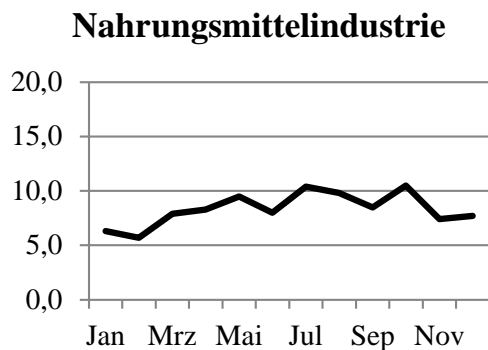
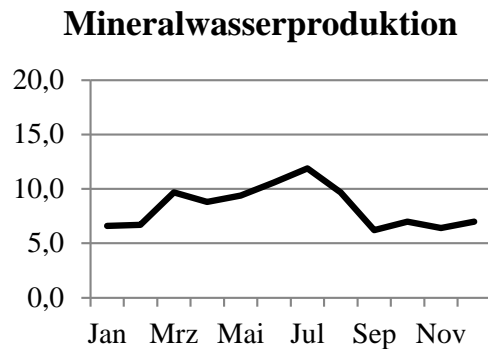
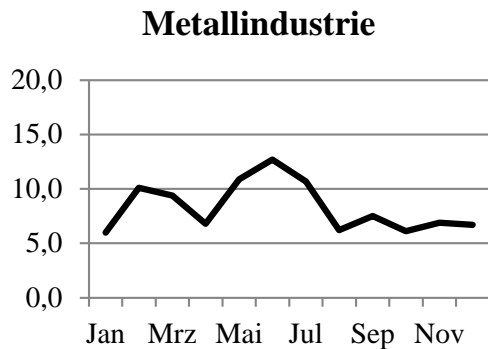
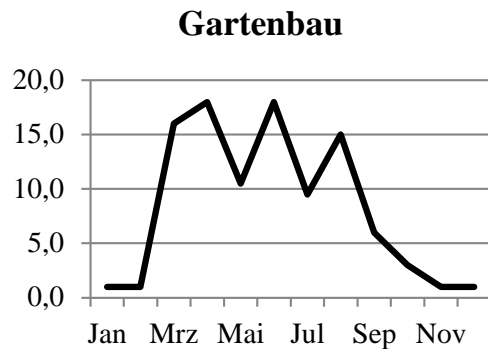
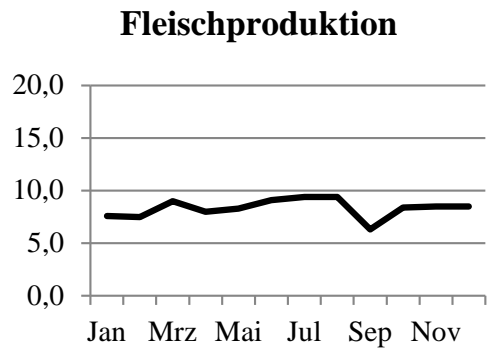
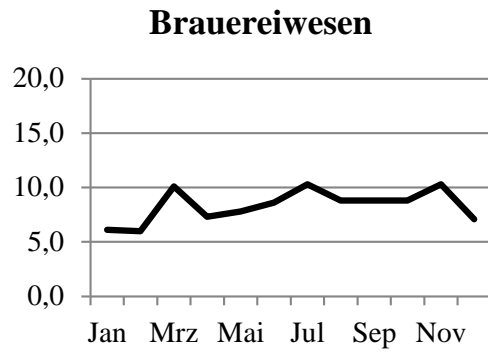
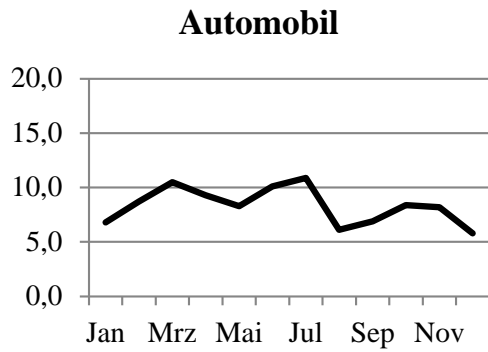
- Stadtler, H.: Hierarchical Production Planning: Tuning Aggregate Planning with Sequencing and Scheduling, in: Multistage Production Planning and Inventory Control, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Bd. 266, hrsg. v. S. Axsäter, C. Schneeweiss u. E. Silver, Berlin et al. 1986, S. 197-226
- Stadtler, H.: Hierarchische Produktionsplanung bei losweiser Fertigung, Heidelberg 1988
- Steinhoff, H.G.: Betriebliche Entscheidungsprozesse: Dynamische Probleme in der Materialwirtschaft, Frankfurt a.M. 1981
- Straube, F.; Pohl, J.; Thoms, J.: Entwicklung einer anwendungsorientierten Handelslogistik, in: Jahrbuch Logistik 2005, hrsg. v. H. Wolf-Kluthausen, Korschbroich 2005, S. 64-67
- Sungur, I.: The Robust Vehicle Routing Problem: A Novel Approach to Uncertainty in a Classical Transportation Problem with Real Life Application, Saarbrücken 2009
- Swindley, D.: Retail Buying in the United Kingdom, in: Service Industries Journal, Vol. 12 (1992), S. 533-544
- Szwarc, W.: The Transportation Problem with Stochastic Demand, in: Management Science, Vol. 11 (1964), S. 33-50
- Szyperski, N.: Das Setzen von Zielen – Primäre Aufgabe der Unternehmensleitung, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 41. Jg. (1971), S. 639-670
- Thangiah, S.R.; Fergany, A.; Awan, S.: Real-Time Split-Delivery Pickup and Delivery Time Window Problems with Transfers, in: Central European Journal of Operations Research, Vol. 15 (2007), S. 329-349
- Theisen, P.: Grundzüge einer Theorie der Beschaffungspolitik, Berlin 1970
- Thonemann, U. et al.: Supply Chain Excellence im Handel, Trends, Erfolgsfaktoren und Best-Practice-Beispiele, Wiesbaden 2005
- Toth, P.; Vigo, D.: The Vehicle Routing Problem, Philadelphia 2002
- Troßmann, E.: Beschaffung und Logistik, in: Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Bd. 3: Leistungsprozess, hrsg. v. F.X. Bea, B. Friedl u. M. Schweitzer, 9. Aufl., Stuttgart 2006, S. 113-181

