

Planungsrobuste Kapazitätsdimensionierung in Closed-Loop Supply Chains

**- Entwurf und Evaluierung
eines prognoseintegrierenden Ansatzes**

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor rerum politicarum (Dr. rer. pol.)

Eingereicht an der
Fakultät Wirtschaftswissenschaften
der Technischen Universität Dortmund

Vorgelegt von
Dipl.-Wirt.-Math. Sandra Panitz

März 2017

Gliederung

Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Symbolverzeichnis	IX
1 Motivation.....	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Stand der Forschung.....	8
1.2.1 Kapazitätsdimensionierung in Closed-Loop Supply Chains	8
1.2.2 Prognose von Güterrückflüssen	22
1.3 Forschungsbedarf	32
1.4 Zielsetzung und Vorgehensweise.....	37
2 Strukturierung des Planungsproblems	42
2.1 Planungssituationen	42
2.2 Grundmodell	47
2.2.1 Abgrenzung von Teilmodellen	47
2.2.2 Güterflussmodell.....	51
2.2.3 Kapazitätsanpassungsmodell	55
2.3 Erweiterungen zur Generierung von Robustheit.....	59
2.3.1 Berücksichtigung zusätzlicher Handlungsoptionen.....	60
2.3.2 Berücksichtigung von Unsicherheit.....	64
2.3.2.1 Annahmen	65
2.3.2.2 Zweistufiges Kompensationsmodell	69
2.3.3 Berücksichtigung sukzessiver Informationszugänge.....	71
2.4 Zusammenführung der Erweiterungen.....	76
2.5 Robustheitsmessung.....	78
3 Strukturierung des Prognoseproblems	83
3.1 Vorüberlegungen.....	83
3.2 Prognosemodelle.....	90
3.2.1 Univariates Grundmodell.....	90
3.2.2 Berücksichtigung mehrerer Güterarten.....	94

III

3.2.2.1. Multivariates Grundmodell	95
3.2.2.2 Situationsspezifische Modifikationen	102
3.3 Prognose.....	107
3.3.1 Endogene Größen	107
3.3.2 Exogene Größen	112
3.4 Besonderheiten der Integration des Prognose- in das Planungsmodell.....	115
3.4.1 Handhabung unrealistischer Prognosewerte	115
3.4.2 Handhabung nicht stationärer Zeitreihen.....	119
4 Numerische Analyse.....	121
4.1 Zielsetzung.....	121
4.2 Testaufbau.....	127
4.2.1 Datenbasis.....	127
4.2.1.1 Güterfluss	127
4.2.1.2 Potentialfaktoren	131
4.2.1.3 Generierung der Zeitreihen des Vorproduktes	134
4.2.2 Szenariengenerierung.....	137
4.2.3 Ablauf der Rollierenden Planung	141
4.3 Durchführung.....	149
4.4 Auswertung der Planungsergebnisse	151
4.4.1 Berechnungszeiten	151
4.4.2 Realisierter Kapitalwert	153
4.4.3 Robustheit	159
4.4.3.1 Ergebnisrobustheit.....	159
4.4.3.2 Planungsrobustheit	163
5 Fazit.....	170
Literatur	178
Anhang.....	XIV

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Vorgänge in einer CLSC	3
Abbildung 1.2: Zusammenhänge zwischen Entscheidungs- und Prognoseatbeständen bei der Kapazitätsdimensionierung einer CLSC	7
Abbildung 2.1: Beispielhafte Kapazitätsanpassung von Gütererstellungs- und Rückflussbewältigungskapazität	49
Abbildung 2.2: Struktur des Planungsansatzes.....	50
Abbildung 2.3: Rollierende Planung	73
Abbildung 2.4: Planungsablauf	74
Abbildung 2.5: Rollierende Kapazitätsdimensionierung.....	75
Abbildung 3.1: Spektrum von Prognosemodellen mit dynamischen Regressionsgleichungen.....	85
Abbildung 3.2: Wahl eines geeigneten Schätzverfahrens	99
Abbildung 3.3: Struktur des Prognosemodells	108
Abbildung 3.4: Prognose unter Unsicherheit.....	110
Abbildung 3.5: Wachstums- und Sättigungsmodell	113
Abbildung 4.1: Struktur des Güterflusses der analysierten CLSC	127
Abbildung 4.2 : Absatz-, Nachfrage-, Rückfluss- und Rücknahmemengen des Vorproduktes	137
Abbildung 4.3: Erzeugte Szenarien der Initialprognose der Nachfrage in der Szenariokonstellation 0 (Auszug)	140
Abbildung 4.4: Ablauf der rollierenden Planung	142
Abbildung 4.5: Stationäre Nachfrage-, Absatz-, Rückfluss- und Rücknahmemengen des Vorproduktes	144
Abbildung 4.6: Durchschnitt der generierten Kapitalwerte der Vergleichskonstellation SK0 in Planungssituation I und IV für alle Auszahlungs- und Flexibilitätskonstellationen.....	153
Abbildung 4.7: Durchschnittliche relative Veränderung des Kapitalwertes zur Vergleichskonstellation SK0 in der Planungssituation I bei Unter- und Überschätzung der Nachfrage	155
Abbildung 4.8: Durchschnittliche relative Veränderung des Kapitalwertes zur Vergleichskonstellation SK0 in der Planungssituation IV bei Unter- und Überschätzung der Nachfrage	155

Abbildung 4.9: Variationskoeffizient der generierten Kapitalwerte der Vergleichskonstellation SK0 in Planungssituation I und IV für alle Auszahlungs- und Flexibilitätskonstellationen.....	160
Abbildung 4.10: Variationskoeffizienten der Kapitalwerte in der Planungssituation I bei Unter- und Überschätzung der Nachfrage	161
Abbildung 4.11: Variationskoeffizienten der Kapitalwerte in der Planungssituation IV bei Unter- und Überschätzung der Nachfrage.....	161
Abbildung 4.12: Durchschnittliche Planungsrobustheit der Vergleichskonstellation SK0 in den Planungssituationen I und IV	163
Abbildung 4.13: Durchschnittliche Planungsrobustheit der Kapazitätsanpassungsentscheidungen in der Planungssituation I bei Unter- und Überschätzung	164
Abbildung 4.14: Durchschnittliche Planungsrobustheit der Expansions- und Kontraktionsentscheidungen in der Planungssituation IV bei Unter- und Überschätzung	165

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1:	Übersicht deterministischer Ansätze der Kapazitätsdimensionierung in CLSCs	10
Tabelle 1.2:	Übersicht stochastischer Ansätze der Kapazitätsdimensionierung in CLSCs.....	16
Tabelle 2.1:	Planungssituationen	44
Tabelle 2.2:	Handlungsalternativen für die Kapazitätsdimensionierung.....	46
Tabelle 3.1:	Zu modellierende Variablen bzw. Parameter	89
Tabelle 3.2:	Situationsspezifische Modifikationen des Grundmodells bei wechselseitigen Abhängigkeiten.....	104
Tabelle 3.3:	Situationsspezifische Modifikationen des Grundmodells bei einseitigen Abhängigkeiten.....	106
Tabelle 4.1:	Zugrunde gelegte Planungssituationen.....	122
Tabelle 4.2:	Mengenwirkungen der Transformationen	128
Tabelle 4.3:	Wertmäßige Wirkungen der Güterarten j pro Stück.....	129
Tabelle 4.4:	Kalkulation der Ausführungskosten	130
Tabelle 4.5:	Kapazitätsbedarf der Prozesse nach Kapazitätsarten	131
Tabelle 4.6:	Eignungsmatrizen der unterschiedlichen Flexibilitätsstufen 1, 2 und 3	132
Tabelle 4.7:	Variable Kapazitätsexpansions- und kontraktionszahlungen.....	132
Tabelle 4.8:	Fixe Kapazitätsexpansions- und kontraktionszahlungen.....	133
Tabelle 4.9:	Realisationsverzögerung von Kapazitätsanpassungsentscheidungen	133
Tabelle 4.10:	Parameterkombinationen der Nachfrage des Vorproduktes.....	135
Tabelle 4.11:	Konstellationen der prognostizierten und realisierten Absatzhöchstmengen	138
Tabelle 4.12:	Parameterkombinationen der Niveauveränderung der Nachfrage	139
Tabelle 4.13:	Skizze des Testdesigns	141
Tabelle 4.14:	Spezifikation der Prognosemodelle	143
Tabelle 4.15:	Relevante Prognosemodelle	144
Tabelle 4.16:	Anzahl der zu ermittelnden Parameter	145
Tabelle 4.17:	Ergebnisse der berechneten Informationskriterien nach Akaike..	146

VII

Tabelle 4.18:	Ergebnisse der Stabilitätsüberprüfung.....	146
Tabelle 4.19:	Prozentuale Verwendung der unterschiedlichen VARX-Modelle mit Lagordnungen l (exogen) und l' (endogen) bei 4 Updates im rollierenden Planungshorizont für Planungssituation I und IV	151
Tabelle 4.20:	Durchschnitte und Variationskoeffizienten der Berechnungszeiten (Sekunden) in Planungssituation I und IV.....	152
Tabelle 4.21:	Durchschnittliche relative Veränderung des Kapitalwertes zur Vergleichskonstellation SK0	156
Tabelle 4.22:	Durchschnittliche relative Veränderung der Planungsrobustheit zur Vergleichskonstellation SK0	166

Abkürzungsverzeichnis

ADL	Autoregressives Distributed-lag-Modell
AR	Autoregressiver Prozess
ARIMA	Univariates autoregressives Modell
ARMAX	Univariates autoregressives Modell mit exogenen Variablen
C	Konsum
CLSC	Closed-Loop Supply Chain
CRDW	Kointegrierte-Regression-Durbin-Watson-Statistik
D	Entsorgungsmarkt
DL	Distributed-lag-Modell
FGLS	Feasible-Generalized-Least-Squares-Schätzung
GLS	Generalized-Least-Square-Schätzung
IV	Instrumentenvariablen-Schätzung
KK	Auszahlungskonstellation für Kapazitätsanpassung
LS	Least-Squares-Schätzung
M	Produktion
ML	Maximum-Likelihood-Schätzung
OLS	Ordinary-Least Square-Schätzung
P	Beschaffungsmarkt
R	Reparatur
SC	Supply Chain
SEM	Systeme mit simultanen Gleichungen
SK	Szenariokonstellation
T	Aufarbeitung
VARMA	Vektor-autoregressive Modelle
VARMAX	Multivariates autoregressives Modell mit exogenen Variablen
VECM	Fehlerkorrekturmodell

Symbolverzeichnis

Entscheidungsvariablen und Parameter

Die folgenden Entscheidungsvariablen und Parameter können als Skalar oder Vektor bzw. Matrix in der Dissertation verwendet werden. Wenn das Symbol fettgedruckt ist, handelt es sich um einen Vektor oder eine Matrix. Wenn das Symbol nicht fettgedruckt ist, ist das Symbol ein Skalar.