- Tversky, A.; Kahnemann, D.: Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases, in: Science, Vol. 185 (1974), S. 1124-1131
- Vladimirou, H.; Zenios, S.A.: Stochastic Programming and Robust Optimization, in: Advances in Sensitivity Analysis and Parametric Programming, hrsg. v. T. Gal u. H.J. Greenberg, Boston 1997, S. 12.1-12.53
- Voigt, K.-I.: Strategische Unternehmensplanung: Grundlagen – Konzepte – Anwendungen, Wiesbaden 1993
- Walter, J.B. et al.: Improving the Distribution of Industrial Gases with an On-line Computerized Routing and Scheduling Optimizer, in: Interfaces, Vol. 13 (1983), No. 6, S. 4-23
- Walther, G.; Schatka, A.; Spengler, T.S.: Design of Regional Production Networks for Second Generation Synthetic Bio-fuel – A Case Study in Northern Germany, in: European Journal of Operational Research, Vol. 218 (2012), S. 280-292
- Wang, R.-C.; Liang, T.-F.: Applying Possibilistic Linear Programming to Aggregate Production Planning, in: International Journal of Production Economics, Vol. 98 (2005), S. 328-341
- Weber, J.: Kennzahlen für die Logistik, Stuttgart 1995
- Weber, J.; Wallenburg, C.M.: Logistik- und Supply Chain-Controlling, Stuttgart 2010
- Weigand, M.: Die Erschließung von Zulieferpotentialen als Aufgabe des strategischen Beschaffungsmarketing, Nürnberg 1998
- Werners, B.; Thorn, J.: Supply Chain Planning bei Nachfrageunsicherheit, in: PPS Management, Jg. 7 (2002), H. 2, S. 51–54
- Wild, J.: Grundlagen der Unternehmensplanung, Reinbek bei Hamburg 1974
- Witte, T.: Heuristisches Planen. Vorgehensweise zur Strukturierung betrieblicher Planungsprobleme, Wiesbaden 1979
- Witten, P.; Zimmermann, H.-G.: Stochastische Transportprobleme, in: Zeitschrift für Operations Research, 22. Jg. (1978), S. 55-68

- Wu, Y.: Robust Optimization Applied to Uncertain Production Loading Problems with Import Quota Limits under the Global Supply Chain Management Environment, in: International Journal of Production Research, Vol. 44 (2006), S. 849-882
- Yu, C.-S.; Li, H.-L.: A Robust Optimization Model for Stochastic Logistic Problems, in: International Journal of Production Economics, Vol. 64 (2000), S. 385-397
- Yu, G.; Kouvelis, P.: Complexity Results for a Class of Min-max Problems with Robust Optimization Applications, in: Complexity in Numerical Optimization, hrsg. v. P.M. Pardalos, Singapur 1993, S. 501-511
- Zäpfel, G.: Customer-order-driven Production: An Economical Concept for Responding to Demand Uncertainty?, in: International Journal of Production Economics, Vol. 56 (1998), S. 699-709
- Zäpfel, G.: Bausteine und Architekturen von Supply Chain Management-Systemen, in: PPS Management, 6. Jg. (2001), Nr. 1, S. 9-18
- Zäpfel, G.; Braune, R.; Bögl, M.: Metaheuristic Search Concepts. A Tutorial with Applications to Production and Logistics, Berlin/Heidelberg 2010
- Zäpfel, G.; Mitter, J.: Hierarchisches Planung für industrielle Logistikdienstleister, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 80. Jg. (2010), S. 1277-1304
- Zentes, J.: Effizienzsteigerungspotentiale kooperativer Logistikketten in der Konsumgüterwirtschaft, in: Logistik – Gestaltung von Logistik-Systemen, hrsg. v. H. Isermann, 2. Aufl., Landsberg/Lech 1998
- Zentes, J.; Schramm-Klein, H.: Neue Anforderungen an die Handelslogistik, in: Beiträge zu einer Theorie der Logistik, hrsg. v. P. Nyhuis, Hannover 2008
- Zentes, J.; Swoboda, B.; Foscht, T.: Handelsmanagement, 3. Aufl., München 2012
- Zhang, J.-I.; Chen, J.: Supplier Selection and Procurement Decisions with Uncertain Demand, Fixed Selection Costs and Quantity Discounts, in: Computers and Operations Research, Vol. 40 (2013), S. 2703-2710

Anhänge

A Darstellung der Saisonalitäten in verschiedenen Branchen



B Modellierung des Grundmodells unter Berücksichtigung der Bedarfsqualitäten

Die folgende Modellierung kann zur Bestimmung der Bestellmengen verschiedener Bedarfsqualitäten im Flüssiggashandel verwendet werden. Darüber hinaus ist damit auch die Möglichkeit angedacht, die vorgeschlagene Vorgehensweise für den Mehrproduktfall in anderen Branchen zu nutzen.

Die von den Kunden gewünschte bzw. von den Lieferanten bereitgestellte Menge einer Qualitätsklasse wird mit Hilfe des Indexes q ($q = 1, \dots, Q$) bei der MengenvARIABLE x_{ijtq} abgebildet. Dies führt zu der erweiterten Zielfunktion (Q.1), die die Summe aus Transport-, Bestell- und Strafkosten minimiert:

$$\begin{aligned} \text{Minimiere } K = & \sum_{q=1}^Q \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_{ijt} \cdot d_{ij} \cdot x_{ijtq} + \sum_{q=1}^Q \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m k_{itq} \cdot x_{ijtq} \\ & + \sum_{q=1}^Q \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n y_{itq} \cdot k_{itq} \cdot \left(U_{itq} - \sum_{j=1}^m x_{ijtq} \right) \end{aligned} \quad \text{Q.1}$$

mit:

x_{ijtq} Die von Lieferant i bezogene und an den Kunden j zu liefernde Menge einer Qualitätsklasse q in Periode t .

α_{ijt} Transportkostenfaktor für die Belieferung von Kunde j durch Lieferant i in Periode t .

d_{ij} Distanz von Lieferant i zu Kunde j .

k_{itq} Preis und Staffelpreis pro von Lieferant i abgenommener Tonne einer Qualitätsklasse q in Periode t .