<i>a</i>	Regressionsparameter der Wachstumsfunktion
<i>A</i>	Planabstand
<i>ab</i>	Anzahl der Beobachtungen
<i>AB</i>	Abschreibung
<i>AD</i>	Additionsvektor
<i>AIC</i>	Informationskriterium nach Akaike
<i>ap</i>	Anzahl der Parameter
<i>b'</i>	Verweildauer
<i>B</i>	Verschiebungsoperator
<i>BIC</i>	Informationskriterium nach Schwarz
<i>C</i>	Gesamtkapazität des Prozesses
<i>CA</i>	Eignung des Potentialfaktors
<i>ce</i>	Kapazitätsexpansion
<i>ck</i>	Kapazitätskontraktion
<i>CZ</i>	Zuordnung der Gesamtkapazität
<i>d</i>	Ordnung der Integration
<i>D</i>	Allokation der Kapazitätsnachfrage
<i>e</i>	Genauigkeit
<i>E(·)</i>	Erwartungswertfunktion
<i>f</i>	Kalkulationszinsfuß
<i>f(·)</i>	Dichtefunktion der Rückflusswahrscheinlichkeit
<i>F</i>	Gesamtkapazität (Zeitfond) des Potentialfaktors
<i>F(·)</i>	Verteilungsfunktion der Rückflusswahrscheinlichkeit

X

$g(\cdot)$	Funktion
G	Einzahlungsüberschuss
$HF(\cdot)$	Hazard-Funktion
I	Investitionsauszahlung
ie	Variable Auszahlungen für Kapazitätsexpansion
IE	Fixe Auszahlungen für Kapazitätsexpansion
ik	Variable Auszahlungen für Kapazitätskontraktion
IK	Fixe Auszahlungen für Kapazitätskontraktion
L	Lagerbestand
$LC(\cdot)$	Wachstumsfunktion
lk	Prognostizierter Absatzpreis der abgebauten Kapazität
LK	Liquidationserlös
KA	Kapazitätsplan des Potentialfaktors
KD	Abweichung der Kapazitätspläne des Potentialfaktors
M	Sehr große Zahl
ME	Absatzhöchstmenge
MI	Beschaffungshöchstmenge
ml	Wert der Maximum-Likelihood-Funktion
n	Planungsperiode
N	Nachfrage
p	Szenariowahrscheinlichkeit
P	Wahrscheinlichkeit
P'	Wahrscheinlichkeit, dass abgesetzte Gütermengen nicht wieder zurückfließen
PE	Absatzpreis
PI	Beschaffungspreis
PL	Lagerhaltungskosten
pr	Rückflusswahrscheinlichkeit
\widehat{pr}	Wahrscheinlichkeit, dass das Produkt überhaupt zurückfließt
PR	Sammlungskosten
PT	Transformationskosten

XI

q	Parameter einer Linearkombination
qe	Wahrscheinlichkeit der Kapazitätsexpansion
qk	Wahrscheinlichkeit der Kapazitätskontraktion
R	Ordnung der Kointegration
r, \hat{r}	Polynomordnung
RM	Durchschnittliche Robustheit eines Potentialfaktors
$S(\cdot)$	Überlebensfunktion der Rückflusswahrscheinlichkeit
SU	Stichprobenumfang
u	Störterm
U	Basisaktivität
v, \hat{v}	Koeffizienten
$V(\cdot)$	Varianz
$VarK$	Variationskoeffizient
ve	Wertaufbau der Kapazität
vr	Restwert der Kapazitätskontraktion
W	Festgelegter Betrag
x	Exogene Variable
XE	Absatzmenge
XF	Güterflussmenge
XI	Beschaffungsmenge
XL	Lagerbestandsveränderung
XN	Rücknahmemenge
XR	Güterrückflussmenge
y	Endogene Variable
YE	Binärvariable für Kapazitätsexpansion
YK	Binärvariable für Kapazitätskontraktion
YN	Einflussgröße
z	Linearkombination
Z	Realisierter Barwert
ZM	Mittelwert der realisierten Barwerte
α	Rücknahmequote

XII

β	Regressionskoeffizient exogener Variablen
$\hat{\beta}$	Rückflusswahrscheinlichkeit eines Produktes unter der Bedingung, dass das Produkt überhaupt zurückkommt
γ	Regressionskoeffizient endogener Variablen
Γ	Regressionskoeffizient der differenzierten endogenen Variable (im VECM)
δ	Binärvariable der Linearisierung
$\hat{\delta}$	Stärke des Störterms der Brockhoff-Funktion
Δ	Differenzenoperator
ε	Weißes Rauschen
ζ	Absolutterm
η	Regressionskoeffizient des Störterms
$\hat{\eta}$	Zufallszahl
θ	Quantil der Standardnormalverteilung
κ	Kapazitätsnachfrage des Prozesses
λ	Gewichtungsfaktor der Einflussgrößen
μ	Erwartungswert
ξ	Unsicherheit
Π	Regressionskoeffizient (im VECM)
ρ	Regressionskoeffizient des Störterms, der einem Moving-Average-Prozess folgt
σ	Standardabweichung
τ	Prozessniveau
Υ	Regressionskoeffizient der differenzierten exogenen Variable (im VECM)
ω	Gewichtungsfaktor für Planabweichung
Ω	Kovarianz

Indizes und Superskripte

b	Lag
ep	Experiment ($ep = 1, \dots, EP$)
h	Potentialfaktor
i	Prozess ($i = 1, \dots, I$)
j	Güterart ($j = 1, \dots, J$)
k	Kapazitätsart ($k = 1, \dots, K$)
l	Lag-Index ($l = 0, \dots, L$) der exogenen Variablen
l'	Lag-Index ($l' = 1, \dots, L'$) der endogenen Variablen
\hat{l}	Lag-Index ($\hat{l} = 1, \dots, \hat{L}$) der Kapazitätsanpassungen
\hat{l}	Lag-Index ($\hat{l} = 1, \dots, \hat{L}$) des Störterms
m	Einflussgrößenindex ($m = 1, \dots, M$)
p	Lag-Index ($p = 1, \dots, P$) des Störterms, der einem Moving-Average-Prozess folgt
PR	prognostiziert
PS	Planungsschritt ($PS = 1, \dots, \widehat{PS}$)
s	Szenario ($s = 1, \dots, S$)
t	Periode des Planungszeitraums ($t = 0, \dots, T$)
t'	Zeitverschiebung
TR	transponiert

Markierungen

$\bar{\bullet}$	Realisierte Werte
$\tilde{\bullet}$	Unsicherheit
*	Multiplikation mit Matrizen

1 Motivation

1.1 Problemstellung

Der effiziente Umgang mit Güterrückflüssen ist ein Problembereich, dem in der jüngeren Vergangenheit im Kontext von Supply Chains ein großes wissenschaftliches und praktisches Interesse entgegengebracht wird¹⁾. Supply Chains (SC), die neben Gütererstellungsprozessen auch auf die Rückflüsse dieser Güter gerichtete Prozesse²⁾ umfassen und damit dem kreislaufwirtschaftlichen Gedanken Rechnung tragen, werden als Closed-Loop Supply Chains (CLSC) bezeichnet³⁾. Drei *Phasen des Güterrückflusses* lassen sich unterscheiden⁴⁾:

- *Sammlung*: dezentrale Entgegennahme oder Abholung der Güter vom Konsumenten, Transport zu einem Konzentrationspunkt und Zwischenlagerung.
- *Transformation*:
 - Sortieren: zustands- und funktionsbezogene Unterscheidung der Güter in die Klassen wiederverwendbare, verwertbare und zu entsorgende Güter.
 - Aufarbeiten: zerstörungsfreie Demontage und/oder Instandhaltung der Güter zum Zweck einer funktionellen Wiederverwendung.
 - Aufbereiten: zerstörungsfreie/zerstörende Demontage und Stofftrennung (ggf. Schadstoffentnahme) zum Zweck der Gewinnung von Sekundärrohstoffen.

¹⁾ Vgl. Huang/Yan/Qiu (2009), S. 2282 ff.; Salema/Barbosa-Póvoa/Novais (2009), S. 580 ff.; Salema/Barbosa-Póvoa/Novais (2010), S. 338 ff.

²⁾ Mit dem Fokus auf das dabei entstehende raum-zeitliche Überbrückungsproblem wird auch von Reverse Logistics gesprochen. Vgl. Fleischmann et al. (1997), S. 2.

³⁾ Vgl. Dyckhoff/Souren/Keilen (2004), S. 15 ff.; Geyer/van Wassenhove (2005), S. 203; Govindan/Soleimani/Kannan (2015), S. 604 ff. Open-Loop Supply Chains erfassen den Fall der Güterrückführung durch SC-Externe.

⁴⁾ Vgl. Bloemhof-Ruward/Fleischmann/van Nunen (1999), S. 24 f.; de Brito/Dekker/Flapper (2005), S. 245; de Brito/de Koster (2004), S. 136 ff.; Fleischmann et al. (2000), S. 657; Geyer/van Wassenhove (2005), S. 205 ff.; Jayaraman (2005), S. 982; Kricke/van Harten/Schuur (1998), S. 118 ff.; Püchert/Spengler/Rentz (1996), S. 29 f.; Spengler/Schröter (2001), S. 231; Srivastava/Srivastava (2006), S. 527 f.; Stuart et al. (1998), S. 226 f.

- *Einsatz:*

- Wiederverwendung im Gütererstellungs- oder Konsumtionsprozess in den Abstufungen (1) direkte Wiederverwendung, (2) Wiederverwendung nach Veränderung durch (2a) teilweise Erneuerung und/oder (2b) Reparatur¹⁾,
- Verwertung von Sekundärrohstoffen durch Recycling (stoffliche Verwertung) oder Energiegewinnung und
- Deponierung der Reststoffe (Abfall).

Da auf der Grundlage dieser Prozesse Güterrückflüsse von jeder Wertschöpfungsstufe genutzt werden und die zurückgeflossenen Güter auf allen Stufen wieder in den Wertschöpfungsprozess eintreten können, ergibt sich in CLSC (im Vergleich zur klassischen SC) eine vielfältigere Vernetzung zwischen den Wertschöpfungsstufen (vgl. Abbildung 1.1). Gleichzeitig erlangen zusätzliche Imponderabilien Relevanz, die sich bei der Gestaltung von CLSC in der Unsicherheit über die Weiterentwicklung der Produkte²⁾ und neben den traditionellen Unsicherheitsfaktoren, die aus prozess- und nachfrageorientierten Begebenheiten resultieren, in der Unsicherheit über das zeitliche, mengenmäßige, qualitative und örtliche Auftreten von Rückflüssen widerspiegeln³⁾. Letztlich ergibt sich aus den zusätzlichen Prozessen⁴⁾, der vielfältigeren Vernetzung und der erhöhten Unsicherheit⁵⁾ eine gesteigerte Komplexität der SC-Gestaltungsaufgaben.

¹⁾ Bei Endprodukten werden diese Abstufungen als Direct reuse (1a: direkte Wiederverwendung neuwertiger funktionsfähiger Produkte), Refurbishing (1b: direkte Wiederverwendung gebrauchter funktionsfähiger Produkte), Remanufacturing (2a: Wiederverwendung gebrauchter funktionsfähiger Produkte nach teilweiser Erneuerung), Repair (2b: Wiederverwendung gebrauchter Produkte nach Wiederherstellung ihrer Funktionsfähigkeit) bezeichnet. Vgl. Thierry et al. (1995), S. 117 ff. Bei Produktkomponenten wird die Wiederverwendung teilweise als Cannibalization bezeichnet. Vgl. Thierry et al. (1995), S. 119.

²⁾ Vgl. Guide/van Wassenhove (2002), S. 56.

³⁾ Vgl. Geyer/van Wassenhove (2005), S. 205; Spengler/Schröter (2001), S. 237 f.

⁴⁾ Vgl. Kaya/Bagci/Turkay (2014), S. 271; Schröter (2006), S. 52.

⁵⁾ Vgl. Aksoy/Gupta (2002), S. 167; Bai/Sarkis (2013), S. 307; Guide/van Wassenhove (2009), S. 10 ff.

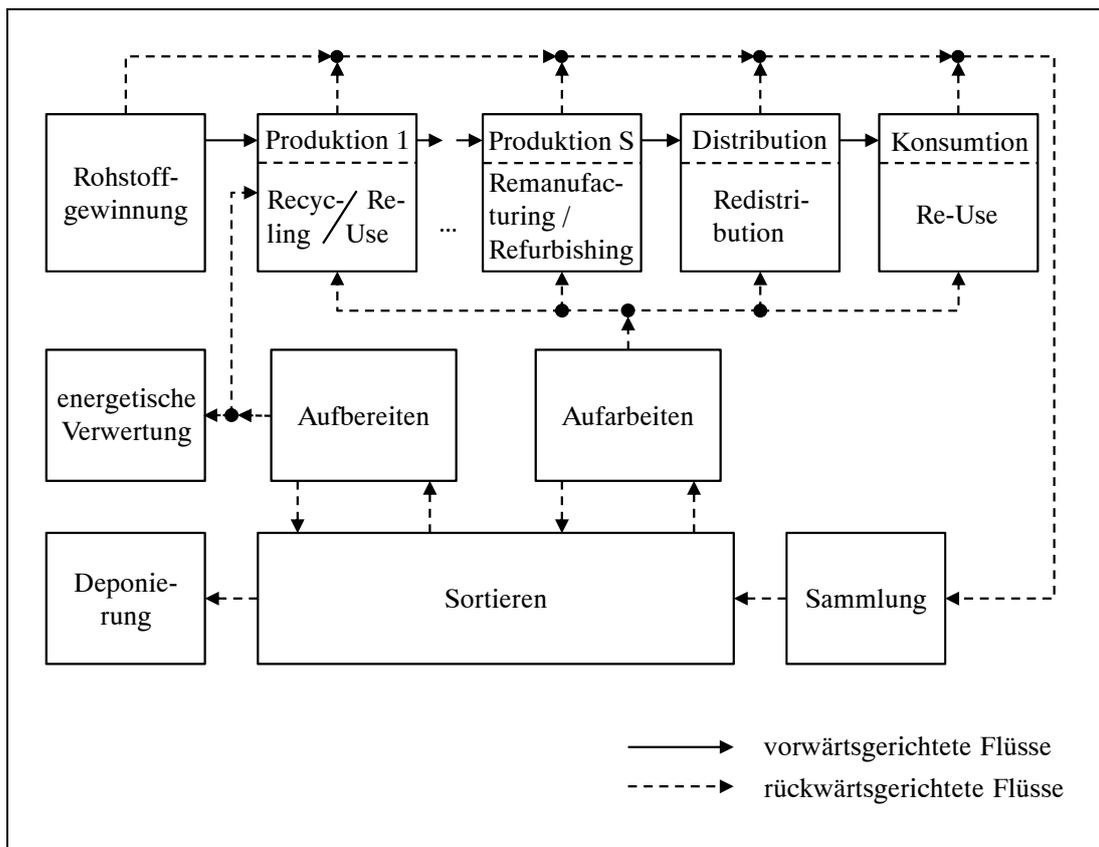


Abbildung 1.1: Vorgänge in einer CLSC

In der vorliegenden Dissertation stehen das Problem der Kapazitätsdimensionierung und das daraus abgeleitete Problem der Güterrückflussprognose im Zentrum des Interesses¹⁾. Unter *Kapazitätsdimensionierung* wird im vorliegenden Kontext die durch Ausstattungs- und Programmmentscheidungen zu bewirkende Abstimmung zwischen dem Leistungsvermögen der CLSC und der gütererstellungs- und güterrückflussinduzierten Kapazitätsnachfrage verstanden. Aufgrund des mittelfristigen zeitlichen Horizonts und der resultierenden relativ starken Kapitalströme handelt es sich bei der Kapazitätsdimensionierung in CLSCs um ein spezifisches Problem der Investitionsprogrammplanung bei unvollständiger Information bzw. Unsicherheit (Risiko). Da

¹⁾ Da die für Sammlung, Transformation und Einsatz verfügbare Kapazität den Umfang der Nutzbarkeit von Güterrückflüssen limitiert (vgl. Georgiadis/Athanasίου (2010), S. 424) sind die Güterrückflussprognose und die Kapazitätsdimensionierung zentrale taktische Probleme des CLSC Management. Vgl. Guide/Srivastava/ Spencer (1997), S. 71 ff.; Guide/van Wassenhove (2002), S. 58; Spengler/Schröter (2001), S. 232.

das Ausmaß und die Wirkungen der Investitions- und Desinvestitionsentscheidungen die Existenz der einzelnen Unternehmungen gefährden können, liegt eine Risikoaversion des Entscheidungsträgers vor. Unsicherheiten können nach dem Kriterium der Position der Unsicherheitsquelle in Bezug auf die Netzwerkgrenzen in CLSCs gehandhabt werden. Dabei kann zwischen interner und externer Unsicherheit unterschieden werden¹⁾. Die interne Unsicherheit (z.B. Produktqualität, Prozessdauer, Betriebsmittelverfügbarkeit) kann durch das Management ursachen- und wirkungsbezogen gehandhabt werden. Demgegenüber sind bei externer Unsicherheit (z.B. Absatzhöchstmenge, Güterrückflussmenge, -qualität, -zeit, -ort, Wiederbeschaffungszeiten von Einsatzgütern) die ursachenbezogenen Möglichkeiten vor allem auf die Anreicherung der Informationsbasis durch intensive Informationsbeschaffungs- und -verarbeitungsaktivitäten beschränkt, und die verbleibende Unsicherheit ist durch wirkungsbezogene Maßnahmen zu handhaben. Bei risikoavermem Entscheidungsverhalten stellt das Generieren robuster Pläne eine relevante wirkungsbezogene Maßnahme dar.

Mit der zyklischen Struktur des Güterflusses besteht bei der Kapazitätsdimensionierung das Erfordernis, zusätzlich zu dem Produktprogramm und der Produkterstellungskapazität das Rückflussgüterprogramm und die Rückflussbewältigungskapazität zu gestalten²⁾, und zwar unter Berücksichtigung der folgenden Beziehungen:

- *Marktinterdependenzen*: Die möglichen Maßnahmen zur Handhabung der Güterrückflüsse (z.B. Re-Use, Redistribution, Remanufacturing, Refurbishing, Recycling und Entsorgung) beeinflussen das Nachfrageverhalten des Marktsektors. Die Rückflussgüter in unterschiedlich transformierten Produkttypen können sich zu komplementären oder konkurrierenden Produkten der Originalprodukte entwickeln³⁾. Dabei ist die Relevanz der Berücksichtigung der Interdependenzen dadurch gegeben, dass absatzpolitische Maßnahmen eines Produktes das Ent-

¹⁾ Die Einteilung ist angelehnt an Aksoy/Gupta (2002), S. 167 f., die in einem Remanufacturing-System durch Kapazitätserweiterungen und/oder Lagererweiterungen die Unsicherheiten handhaben möchten.

²⁾ Vgl. Toktay/van der Laan/de Brito (2004), S. 45, die Beschaffungs-, Kapazitäts- und Abfallplanung als wesentliche taktische Aufgaben in CLSC bezeichnen.

³⁾ Vgl. z.B. Bhattacharjee/Cruz (2015), S. 67 ff.; Shu et al. (2016), S. 3209.

scheidungsfeld eines anderen Produktes beeinflussen bzw. verändern¹⁾. Zusätzlich kann sich der umsichtige Umgang mit Güterrückflüssen indirekt über das Image der CLSC positiv/negativ auf die Nachfrage nach deren Produkten auswirken²⁾.

- *Leistungsinterdependenzen*: Dies sind Wechselbeziehungen, die sich in einem mehrstufigen Wertschöpfungsprozess ergeben. Die Prozesse der Gütererstellung und der Güterrückfluss-handhabung können durch nachgelagerte Input-/Output-beziehungen in Prozessen zur Leistungserstellung miteinander verknüpft sein. Zurückgeflossene Güter können zumindest teilweise im Produkterstellungsprozess wiederverwendet werden. Der Anteil der Wiederverwendung ist u.a. von der Qualität des originären Produktes sowie der Qualität und Quantität zurückfließender Güter abhängig. Diese Abhängigkeiten beeinflussen die Qualität, Kosten und Verfügbarkeit der Leistungen. In der Literatur werden folgende Besonderheiten genannt:
 - Für Rückflussgüter einer bestimmten Qualitätsklasse³⁾ werden die unterschiedlichen Transformationsmöglichkeiten mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit gewählt: Die Wahl der Transformationsmöglichkeiten basiert im operativen Kontext auf einem Entscheidungskalkül, das technische, ökonomische und ökologische Faktoren gegeneinander abwägt⁴⁾. In der mittelfristigen Perspektive der Kapazitätsdimensionierung können diese Optionen aggregiert als Ereignisse abgebildet werden, deren Eintrittswahrscheinlichkeit von der qualitativen Kapazität des Transformationssystems, die durch die Kapazitätsdimensionierung festgelegt wird, abhängig ist.
 - Nach der Durchführung einer bestimmten Transformationsmöglichkeit wird ein Rückflussgut den unterschiedlichen Einsatzarten mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zugeführt: In den im operativen Kontext zu treffenden Einzelentscheidungen erfolgt eine Abwägung der Vorteilhaftigkeit aus technischer, ökonomischer und ökologischer Perspektive. Im taktischen Kontext können die Einsatzarten als Ereignisse aufgefasst werden, die mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zum Zuge kommen⁵⁾.

¹⁾ Zur Definition von Marktinterdependenzen vgl. z.B. Frese (2012), S. 117 f.

²⁾ Vgl. Handfield et al. (2002), S. 70 ff.; Vlachos/Georgiadis/Iakovou (2007), S. 371 ff.

³⁾ Die Qualitätsklassen grenzen dabei technische Zustände der Rückflussgüter ab, die unterschiedliche Transformationsmöglichkeiten erlauben. Vgl. Chouinard/D'Amours/Ait-Kadi (2008), S. 661 ff.; Franke et al. (2006), S. 564 ff.; Kricke/van Harten/Schuur (1998), S. 118; Seliger et al. (2004), S. 10; Teunter (2006), S. 534.

⁴⁾ Vgl. Das/Yedlarajah (2002), S. 120 f.; Kim et al. (2006), S. 281 ff.; Kricke/van Harten/Schuur (1998), S. 121 ff.; Li et al. (2010), S. 632 ff.; Spengler/Ploog/Schröter (2003), S. 414 ff.; Thierry et al. (1995), S. 122; Vlachos/Dekker (2003), S. 43 ff.

⁵⁾ Vgl. Chouinard/D'Amours/Ait-Kadi (2008), S. 663; Franke et al. (2006), S. 564 f.; Guide/Spencer (1997), S. 241; Seliger et al. (2004), S. 10; Teunter (2006), S. 534.

- Aus einer bestimmten Transformation von Rückflussgütern einer bestimmten Qualität gehen untergeordnete Rückflussgüter einer bestimmten Qualität mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit hervor. Neben Nutzungsdauer und Nutzungsort des Rückflussgutes, welches das untergeordnete Gut enthält, wird die Qualität des untergeordneten Gutes auch von der am übergeordneten Gut vollzogenen Transformation (z.B. zerstörende und zerstörungsfreie Demontage) bestimmt¹⁾.
- *Ressourceninterdependenzen*: Ressourceninterdependenzen bestehen, wenn Produktionserstellungs- und Rückflussbewältigungsprozesse um dieselben Potentialfaktoren (Ressourcen) der CLSC konkurrieren. Verschiedene Rückflusshandhabungsmaßnahmen, wie z.B. das Remanufacturing, benötigen u.U. die gemeinsame Nutzung von (knappen) Ressourcen und Fähigkeiten. Diesbezüglich werden folgende Relationen in der Literatur diskutiert:
 - Bei einer bestimmten Transformationsmöglichkeit wird auf die unterschiedlichen Kapazitätsarten mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zurückgegriffen: Die Arbeitspläne der einzelnen Transformationsmöglichkeiten sind nicht-linear und nicht-deterministisch. In Abhängigkeit von der Zusammensetzung und der Qualität der Rückflussgüter einer Art sowie von der installierten qualitativen Kapazität wird innerhalb einer Transformationsmöglichkeit einerseits die Ausführung unterschiedlicher Operationen erforderlich. Andererseits kann zwischen alternativ möglichen Operationen gewählt werden, so dass unterschiedliche Kapazitätsarten beansprucht werden²⁾.
 - Das Ausmaß der zeitlichen Inanspruchnahme bei Rückgriff auf eine bestimmte Kapazitätsart (Kapazitätsnachfrage) ist nicht-deterministisch und von der Qualität der zu transformierenden Rückflussgüter abhängig³⁾.
 - Zwischen einer Kapazitätsveränderungsentscheidung und ihrer Umsetzung bestehen Verzögerungen. In Abhängigkeit vom Ausmaß der Kapazitätsveränderung bedarf der Kapazitätsaufbau/-abbau unterschiedlich viel Zeit⁴⁾.