U_{itq} Vereinbarte Minimalabnahmemenge einer Qualitätsklasse q von Lieferant i in Periode t .

y_{itq} Binärvariable zur Darstellung der Unterschreitung der vereinbarten Minimalabnahmemenge einer Qualitätsklasse q von Lieferant i in Periode t .

$$y_{itq} = \begin{cases} 1 & \text{wenn } \sum_{j=1}^m x_{ijtq} \leq U_{itq} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Die Zielfunktion wird dabei unter folgenden, dem Grundmodell ähnlichen Nebenbedingungen minimiert:

Die Erfüllung der bezüglich Qualitätsklasse, Zeitpunkt und Menge spezifizierten Kundenbedarfe ist vorzunehmen:

$$\sum_{i=1}^n x_{ijtq} = b_{jtq} \quad (\text{Q.2})$$

Die Einhaltung der entsprechenden Maximalabnahmemengen der Lieferanten wird abgebildet:

$$\sum_{j=1}^m x_{ijtq} \leq O_{itq} \quad (\text{Q.3})$$

mit

$$z_{itq} = \begin{cases} 1 & \text{wenn } \sum_{j=1}^m x_{ijta} \geq O_{itq} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (\text{Q.4})$$

Die zweite mit den Lieferanten vereinbarte Staffel darf erst aktiviert werden, wenn die Maximalabnahmemengen der ersten Staffel erreicht wurden:

$$\sum_{j=1}^m x_{ijtq} \leq O_{itq} - O_{itq} (1 - z_{i-n,t,q}) \quad (\text{Q.5})$$

Dabei gelten folgende Variablendefinitionen:

$$x_{ijtq} \geq 0 \quad (\text{Q.6})$$

$$y_{itq}, z_{itq} \in \{0, 1\} \quad (\text{Q.7})$$

Über diese an das Grundmodell angelehnten Nebenbedingungen hinaus muss nun die Möglichkeit integriert werden, Kunden nicht nur mit der gewünschten Qualitätsklasse zu beliefern, sondern auch die Substitution durch höherwertige Qualitätsklassen in die Betrachtung einzubeziehen. Dies kann insbesondere der Fall sein, wenn Lieferanten höherwertiger

Klassen in geographischer Nähe zum Kunden liegen und somit die Kostensenkung in den Transportkosten die Kostenerhöhung durch die höherwertigere Qualitätsklasse (über-)kompensiert.

Hierfür werden folgende Qualitätsklassen angenommen, die sich auf die in Kapitel 2.1 dargestellte Qualitätssubstitutionstabelle beziehen:

Qualitätsklasse	
q=1	Natürliche Kohlensäure
q=2	Biogene Kohlensäure
q=3	Technische Kohlensäure

Anhand dieser Qualitätsklassen können nun die Substitutionsregeln modelliert werden. Hierfür stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung.

Möglichkeit 1

Die Nebenbedingung (Q.2) wird in folgende drei Nebenbedingungen aufgeteilt:

$$\sum_{i=1}^n x_{ijt1} + \sum_{i=1}^n x_{ijt2} + \sum_{i=1}^n x_{ijt3} = b_{jt3} \quad (\text{Q.2a})$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ijt1} + \sum_{i=1}^n x_{ijt2} = b_{jt2} \quad (\text{Q.2b})$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ijt1} = b_{jt1} \quad (\text{Q.2c})$$

Möglichkeit 2

Alternativ können die Anzahl der Nebenbedingungen und der Variablen reduziert werden, indem die Gleichung (Q.8) eingeführt wird.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{q=1}^Q e_{jq} \cdot x_{ijtq} = b_{jt} \quad \forall i, j, t \quad (\text{Q.8})$$

Hierbei wird der Parameter e_{jq} genutzt, der die von einem Kunden j akzeptierten Qualitäten q nach folgender Akzeptanzmatrix angibt:

Anhänge

	Kunde j akzeptiert		
	q=1	q=2	q=3
e_{1q}	1	0	0
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
e_{jq}	0	0	1

Hierbei entspräche dann die erste Zeile beispielsweise der Formel (Q.2c).

Beide Möglichkeiten sind geeignet, um die Formulierung verschiedener Qualitätsklassen oder verschiedener Produkte abzubilden. Hierbei gilt gleichermaßen, dass zur Abbildung eines Kunden, der parallel mehrere Produkte nachfragt, Dummy-Kunden für jedes weitere Produkt eingeführt werden können.

C Detaillierte Ergebnisse der Berechnung des Grundmodells

Relative Veränderung in %	Transportkosten	Bestellkosten	Kennzahl km/t
Jan 2009	- 31,83	- 8,84	- 30,82
Feb 2009	- 27,17	- 7,48	- 27,16
Mär 2009	- 34,37	- 7,08	- 33,91
Apr 2009	- 29,80	- 5,47	- 30,95
Mai 2009	- 30,07	- 8,02	- 29,08
Jun 2009	- 33,31	- 5,72	- 33,46
Jul 2009	- 33,68	- 4,07	- 34,90
Aug 2009	- 44,41	- 7,74	- 43,29
Sep 2009	- 36,39	- 9,43	- 34,69
Okt 2009	- 37,47	- 7,16	- 36,99
Nov 2009	- 32,57	- 7,75	- 31,74
Dez 2009	- 28,71	- 4,79	- 29,94
Mittelwert	- 33,31	- 6,96	- 33,08

D Quellcode für die Generierung von ergänzenden stochastischen Parametern

Der folgende Quellcode dient der Darstellung der Berechnungsvorschrift für die Erzeugung von weiteren Bedarfen, wobei in diesem Fall von einer starken Schwankung ausgegangen wird: Das zugrundeliegende Intervall, indem die Zufallszahlen Anwendung finden, ist von null bis zum doppelten Bedarfswert des realen Kunden definiert.

```
% Generiert zufällige Bedarfe für 3 Szenarien
% im Intervall [0, 2*Bedarf], die gleichverteilt sind!

function G = Bedarfsgenerator1(file)

% Daten einlesen - in Excel extra Namen 'Demand_Excel' definieren, de
% nur für die Bedarfsspalte (ohne Index) gilt

Demand = xlsread(file, 'Bedarfe_Index', 'Demand_Excel')

% Daten manipulieren

for i = 1:size(Demand,1)
    if Demand(i,1) == 0
        Demand_1(i,1) = 0
        Demand_2(i,1) = 0
        Demand_3(i,1) = 0
    else
        % Zufallszahlen zwischen 0 und 1 generieren.
        Zufallszahl_1(i,1) = rand(1)
        Zufallszahl_2(i,1) = rand(1)
        Zufallszahl_3(i,1) = rand(1)

        % ungerundete Bedarfe für die Szenarien berechnen
        Hilfsvariable_1(i,1) = 2*Demand(i,1)*Zufallszahl_1(i,1)
        Hilfsvariable_2(i,1) = 2*Demand(i,1)*Zufallszahl_2(i,1)
        Hilfsvariable_3(i,1) = 2*Demand(i,1)*Zufallszahl_3(i,1)

        % Bedarfe für die Szenarien werden auf drei Dezimalstellen
        % gerundet
        Demand_1(i,1) = round(1000*Hilfsvariable_1(i,1))/1000
        Demand_2(i,1) = round(1000*Hilfsvariable_2(i,1))/1000
        Demand_3(i,1) = round(1000*Hilfsvariable_3(i,1))/1000
    end
end
end
```

Anhänge

```
% Generierte Bedarfe in Excel-Tabelle schreiben  
xlswrite(file, Demand_1, 'Bedarfe_Index', 'D2:D403')  
xlswrite(file, Demand_2, 'Bedarfe_Index', 'E2:E403')  
xlswrite(file, Demand_3, 'Bedarfe_Index', 'F2:F403')
```

Ein analoges Vorgehen kann für die Erzeugung von kleinen und mittleren Schwankungen der Kundennachfragemengen und des Transportkostenfaktors gewählt werden.

Berufliche Erfahrungen

- 11/09 – 10/2013 **Lehrstuhl für Produktionswirtschaft**, TU Kaiserslautern
Wissenschaftliche Mitarbeiterin
- 07/08 – 10/08 **Daimler AG**, Ulm
Diplomandin in der Forschung & Entwicklung
- 04/07 – 12/08 **Robert Bosch Stiftung**, Stuttgart und Berlin
Studentische Projektassistentin und Praktikantin
- 08/04 – 10/04 **Fundación Cerro Verde, Guayaquil**, Ecuador
Volontärin
- 02/03 - 08/09 **Humboldt-Universität zu Berlin**
Studentische Hilfskraft

Ausbildung

- 10/03 – 06/09 **Friedrich-Schiller-Universität**, Jena
Betriebswirtschaftslehre,
Spezialisierung in Betrieblicher Entscheidungsanalyse (Prof. A. Scholl)
und Produktion/Industriebetriebslehre (Prof. R. Haupt und Prof. N. Boysen)
- 08/06 – 03/07 **Łazarski University of Commerce and Law**, Warschau, Polen
Studium der Internationalen Beziehungen
- 08/99 – 06/02 **Humboldt-Gymnasium**, Eichwalde