Während die Bestimmung des Kapazitätsangebots hauptsächlich durch Gestaltungsentscheidungen innerhalb der SC beeinflusst wird, ergibt sich die Kapazitätsnachfrage aus den Wechselbeziehungen zwischen Gütererstellungs- und Güterrückflussmengen. Dabei entziehen sich letztere zumindest bei den Endprodukten der autono-

¹⁾ Vgl. Teunter (2006), S. 534.

²⁾ Vgl. Guide/Spencer (1997), S. 240; Guide/Srivastava/Spencer (1997), S. 70; Inderfurth et al. (2004), S. 252 ff.; Krupp (1993), S. 48 ff.

³⁾ Vgl. Guide/Spencer (1997), S. 240; Lieckens/Vandaele (2007), S. 398 ff.

⁴⁾ Vgl. Georgiadis/Vlachos/Tagaras (2006), S. 519.

men Disponierbarkeit durch die Entscheidungsträger der CLSC, weil Absatz und Güterrückfluss auch das Ergebnis von Kundenentscheidungen sind. Der Mix der zurückfließenden Güter und ihres Einsatzes bestimmt den Anteil der zum Planungszeitpunkt nur ungefähr bekannten Güter und damit den Umfang der nur grob abschätzbaren Kapazitätsnachfrage.

Damit ergeben sich die aus der Kapazitätsdimensionierung abgeleiteten Aufgaben, die Nachfrage nach Endprodukten und den Güterrückfluss in qualitativer und quantitativer Hinsicht zu prognostizieren und daraus eine Schätzung der Kapazitätsnachfragen abzuleiten. Abbildung 1.2 gibt die Zusammenhänge in graphischer Form wieder.

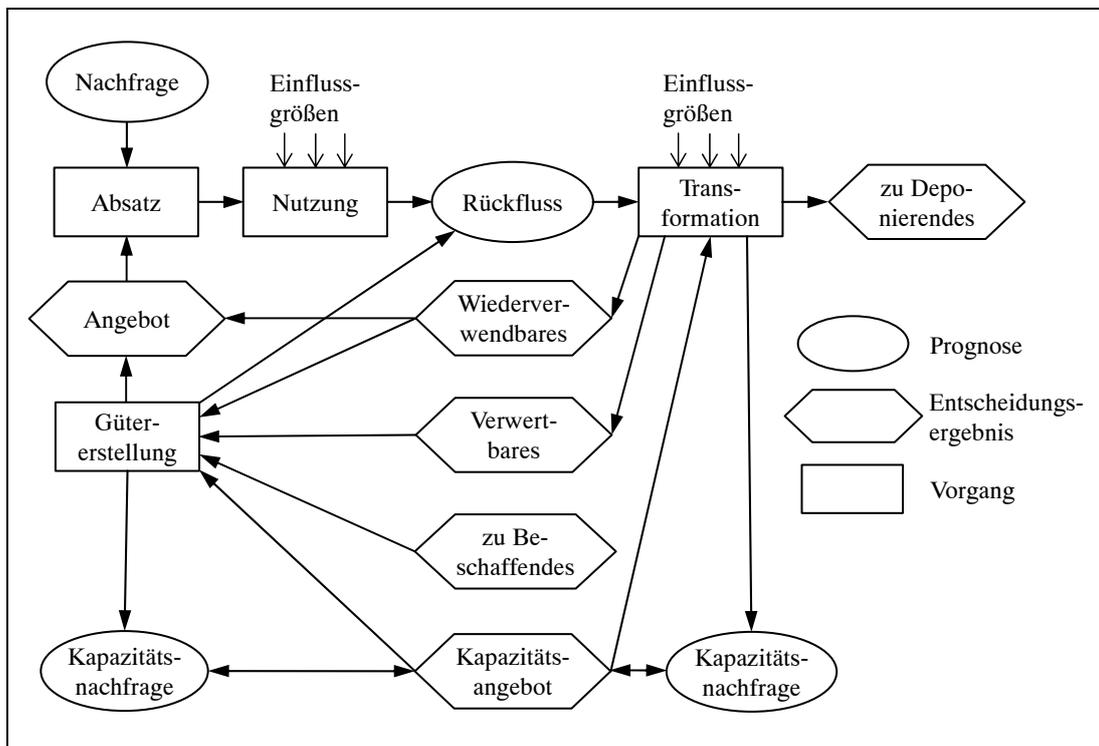


Abbildung 1.2: Zusammenhänge zwischen Entscheidungs- und Prognosetatbeständen bei der Kapazitätsdimensionierung einer CLSC

1.2 Stand der Forschung

In Unterabschnitt 1.2.1 werden die in der Literatur diskutierten Ansätze zur Kapazitätsdimensionierung in CLSCs anhand geeigneter Kriterien analysiert, um Forschungslücken zu identifizieren¹⁾. Aufgrund der hohen Relevanz der Prognose der Güterrückflüsse für das vorliegende Problem der Kapazitätsdimensionierung, werden die in der Literatur diskutierten Methoden in Unterabschnitt 1.2.2 untersucht.

1.2.1 Kapazitätsdimensionierung in Closed-Loop Supply Chains

Die Analyse der Ansätze zur Kapazitätsdimensionierung wird anhand der (1) möglichen *Kapazitätsentscheidungen*, der (2) berücksichtigten *Interdependenzen* zwischen originären Produkten und (aufbereiteten) Güterrückflüssen und der (3) integrierten *Maßnahmen zur Handhabung von Unsicherheiten* vorgenommen. (1) Die Kapazitätsentscheidungen lassen sich anhand der möglichen Handlungsalternativen und berücksichtigten Kapazitätsarten charakterisieren. Handlungsalternativen können die Kapazitätsexpansion und -kontraktion sein. Die Kapazitätsarten werden anhand ihres Einsatzortes eingeteilt. Kapazitäten können sowohl in Prozessen zur Gütererstellung (vorwärtsgerichtete SC) als auch in Prozessen zur Rückflussbewältigung (rückwärtsgerichtete SC) eingesetzt werden. (2) Die Ansätze werden anhand der betrachteten Markt-, Ressourcen- und Leistungsinterdependenzen analysiert. Die originären Produkte können sowohl komplementäre als auch konkurrierende Nachfrage auf dem Absatzmarkt induzieren. Bzgl. der Ressourceninterdependenzen soll identifiziert werden, ob die Güter der vorwärts- und rückwärtsgerichteten SC um dieselben Ressourcen konkurrieren. Zudem ist zu klären, ob die Leistungserstellung dieser Güter durch vor- und nachgelagerte Prozesse miteinander verbunden ist. (3) Unter *ursachenbezogenen* Maßnahmen werden alle Aktivitäten verstanden, die zur Vermeidung, Minderung und Begrenzung des Eintrittes von Risiken führen²⁾. *Wirkungsbe-*

¹⁾ Für eine Übersicht zu Ansätzen zur Kapazitätsdimensionierung in traditionellen SCs siehe Julka et al. (2007), S.607 ff.; Luss (1982), S. 907 ff.; Martínez-Costa (2014), S. 66 ff.; Van Mieghem (2003), S. 269 ff.; Verter/Dincer (1992), S. 1 ff.; Wu/Erkoc/Karabuk (2005), S. 125 ff.

²⁾ Vgl. Pfohl/Gallus/Köhler (2008), S. 66 ff.

zogene Maßnahmen dagegen intendieren die Verminderung, Begrenzung und Kompensation der Auswirkungen bei Eintritt der Unsicherheiten.

Auf einer übergeordneten Ebene erfolgt zunächst eine Einteilung der Ansätze anhand der Vollständigkeit ihrer Informationsbasis in deterministische und stochastische Ansätze. In den folgenden Planungsansätzen bei *vollständiger Information* werden die bestehenden Unsicherheiten in CLSC nicht explizit modelliert. Die Ergebnisse der Analyse sind in der Tabelle 1.1 zusammengefasst.

Franke et al. und *Seliger et al.* formulieren für den Fall einer Unternehmung, die zurückgenommene Mobiltelefone transformiert, ein statisches deterministisches Kapazitätsplanungsproblem mit mehreren Optionen einer mehrstufigen Transformation der Rückflussmengen verschiedener Produktklassen, bei der unterschiedliche Kapazitätsarten genutzt werden. Die Möglichkeit zum Kapazitätsaufbau ist gegeben. In dem gemischt-ganzzahligen Programmierungsmodell wird von einem in quantitativer und qualitativer Hinsicht bekannten Güterrückfluss und bekannten Nachfragemengen unterschiedlich transformierter Rückflüsse ausgegangen. Aus der Lösung dieses Modells mit einem Standard-Solver geht hervor, in welchem Umfang welche Rückflussgütermengen in welcher Form zu transformieren und abzusetzen sind, sowie wie viel Kapazität der einzelnen Arten dafür aufzubauen ist, damit ein maximaler Gewinn realisiert wird.¹⁾

¹⁾ Vgl. Franke et al. (2006), S. 564 ff.; Seliger et al. (2004), S. 10 ff.

Georgiadis/Vlachos/Tagaras, Vlachos/Georgiadis/Iakovou und *Georgiadis/Athanasiou* formulieren einen inkrementellen Planungsansatz, bei dem auf der Grundlage eines periodischen Vergleichs zwischen prognostiziertem Kapazitätsbedarf und aktuell vorliegendem Kapazitätsbestand über Expansion (und teilweise auch Kontraktion) zweier Kapazitätsarten zur Rückflusstransformation (Sammlung, Remanufacturing) entschieden wird. Besonderheiten sind dabei: (1) Die Kapazitätsänderungen treten teilweise mit Verzögerung ein. (2) Das Ausmaß der Kapazitätsänderungen entspricht der festgestellten Über-/Unterdeckung, multipliziert mit der festzulegenden Contraction bzw. Expansion rate. Folgende Interdependenzen werden berücksichtigt: (1) Im Zweiprodukt-Ansatz von *Georgiadis/Athanasiou* werden sowohl konkurrierende als auch komplementäre Absatzbeziehungen zwischen den zwei unterschiedlichen Produkttypen und ihren aufbereiteten Güterrückflüssen berücksichtigt. (2) Im Einproduktfall sind die aufbereiteten Güterrückflüsse Substitute zu den in der vorwärtsgerichteten SC erstellten Produkte. (3) *Vlachos/Georgiadis/Iakovou* integrieren die positive Auswirkung der Güterrückflussannahme und -verarbeitung auf die Nachfrage anhand einer Re-Use-Rate im Modell. (4) Die Leistungserstellung in der vorwärts- und rückwärtsgerichteten SC erfolgt unabhängig voneinander. Des Weiteren können Rücknahmeverpflichtungen bzgl. der genutzten Güter bestehen¹⁾. Grundlage bildet ein Simulationsmodell (System dynamics), welches die sich bei Vorgabe von Simulationsparametern (stock variables, flow variables) ergebenden Güterhinflüsse und -rückflüsse einer Einprodukt- bzw. Zweiprodukt-CLSC erfasst sowie mit Hilfe des exponentiellen Glättens erster Ordnung prognostiziert. Mit diesem Modell kann einerseits das Systemverhalten (z.B. Barwert der erwarteten Ein- und Auszahlungen) für die gewählten Contraction/Expansion rates in unterschiedlichen Nachfrageszenarien (Schätzung des Produktlebenszyklus) ermittelt werden (What-if-Analyse). Andererseits können durch systematische Variation der Contraction/Expansion rates in-

¹⁾ Vgl. *Georgiadis/Athanasiou* (2010), S. 422 ff.; Vgl. *Vlachos/Georgiadis/Iakovou* (2007), S. 371 ff.

nerhalb eines Szenarios ökonomisch günstige Werte dieser Parameter gefunden werden.¹⁾

Im erweiterten Ansatz von *Georgiadis/Athanasίου* werden zwei mögliche Kapazitätsstrategien bzgl. der Expansionsentscheidung (zeitlich frühe hohe Kapazitätsinvestition oder Kapazitätsinvestition mit wenigen kleinen Erweiterungen) zur Bewältigung der Rückflüsse einer Zweiprodukt-CLSC mit Remanufacturing-Option gegeben. Die aufwendige numerische Analyse, in der Nachfrageszenarien und Rückflussdaten systematisch variiert werden, zeigt, dass flexible Strategien unter Unsicherheit immer eine zulässigkeitsrobuste Lösung finden und dass das Phänomen einer Kapazitätsüberschätzung vermieden wird.²⁾

Georgiadis und *Surdato/Takahashi/Morikowa* formulieren einen Planungsansatz zur Kapazitätsplanung in einer Einprodukt-CLSC mit Recycling-Option, bei dem aufbauend auf einem periodischen Vergleich der prognostizierte Kapazitätsbedarf und der aktuell vorliegende Kapazitätsbestand für beide Kapazitätsarten über Expansion (und teilweise auch Kontraktion) abgestimmt werden. Im Ansatz von *Georgiadis* wird die Kapazität für die Prozesse der Produktion und des Recyclings angepasst; im Ansatz von *Surdato/Takahashi/Morikowa* für die Sammlung und das Recycling. Der zuletzt genannte Ansatz integriert zusätzlich die von *Georgiadis/Athanasίου* (2013) aufgezeigte Kapazitätsstrategie. Recyceltes Material (selbst aufbereitet oder fremdbezogen) fließt als Rohstoff in die Produktion ein. Die Güterhin- und Rückflüsse werden wie in den anderen Simulationsmodellen (System dynamics) durch Simulationsparameter modelliert und prognostiziert. Die Verwendung von recyceltem Material hat einen positiven Effekt auf die Produktnachfrage.³⁾

¹⁾ Vgl. *Georgiadis/Athanasίου* (2010), S. 422 ff.; *Georgiadis/Vlachos/Tagaras* (2006), S. 517 ff.; *Vlachos/Georgiadis/Iakovou* (2007), S. 371 ff.

²⁾ Vgl. *Georgiadis/Athanasίου* (2013), S. 44 ff., auf der Grundlage von *Georgiadis/Athanasίου* (2010), S. 422 ff.

³⁾ Vgl. *Georgiadis* (2013), S. 116 ff., *Surdato/Takahashi/Morikawa* (2017), S. 179 ff. Beide sind angelehnt an *Georgiadis/Athanasίου* (2010), S. 422 ff. und *Georgiadis/Vlachos/Tagaras* (2006), S. 517 ff.

Lee/Doh/Lee formulieren ein gemischt ganzzahliges Entscheidungsmodell zur Produktions- und Kapazitätsplanung in einem hybriden Produktions- und Remanufacturing-System für einen definierten Planungshorizont. Kapazitätsentscheidungen über Expansion und Kontraktion der Produktions- und Remanufacturing-Anlagen sind in jeder Periode für Produktfamilien möglich. Das Budget der Kapazitätsentscheidungen im ganzen Planungshorizont ist begrenzt. Die zu erfüllende Nachfrage kann durch fremdbezogene, erstellte oder aufbereitete Güter bedient werden. Nachfragemengen sind für unterschiedliche Produkttypen bekannt. Rückflussmengen sind Entscheidungsvariablen, die stets geordert und transformiert werden können. Die Planung der Produktion und der Aufbereitung erfolgt getrennt. Ziel ist es, die Summe der Produktions- (fix und variabel), Aufbereitungs- (fix und variabel), Lagerhaltungs- und Fremdbezugskosten sowie der Nicht-Inbetriebnahmekosten der Anlagen (fixe Kosten für Kapazitätsanpassungen) zu minimieren.¹⁾

Mahapatra/Pal/Narasimhan entwickeln ein gemischt-ganzzahliges mehrperiodiges lineares Modell zur Produktionsplanung in einem hybriden System mit Remanufacturing-Option. In diesem Ansatz besteht die Möglichkeit, die vorhandenen Kapazitäten (Produktion, Remanufacturing und Lagerung) kurzfristig und temporär zu erweitern. Die Kapazitäten sind beschränkt und die Möglichkeit der Kapazitätskontraktion ist nicht gegeben. Die Planung geht von stabilen und konstanten Planungswerten für Produktion, Aufarbeitung und Lager sowie einem eingeplanten Mengenpuffer aus und somit von konstanten Kapazitätsbedarfen. Abhängig von den prognostizierten (gegebenen) Absatz- und Rückflussmengen (mit unterschiedlicher Qualität) können temporäre Erhöhungen der Planwerte erfolgen, die mit fixen Anpassungskosten bewertet werden. Abhängig von den Qualitäten der Güterrückflüsse werden unterschiedlich hohe Rückbewältigungskapazitäten benötigt. Ziel ist es, die optimalen Absatz-, Beschaffungs-, Entsorgung-, Lager-, Produktions- und Verwertungsmengen

¹⁾ Vgl. Lee/Doh/Lee (2015), S. 1645 ff.

unter der Berücksichtigung von Kapazitätserweiterungen zu bestimmen, um den Gewinn zu maximieren.¹⁾

In der Gesamtsicht zeigt die Analyse der möglichen Kapazitätsentscheidungen in den deterministischen Planungsansätzen folgende Ergebnisse:

- In allen Ansätzen ist die Möglichkeit des Kapazitätsaufbaus gegeben; ein Kapazitätsabbau ist nur bei der Hälfte der Ansätze möglich.
- Nur in wenigen Ansätzen werden die Kapazitäten für das Produktions- und Rückbewältigungsprogramm simultan geplant. In den Simulationsmodellen werden überwiegend (mit einer Ausnahme²⁾) die Kapazität für Sammlung und Transformation geplant.

In Bezug auf die Berücksichtigung der Interdependenzen zwischen den originären Produkten und den Güterrückflüssen können für die zuvor beschriebenen Ansätze folgende Aussagen getätigt werden:

- Unterschiedliche Ausprägungen von Marktinterdependenzen können in den Ansätzen identifiziert werden: Die Aufbereitung der Güterrückflüsse kann zu einer Erhöhung der Produktnachfrage führen. Anhand einer Wiederverwendungsrate wird der „green image“-Effekt auf die Produktnachfrage abgebildet. Dieser positive Effekt wird durch Werbemaßnahmen der Unternehmung begründet³⁾. In anderen Ansätzen mit Remanufacturing-Option induzieren aufbereitete Güterrückflüsse als komplementäre Produkte eine eigene Nachfrage. In den Ansätzen der Zweiprodukt-CLSC werden auch Szenarien mit komplementären Beziehungen berücksichtigt.
- Die Analyse der Planungsansätze zeigt auf, dass keine Ressourceninterdependenzen zwischen den originären Produkten und den Rückflüssen in den Entscheidungsmodellen abgebildet werden.
- In Recycling-Systemen können Leistungsinterdependenzen in den Planungssituationen identifiziert werden. Die Produktion der originären Produkte (Produktionsprogramm) ist von den aufbereiteten Güterrückflüssen abhängig, da diese als Rohstoffe in die Leistungserstellung eingehen.

¹⁾ Vgl. Mahapatra/Pal/Narasimhan (2012), S. 3786 ff.

²⁾ Vgl. Georgiadis (2013), S. 116 ff.

³⁾ Vgl. Vlachos/Georgiadis/Iakovou (2007), S. 376 ff.

In den bereits dargestellten deterministischen Ansätzen spielt die Handhabung von Unsicherheit (ursachen- bzw. wirkungsbezogene Maßnahmen) eine untergeordnete Rolle:

- In den meisten Ansätzen werden die unsicheren Parameter durch deterministische Werte abgeschätzt. Es wird angegeben, dass hinreichend Daten für eine Prognose der zukünftigen Umweltzustände vorhanden sind. Der Güterrückfluss wird als Rate abhängig von der Absatzmenge und teilweise von der Residenzzeit (Dauer des Verbleibes beim Konsumenten) angegeben. Die Produktnachfrage wird z.B. durch Abschätzung eines Produktlebenszyklus modelliert. Ein weiterer Ansatz für die Prognose der Produktnachfrage, der Güterrückflussmengen und der Aufarbeitungsrate ist die Methode des exponentiellen Glättens erster Ordnung¹⁾.
- Die auf einem Simulationsmodell aufbauenden Ansätze analysieren im Rahmen von Sensitivitätsanalysen die Veränderungen der Kapazitätsentscheidungen bei wechselnden Inputparametern. Es werden insbesondere wechselnde Prozesszeiten, Residenzzeiten und Qualitäten der rückfließenden Güter, sowie bestimmte Charakteristika des Produktlebenszyklus im Hinblick auf deren Einfluss auf die optimale Strategie hin untersucht.
- *Georgiadis/Athanasίου* und *Surdato/Takahashi/Morikowa* untersuchen in einer Sensitivitätsanalyse die Eignung von flexiblen Kapazitätsaufbaustrategien bei Nachfrage- und Rückflussunsicherheit. Die Anpassungsfähigkeit wird auch im Hinblick auf die Vermeidung von Überkapazität untersucht. Dabei geht es im engeren Sinne nicht um eine Maßnahme zur Verminderung der Auswirkungen von Unsicherheit, sondern um die strategische Entscheidungsfindung einer geeigneten Handlungsalternative.²⁾
- *Mahapatra/Pal/Narasimhan* berücksichtigen in ihrem Beitrag den Aufbau von Pufferbeständen, um flexibel auf Nachfrage- und Rückflussschwankungen reagieren zu können (Bestandsflexibilität)³⁾. Da der Planungsansatz deterministisch ist, wird die Zielwirkung der Maßnahme anhand einer Sensitivitätsanalyse untersucht.

Da davon auszugehen ist, dass in realen Produktionsumgebungen Unsicherheit vorherrscht, sind Planungsansätze relevant, die diese berücksichtigen. Zunächst werden

¹⁾ Vgl. Georgiadis (2013), S. 116 ff.; Vlachos/Georgiadis/Iakovou (2007), S. 371 ff.

²⁾ Vgl. Georgiadis/Athanasίου (2013), S. 44 ff.; Surdato/Takahashi/Morikawa (2017), S. 179 ff.

³⁾ Vgl. Mahapatra/Pal/Narasimhan (2012), S. 3786 ff.

die in der Literatur diskutierten Planungsansätze mit einer *unvollständigen Informationsbasis* kurz erläutert und anschließend anhand der beschriebenen Kriterien analysiert (siehe Tabelle 1.2).

			Benedito/Corominas (2011)	Chittamvanich/Ryan (o.J.)	Kaya/Bagci/Turkay (2014)	Serrato/Ryan/Gaytán (2007)	
Kapazitätsentscheidung	Handlungsalternative		Expansion	x	x	x	x
			Kontraktion	-	-	-	x
	Kapazitätsarten	vorwärtsgerichtete SC	Produktion	x	-	-	-
			Lagerung	x	-	-	-
		rückwärtsgerichtete SC	Sammlung	-	-	-	-
			Lagerung	-	-	-	-
			Aufbereitung/ Aufarbeitung	-	x	x	x
Interdependenzen zwischen originären Produkte und Güterrückfluss	Marktinterdependenzen	konkurrierend	x	-	-	-	
		komplementär	-	-	-	-	
	Ressourceninterdependenzen	konkurrierend	-	-	-	-	
		nicht konkurrierend	-	-	-	-	
	Leistungsinterdependenzen	sequentiell	-	-	-	-	
		parallel	-	-	-	-	
Maßnahmen zur Handhabung von Unsicherheiten		ursachenbezogen	x	x	-	x	
		wirkungsbezogen	-	-	-	-	
x wird diskutiert, - wird nicht diskutiert							

Tabelle 1.2: Übersicht stochastischer Ansätze der Kapazitätsdimensionierung in CLSCs

Benedito/Corominas entwickeln ein Markov-Modell zur Planung von statischer Produktions- und Lagerkapazität. Es wird angenommen, dass genügend Kapazität für die Aufbereitung der Rückflussgüter vorhanden ist. Zurückgeflossene Güter werden

in Abhängigkeit von der verfügbaren Lagerkapazität entweder aufgearbeitet und wiederverwendet (Remanufacturing) oder entsorgt. Die Nachfrage kann durch produzierte, aufbereitete oder extern beschaffte Güter bedient werden. Nachfrage- und Rückflussmengen und Konsumdauern sind Zufallsvariablen mit bekannten Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Die Rückflussmengen sind stochastisch unabhängig von den Absatzmengen und werden anhand der Charakteristika des Produktlebenszyklus und einer Rückflussrate modelliert. Ziel ist es, die Summe der im Planungshorizont erwarteten Kosten zu minimieren.¹⁾

Chittamvanich/Ryan gehen bei der Dimensionierung der Rückbewältigungskapazität zum Markteintrittszeitpunkt von einem speziellen Newsvendor-Problem aus. Die zukünftige Kapazitätsnachfrage wird gemäß des prognostizierten, zeitlich verteilten Rückflusses eines Gutes erwartet, wobei die Prognose eine Absatz- (time to sale of an individual unit) und eine Rückflusskomponente (time from sale to return of an individual unit) berücksichtigt. Unter der Annahme, dass zwischen der Kapazitätsaufbauentscheidung und deren Umsetzung eine Verzögerung besteht, wird der Kapazitätsplan für das vorliegende Remanufacturing-System hergeleitet, bei dem der maximale Barwert der relevanten Ein- und Auszahlungen zu erwarten ist.²⁾

Kaya/Bagci/Turkay formulieren ein zweistufiges Kompensationsmodell und einen Robust-Optimization-Ansatz zur Planung von strategischen und einmaligen Kapazitätsaufbauentscheidungen für Demontage und Refurbishing (Anzahl der Kapazitätseinrichtungen, z.B. Maschinen oder Personen) für den ganzen Planungszeitraum auf der ersten Stufe. Anpassungsmöglichkeiten sind nicht gegeben. Die zweite Stufe modelliert alle taktischen Entscheidungen bzgl. Aufbereitung, Beschaffung, Lagerhaltung und Entsorgung unter Berücksichtigung von Unsicherheit. Die Güternachfrage entspricht der Endproduktnachfrage nach aufbereiteten Gütern (second hand market) oder der Komponentennachfrage für die Produktion. Letztere wird entweder durch aufbereitete Komponenten der Güterrückflüsse (Refurbishing) oder extern be-

¹⁾ Vgl. Benedito/Corominas (2011), S. 504 ff.

²⁾ Vgl. Chittamvanich/Ryan (o.J.), S. 5 ff.

schaffte Komponenten bedient. Nachfrage- und Rückflussunsicherheiten sind anhand von Szenarien modelliert, wobei verschiedene Qualitäten der Rückflüsse berücksichtigt werden. Die strategischen und taktischen Entscheidungen werden so bestimmt, dass die erwarteten Kosten des Planungszeitraums minimiert werden. Das Ziel des Robust-Optimization-Ansatzes¹⁾ ist es, die maximale Abweichung der resultierenden Kosten von der optimalen Lösung über alle möglichen Szenarien zu minimieren.²⁾

Serrato/Ryan/Gaytán entwickeln ein prognoseintegrierendes Markov-Modell zur Planung der Rückflussbewältigungskapazität. In jeder Periode ist die Möglichkeit gegeben, entweder die interne Kapazität anzupassen (Expansion oder Kontraktion) oder die interne Kapazität dauerhaft abzubauen, was mit der Fremdvergabe der Rückflussbewältigung bis zum Ende des Planungshorizontes einhergeht. Ist in einer Periode zur vollständigen Verarbeitung der Rückflüsse nicht ausreichend Kapazität verfügbar, so geht dies mit Strafkosten einher. Die Güterrückflüsse werden dabei als eine binomialverteilte, absatzabhängige Zufallsvariable erfasst, die durch eine unsichere Rückflussrate definiert ist. Ziel ist es, die Summe der Zahlungen für Kapazitätsanpassungen, Fremdvergabe und Entsorgung zu minimieren.³⁾

In der Gesamtsicht ist zu konstatieren, dass nur wenige Ansätze zur taktischen Kapazitätsplanung in CLSCs vorhanden sind. Im Hinblick auf die möglichen Kapazitätsentscheidungen können folgende Ergebnisse identifiziert werden:

- Lediglich im Ansatz von *Serrato/Ryan/Gaytán* ist die Möglichkeit beider Handlungsalternativen zur Kapazitätsanpassung gegeben.⁴⁾
- In keinem Ansatz mit unvollständiger Informationsbasis wird die Kapazität zur Gütererstellung und Güterrückflussbewältigung simultan geplant.

¹⁾ Vgl. Kouvelis/Yu (1997), S. 8 ff.

²⁾ Vgl. Kaya/Bagci/Turkay (2014), S. 272 ff.

³⁾ Vgl. Serrato/Ryan/Gaytán (2007), S. 4289 ff.

⁴⁾ Vgl. Serrato/Ryan/Gaytán (2007), S. 4289 ff.

Bezüglich der oben beschriebenen möglichen Interdependenzen zwischen Rückflussgütern und originären Produkten können folgende Aussagen getroffen werden:

- In den Ansätzen werden teilweise komplementäre und konkurrierende absatzpolitische Beziehungen der originären und rückfließenden Produkte betrachtet (Marktinterdependenzen).
- Da in keinem Ansatz das Produktions- und Rückbewältigungsprogramm gemeinsam geplant wird, werden weder Ressourcen- noch Leistungsinterdependenzen zwischen den originären Produkten und ihren Güterrückflüssen berücksichtigt.

Bezüglich der Handhabung von Unsicherheiten (ursachen- bzw. wirkungsbezogene Maßnahmen) können in den Ansätzen unter unvollständiger Information folgende Aussagen getroffen werden:

- Bestehende Unsicherheiten werden als unsichere Parameter anhand von bestimmten Verteilungen oder anhand von Szenarien in den Planungsmodellen modelliert. Unsichere Parameter sind die Güterrückflussmengen bzw. -rate, die Produktnachfrage und die Konsumdauern. Die relevanten Informationen werden unabhängig voneinander modelliert.
- Eine ursachenbezogene Maßnahme zur Handhabung von Unsicherheit ist die Einbeziehung der Prognose im Planungsmodell. Im Ansatz von *Chittamvanich/Ryan* werden die Güterrückflüsse auf Grundlage von Vergangenheitsdaten anhand einer Gammafunktion prognostiziert¹⁾. Im Ansatz von *Serrato/Ryan/Gaytán* ergeben sich die Güterrückflüsse aus einer Binomialverteilung abhängig von den Absatzmengen. Vereinfacht wird teils sogar von bekannten Absatzmengen ausgegangen²⁾. Im Ansatz von *Benedito/Corominas* wird die Rückflussmenge anhand einer bekannten Verteilung bestimmt (unabhängig vom Absatz)³⁾.
- Nachteile des Markov-Modells ergeben sich daraus, dass Entscheidungen auf Grundlage von Zuständen bzw. Beobachtungen der letzten Periode getroffen werden. In den vorliegenden Planungsproblemen hat dies zur Folge, dass die zukünftigen Güterrückflussmengen unabhängig von den vergangenen Rückflussmengen sind. Weiterhin werden die Wahrscheinlichkeiten auf Grundlage des Status der letzten Periode berechnet.

¹⁾ Vgl. Chittamvanich/Ryan (o.J.), S. 5 ff.

²⁾ Vgl. Serrato/Ryan/Gaytán (2007), S. 4289 ff.

³⁾ Vgl. Benedito/Corominas (2011), S. 504 ff.

- Wirkungsbezogene Maßnahmen, welche die Realisationen der Unsicherheit handhaben, sind nicht gegeben.

Im Rahmen des CLSC-Network-Design-Problems bildet die Kapazitätsdimensionierung eine untergeordnete Problemstellung. Für die potentiellen Standorte werden Kapazitätsobergrenzen modelliert, so dass eine Anpassung der Kapazität an die als unabhängig und gegeben angenommenen Absatz- und Rückflussmengen durch die Anzahl der eröffneten Standorte erfolgt. Die Option der Kapazitätskontraktion wird in diesen Modellen teilweise durch Standortschließung berücksichtigt¹⁾. Auch diese Ansätze lassen sich nach der Vollständigkeit ihrer Informationsbasis unterteilen²⁾. Im Folgenden wird insbesondere auf Planungsansätze unter Unsicherheit eingegangen, in denen die Unsicherheit explizit modelliert wird³⁾. Alle deterministischen Ansätze modellieren die Standorterschließung als 0-1 Entscheidung, d.h. als binäres Problem. Bei den Standorten wird zwischen Servicecentern zur Lagerung der Rückflussmengen vom Endkunden oder Aufbereitungszentren unterschieden. Wenige Ansätze geben die Möglichkeit in hybride Standorte zu investieren, die sowohl vorwärtsgerichtete Güterströme als auch Rückflüsse bearbeiten⁴⁾. Aus diesem Grund steht die Berücksichtigung der Modellierung der Abhängigkeiten zwischen Nachfrage und Rückfluss und die Handhabung der Unsicherheiten im Mittelpunkt der Betrachtung. Es können folgende Klassen bzgl. der Modellierung der Unsicherheit unterschieden werden:

- Ansätze zum CLSC-Network-Design-Problem bei unvollständiger Information bauen in der Regel auf der stochastischen Programmierung auf. Dabei werden die Ausprägungen unsicherer Parameter, wie z.B. die Nachfrage- und Rückflussmengen, in Szenarien erfasst, die mit einer Gewichtung, welche die Eintrittsgeschwin-

¹⁾ Vgl. de Rosa et al. (2013), S. 186 ff.; Lee/Dong (2009), S. 61 ff.

²⁾ Vgl. Ilgin/Gupta (2010), S. 567 ff.; Melo/Nickel/Saldanha-da-Gama (2009), S. 404.

³⁾ Relevante Ansätze unter Sicherheit sind z.B. Amin/Zhang (2012), S. 794 ff.; Easwaran/Üster (2010), S. 781 ff.; Faccio et al. (2011), S. 169 ff.; Fleischmann (2000), S. 70 ff.; Lebreton (2007), S. 89 ff.; Lieckens/Colen/Lambrecht (2013), S. 1550 ff.; Lieckens/Vandaele (2007), S. 398 ff.; Lieckens/Vandaele (2012), S. 23 ff.; Salema/Barbosa-Póvoa/Novais (2009), S. 580 ff.; Salema/Barbosa-Póvoa/Novais (2010), S. 339 ff.; Xanthopoulos/Iakovou (2010), S. 171 ff.

⁴⁾ Vgl. Saeedi/Mohammadi/Torabi (2015), S. 211 ff.

digkeit des Szenarios widerspiegelt, in den Problemlösungsprozess einbezogen¹⁾. Zur Bildung der Szenarien werden verschiedene Ansätze gewählt. Zum Teil werden für die Nachfrage-, Rückfluss- und Prozessvolumen gegebene Wahrscheinlichkeitsverteilungen angenommen, die unabhängig voneinander sind. Für jeden unsicheren Parameter sind der Mittelwert und die Standardabweichung gegeben. Anhand der Monte Carlo Sampling Methode können Szenarien als Realisationen der Wahrscheinlichkeitsverteilungen generiert werden. Definierte Obergrenzen begrenzen die Rückflussmengen, so dass diese gegebenenfalls angepasst werden müssen. Werden die Rückflussszenarien in Abhängigkeit von der Nachfrage bestimmt, geht dies mit einer Rate einher, für die die Verteilung gegeben ist²⁾.

- Weitere Planungsansätze beziehen intervall-unsichere Parameter ein und streben Pläne an, die für alle möglichen Ausprägungen der unsicheren Parameter zulässig sind³⁾. Intervall-unsichere Parameter, wie Transportkosten, Produktpreise, Aufbereitungskosten, Prozesskosten, Nachfrage- und Rückflussraten, sind durch Ober- und Untergrenzen als deren Definitionsbereich charakterisiert.
- Anhand des Ansatzes der Robust-Optimization wird die Möglichkeit gegeben, die Auswirkungen unsicherer Rahmenbedingungen zu bewerten und in das Entscheidungskalkül aufzunehmen. Es werden anhand des Szenario-basierten Ansatzes nach *Mulvey et al.*⁴⁾ lösungsrobuste Ergebnisse ermittelt⁵⁾, in dem eine Regretfunktion in die Zielfunktion aufgenommen wird, die die Differenz zwischen der optimalen Lösung eines Szenarios und der robusten Lösung beschreibt. Zudem wird sichergestellt, dass die Lösung für alle Realisationen der Szenarien zulässig ist (Modellrobustheit). Kapazitätsengpässe werden durch Strafkosten bewertet und in die Zielfunktion aufgenommen. Transportmengen, Kapazitätsanpassungen und Kapazitätsbestand werden als Kontrollvariablen modelliert, die vom Szenario abhängig sind und somit Unsicherheiten bzgl. der Nachfrage und des Rückflusses ausgleichen können.

¹⁾ Vgl. z.B. Cardoso/Barbosa-Póvoa/Relvas (2013), S. 436 ff.; Chouinard/D'Amours/Ait-Kadi (2008), S. 660 ff.; El-Sayed/Afia/El-Kharbotly (2010), S. 423 ff.; Lee/Dong (2009), S. 61 ff.; Lee et al. (2007), S. 20 ff.; Listes (2007), S. 419 ff.; Listes/Dekker (2005), S. 270 ff.; Soleimani/Govindan (2014), S. 490 ff.; Zeballos et al. (2012), S. 237 ff.

²⁾ Vgl. El-Sayed/Afia/El-Kharbotly (2010), S. 423 ff.; Listes (2007), S. 419 ff.; Listes/Dekker (2005), S. 268 ff.

³⁾ Vgl. Hasani/Zegordi/Nikbakhsh (2012), S. 4654 ff.; Pishvae/Rabbani/Torabi (2011), S. 637 ff.

⁴⁾ Vgl. Mulvey/Vanderbrei/Zenios (1995), S. 264 ff.

⁵⁾ Vgl. de Rosa et al. (2013), S. 186 ff.

- Die letzte Klasse zur Modellierung von Unsicherheiten im Rahmen der Network-Design-Ansätze ist das Fuzzy Possibilistic Programming. Anders als bei der stochastischen und robusten Optimierung geht diese Methode von einer ungewissen Datenbasis aus. Das bedeutet, dass nicht hinreichend genügend Daten vorhanden sind, um die unsicheren Parameter als Szenarien zu modellieren. Stattdessen gehen diese Parameter als Fuzzy Sets¹⁾ in die Ansätze ein. *Vahdani/Razmi/Tavakkoli-Moghaddam* charakterisieren Parameter wie Kosten, Kapazitäten, Nachfrage- und Rückflussmengen als Triangel-Funktion²⁾.

In den vorliegenden Ansätzen des CLSC-Network-Design-Problems wird durch die wirkungsbezogene Maßnahme der Schaffung von Flexibilität versucht, die Auswirkungen der Unsicherheit zu decken. Durch die Möglichkeit in hybride Standorte, die mehrere Arten von Gütern handhaben können, zu investieren, kann das Entscheidungskalkül der Modelle (Gewinnmaximierung bzw. Kostenminimierung) positiv beeinflusst werden.³⁾

1.2.2 Prognose von Güterrückflüssen

Während sich im Hinblick auf die Nachfrage nach Endprodukten ein breites Spektrum zeitreihenbasierter Prognoseverfahren bewährt hat⁴⁾, wirft der Güterrückfluss ein relativ neuartiges *Prognoseproblem* auf, dessen Lösung aufgrund der relevanten nicht-zeitgebundenen Einflussgrößen die zusätzliche Anwendung von kausalanalytischen Prognoseverfahren erfordert⁵⁾. Im *Basisprognosemodell* einer CLSC wird der Rückfluss eines homogenen Gutes (z.B. wiederverwendbare Transportbehältnisse) durch den Eintritt von Absatzereignissen initiiert und durch den Ablauf von indeterministischen Nutzungsdauern realisiert. Das originäre Prognoseproblem besteht dann

¹⁾ Vgl. Zadeh (1978), S. 3 ff.

²⁾ Vgl. Hatefi et al. (2015), S. 1117 ff.; Ramezani et al. (2014), S. 108 ff.; Vahdani/Razmi/Tavakkoli-Moghaddam (2012), S. 632 ff.

³⁾ Vgl. de Rosa (2013), S. 184 ff.; Easwaran/Üster (2010), S. 779 ff.; Lee/Dong (2009), S. 61 ff.; Lee et al. (2007), S. 19 ff.; Ramezani et al. (2014), S. 108 ff.; Saeedi/Mohammadi/Torabi (2015), S. 211 ff.

⁴⁾ Zu Überblicksdarstellungen vgl. z.B. Box/Jenkins/Reinsel (2008), S. 19 ff.; Hansmann (1983), S. 12 ff.; Makridakis/Wheelwright/Hyndman (1998), S. 6 ff.; Nahmias (2000), S. 52 ff.

⁵⁾ Vgl. Jeong/Jung/Park (2002), S. 225 ff., im Kontext von Forward SCs.

darin, die Eintrittswahrscheinlichkeiten alternativ möglicher Dauern bis zum Rückfluss auf der Grundlage beobachteter Absatz- und Rückflussereignisse zu schätzen¹⁾. Die Dauer des Rückflusszyklus kann in der Realität unbeschränkt sein, ist aber für Planungsaufgaben zweckmäßig festzulegen²⁾.

Erweiterungen dieses Prognoseproblems sind in der Berücksichtigung

- unterschiedlich gut verfügbarer Informationen (z.B. langfristige Mittelwerte, periodenbezogene Mittelwerte, Individualprodukt-bezogene Werte der Rückflussdauer)³⁾,
- zusätzlicher Rückfluss-Einflussgrößen (z.B. Produkt-, Nachfrage- und Verkaufssituations-Charakteristika, Rücknahmemodalitäten sowie demographische, technologische und rechtliche Rahmenbedingungen)⁴⁾,
- unterschiedlicher Komponenten, die für die Produktion einer Güterart verwendet wurden⁵⁾,
- mehrerer Rückflussqualitäten (z.B. Rückgabegründe, Güterzustand)⁶⁾,
- von Informationszuwachsen⁷⁾ und

¹⁾ Vgl. Chittamvanich/Ryan (o.J.), S. 11 ff.; Clottey/Benton/Srivastava (2012), S. 599 ff.; Clottey/Srivastava (2008), S. 1694 ff.; Goh/Varaprasad (1986), S. 43 ff.; Kelle/Silver (1989), S. 19; Krapp/Nebel/Sahamie (2013a), S. 620 ff.; Krapp/Nebel/Sahamie (2013b), S. 981 ff.; Toktay/Wein/Zenios (2000), S. 1416 f.

²⁾ Vgl. Dyckhoff/Kasah (2014), S. 802.

³⁾ Vgl. de Brito/van der Laan (2009), S. 85 ff.; Kelle/Silver (1989), S. 19 und S. 22 ff.

⁴⁾ Vgl. Chouinard/D'Amours/Ait-Kadi (2008), S. 663 f.; de Brito/de Koster (2004), S. 146; Hanafi/Kara/Kaebemnik (2007), S. 245 ff.; Hess/Mayhew (1997), S. 23 ff.; Marx-Gómez et al. (2002), S. 120 ff.; Shi/Zhang/Sha (2011), S. 643 f.; Stuart et al. (1998), S. 227 ff.; Temur/Balcilar/Bolat (2014), S. 322 ff.; Tibben-Lembke/Rogers (2002), S. 275.

⁵⁾ Vgl. Krupp (1993), S. 48 ff.

⁶⁾ Vgl. Chouinard/D'Amours/Ait-Kadi (2008), S. 661; Hess/Mayhew (1997), S. 23 ff.; Kricke/van Harten/Schuur (1998), S. 118; Potdar/Rogers (2010), S. 292 ff.; Potdar/Rogers (2012), S. 105 ff.; Teunter (2006), S. 534.

⁷⁾ Vgl. Clottey/Benton/Srivastava (2012), S. 596 ff.; Clottey/Srivastava (2008), S. 1691 ff.; Krapp/Nebel/Sahamie (2013a), S. 620 ff.; Krapp/Nebel/Sahamie (2013b), S. 983 ff.; Toktay/Wein/Zenios (2000), S. 1414 ff.

- unterschiedlicher Rückflusssorte¹⁾

zu sehen.

Zur Lösung ökonomischer Gestaltungsprobleme sind die Informationen aus der originären Prognose i.d.R. in problemspezifische Informationen (z.B. Rückfluss wiederverwendbarer Transportbehältnisse in deren Wiederbeschaffungszeit²⁾, Rückfluss einsetzbarer End-of-Use-Güter im Produktlebenszyklus³⁾ bzw. bis zu einem gegebenen Zeitpunkt⁴⁾) zu transformieren, wodurch derivative Prognoseprobleme entstehen.

Die bislang im CLSC-Kontext vorgeschlagenen *Prognoseverfahren* beziehen sich insbesondere auf das originäre Prognoseproblem, wobei eine Abhängigkeit der Güterrückflussmengen von den Absatzzahlen angenommen wird⁵⁾. Dabei werden mit Hilfe von statistischen Verfahren, von Verfahren des Soft-Computing oder durch Simulation Zeitreihenanalysen und/oder Kausalanalysen durchgeführt. Eine zentrale Klasse der *statistischen Verfahren* bilden die rein *zeitreihenanalytischen Ansätze*⁶⁾ auf der Grundlage des Distributed-lag-Modells⁷⁾. Dabei liegt die Annahme zugrunde, dass sich die Rückflüsse XR_t eines Gutes in einer Periode t aus Anteilen pr der in

¹⁾ Vgl. Hanafi/Kara/Kaebernick (2007), S. 245 ff.; Zhou (2016), S. 315 ff.

²⁾ Vgl. Clottey/Srivastava (2008), S. 1694 ff.; de Brito/van der Laan (2009), S. 87 ff.; Kelle/Silver (1989), S. 19 ff.

³⁾ Vgl. Georgiadis/Athanasίου (2010), S. 422 ff.; Georgiadis/Athanasίου (2013), S. 44 ff.

⁴⁾ Vgl. Chittamvanich/Ryan (o.J.), S. 7 ff.

⁵⁾ Prognoseverfahren, die die Rückflüsse unabhängig von den Absätzen prognostizieren, verwenden die schon für die Nachfrageprognose bewährten Verfahren, vgl. Canada/Yuan/Wang (2015), S. 871 ff.; Fleischmann/Kuik (2003), S. 28; Ilgin/Gupta (2012), S. 123 f.

⁶⁾ Vgl. Carrasco-Gallego/Ponce-Cueto (2009); Chittamvanich/Ryan (o.J.); Clottey/Srivastava (2008); Goh/Varaprasad (1986); Kelle/Silver (1989); Toktay/Wein/Zenios (2000).

⁷⁾ Distributed-lag-Modelle werden auch als Transferfunktionen- bzw. ARIMAX-Modelle mit einem Weißes-Rauschen-Prozess bezeichnet. Vgl. Assenmacher (2002), S. 245 ff.; Auer (2007), S. 511 ff.; Box/Jenkins/Reinsel (2008), S. 458; Dhrymes (1985), S. 1 ff.; Makridakis/Wheelwright/Hyndman (1998), S. 403 ff.; Montgomery/Weatherby (1980), S. 290 ff.

vorherigen Perioden $(t-l)$ abgesetzten Produkte XE (exogene Einflussgröße) ergeben. Die Rückflüsse werden mit folgender Funktion berechnet¹⁾:

$$XR_t = \sum_{l=0}^L pr_l \cdot XE_{t-l} \quad \text{mit} \quad \sum_{l=0}^L pr_l \leq 1 \quad (1.1)$$

Symbole:

t Periodenindex

l Lag-Index (Zeitverzögerung) ($l=0, \dots, L$)

pr periodenbezogene Rückflusswahrscheinlichkeit

XE periodenbezogene Absatzmenge

XR periodenbezogene Rückflussmenge

Somit ergibt sich die Wahrscheinlichkeit, dass abgesetzte Gütermengen nicht wieder zurückfließen, als:

$$P' = 1 - \sum_{l=0}^L pr_l \quad (1.2)$$

Bei der Bestimmung der Parameter pr ist die Multikollinearität zu berücksichtigen. Aus diesem Grund gelangen Techniken zum Einsatz, die auf der Box und Jenkins Modellierung basieren. Durch Anwendung einer linearen Transferfunktion wird folgendes Kernmodell formuliert²⁾:

$$XR_t = \frac{(\hat{v}_0 - \hat{v}_1 B - \hat{v}_2 B^2 - \dots - \hat{v}_r B^r)}{(1 - v_1 B - v_2 B^2 - \dots - v_r B^r)} XE_{t-b} + u_t \quad (1.3)$$

$$\Leftrightarrow XR_t = v^{-1}(B) \hat{v}(B) XE_{t-b} + u_t$$

mit $B^t XR_t = XR_{t-t'}$ und $B^t XE_t = XE_{t-t'}$

¹⁾ Eine alternative generische Formulierung des Kernmodells ist bei Krapp/Nebel/Sahamie (2013a) und Krapp/Nebel/Sahamie (2013b) zu finden. Die relevanten Variablen werden als Zufallsvariablen modelliert.

²⁾ Vgl. Goh/Varaprasad (1986), S. 44 f.

Symbole:

b Lag

B Verschiebungsoperator

$\nu, \hat{\nu}$ Koeffizienten

r, \hat{r} Polynomordnung

u Störterm (z.B. weißes Rauschen)

Die Formel (1.3) lässt sich wie folgt umschreiben:

$$\begin{aligned} XR_t &= (\beta_0 + \beta_1 B + \beta_2 B^2 + \dots) \cdot XE_t + u_t \\ \Leftrightarrow XR_t &= \beta(B) XE_t + u_t \end{aligned} \quad (1.3')$$

Die Regressionsparameter β werden als Schätzungen der Parameter pr verwendet. Durch das Verfahren von Box und Jenkins aus dem Jahre 1976, das auf der ARIMA-Modellierung basiert, werden die Parameter ν und $\hat{\nu}$ und die Lag-Ordnung L bestimmt. Die Ordnung L gibt an, wie viele vergangene Perioden für die Bestimmung der Daten benutzt werden.¹⁾

Spezialfälle dieses Ansatzes, die einen direkten Zusammenhang zwischen der Nachfrage und den Rückflüssen modellieren, sind zum Beispiel konstante Rückflusszeiten²⁾ (d.h. eine fixierte Lag-Ordnung) und gegebene Verlust-, Wiederverwendungs- und Rückflussquoten³⁾.

Modifikationen des Modells sind durch die Berücksichtigung von problemspezifischen Gegebenheiten in der Literatur zu finden:

- *Berücksichtigung unterschiedlich gut verfügbarer Informationen: De Brito/van der Laan und Kelle/Silver* beschäftigen sich mit der Charakterisierung einer un-

¹⁾ Vgl. Box/Jenkins/Reinsel (2008), S. 481 ff.; Makridakis/Wheelwright/Hyndman (1998), S. 409 ff.; Pankratz (1991), S. 196 ff.

²⁾ Vgl. Dobos/Richter (2004), S. 311 ff.; Kiesmüller/van der Laan (2001), S. 74 ff.

³⁾ Vgl. Dobos/Richter (2004), S. 311 ff.; Kiesmüller/van der Laan (2001), S. 74 ff.; Mostard/de Koster/Teunter (2005), S. 333 ff.

vollständigen Informationsbasis (Unsicherheit der Informationsbeschaffung) zum Prognosezeitpunkt. Im Gegensatz zu einer vollständigen Informationsbasis, die durch die Kenntnis der vergangenen Nachfrage- und Rückflussmengen der relevanten vergangenen Perioden charakterisiert ist, können Nachfrage- und Rückflussdaten in aggregierter Form (zeitlich, mengenmäßig) vorliegen, z.B. perioden- bzw. zeitraumbezogene Informationen über exakte bzw. erwartungswertbezogene Nachfrage- bzw. Rückflussmengen. Dies kann u. U. zu einer Ungenauigkeit in der Planung führen. In diesem Fall steigt die Relevanz einer regelmäßigen Aktualisierung der Daten im Zeitablauf, welche die Datenqualität erhöhen kann.¹⁾

- *Berücksichtigung funktionaler Abhängigkeiten der Rückflussmengen:* Die Regressionsparameter β des Modells werden durch folgende Produktdarstellung erweitert:

$$\beta_t = \widehat{pr} \cdot \widehat{\beta}_t \quad (1.4)$$

Diese Produktdarstellung ermöglicht die Einbeziehung der Wahrscheinlichkeit \widehat{pr} (das Produkt kommt überhaupt zurück) und wird mit der bedingten Wahrscheinlichkeit $\widehat{\beta}_t$ (ein Produkt fließt nach der t' -ten Periode zurück, unter der Bedingung, dass das Produkt überhaupt zurückkommt) multipliziert²⁾. Es wird davon ausgegangen, dass die Parameter $\widehat{\beta}_t$ abhängig voneinander sind. Aufgrund dieser Multikollinearität werden die Abhängigkeiten durch eine funktionale Beziehung abgebildet. Die Verteilungen können diskret oder kontinuierlich sein, abhängig davon, ob die Verzögerungen in gleichem Abstand erfolgen oder nicht. Diskrete Verteilungen eignen sich für Rahmenbedingungen mit diskreten Zeitperioden, zu denen Daten über Verkaufs- und Rückflussmengen in gleichen zeitlichen Abständen verfügbar sind. Als Lag-Funktionen finden die geometrische³⁾ und negative binomial⁴⁾ (Pascal-) Verteilung Anwendung⁵⁾. Durch die Anwendung von kontinuierlichen Verteilungen, wie zum Beispiel der Exponentialverteilung, können zwischen den Perioden zurückfließende Güter berücksichtigt werden. Diese Verteilung ist der kontinuierliche analoge Ersatz zu der geometrischen Verteilung.⁶⁾

¹⁾ Vgl. de Brito/van der Laan (2009), S. 87 ff.; Kelle/Silver (1989), S. 19 und S. 22 ff.

²⁾ Vgl. Toktay/Wein/Zenios (2000), S. 1416.

³⁾ Vgl. Koyck (1954), S. 20 ff.

⁴⁾ Vgl. Solow (1960), S. 395 ff.

⁵⁾ Vgl. Clottey/Benton/Srivastava (2012), S. 596 ff.; Clottey/Srivastava (2008), S. 1691 ff.; Toktay/Wein/Zenios (2000), S. 1416 f.

⁶⁾ Vgl. Clottey/Benton/Srivastava (2012), S. 596 ff.; Clottey/Srivastava (2008), S. 1694.

- *Berücksichtigung von Informationszuwächsen:* Die Bayes-Methode wird angewendet, um die Parameter des Distributed-lag-Modells auf Grundlage gegebener Daten zu schätzen, damit die im Planungszeitraum neuen verfügbaren Daten bzgl. der Verkaufs- und Rückflussmengen berücksichtigt werden können. Dadurch ergibt sich ein Lerneffekt. Grundlage bildet eine Prior-Verteilung, die bei der Neueinführung eines Produktes (keine verfügbaren Informationen über mögliche zukünftige Rückflussmengen) durch Expertenwissen geschätzt wird.¹⁾
- *Einbeziehung unterschiedlicher Einflussfaktoren:* Durch die Berücksichtigung zusätzlicher endogener Einflussgrößen (z.B. demographische, technologische und rechtliche Rahmenbedingungen) lässt sich dieser rein zeitreihenanalytische Ansatz (1.1) in einen kausalanalytischen Ansatz überführen. Für den einfachen Fall eines linearen Kausalmodells gilt dann²⁾:

$$XR_t = \zeta + \sum_{l=0}^L \sum_{m=1}^M (\lambda_{l,m} \cdot YN_{t-l,m}) + u_t \quad (1.5)$$

Zusätzliche Symbole:

- ζ zu schätzender Absolutterm
- λ zu schätzender Gewichtungsfaktor (z.B. periodenbezogene Rückflusswahrscheinlichkeit)
- m Einflussgrößenindex ($m = 1, \dots, M$)
- YN Beobachtungswert der Einflussgröße (z.B. periodenbezogene Absatzmenge)

Zur Parameterschätzung können dabei grundsätzlich dieselben Verfahren wie beim einfachen Distributed-lag-Modell zur Anwendung gelangen. Bei einer großen Anzahl zu schätzender Parameter bietet es sich jedoch an, auf Metaheuristiken zurückzugreifen, die durch gezielte Variation der Werte von Parameterkombinationen den Fehlerterm minimieren³⁾.

- *Ermöglichung einer mehrschrittigen Prognose:* Durch die Einbeziehung von langfristigen Prognosemodellen, z.B. anhand von Wachstumsfunktionen, um mögliche zukünftige Verkäufe abzubilden, sind Rückflussprognosen für einen längeren Prognosezeitraum möglich. *Krapp/Nebel/Sahamie* kombinieren zwei Methoden

¹⁾ Vgl. Clottey/Benton/Srivastava (2012), S. 596 ff.; Krapp/Nebel/Sahamie (2013a), S. 623 ff.; Toktay/Wein/Zenios (2000), S. 1416 ff.

²⁾ Vgl. Jeong/Jung/Park (2002), S. 225, im Kontext von Forward SCs.

³⁾ Vgl. Jeong/Jung/Park (2002), S. 225 ff., die einen Genetischen Algorithmus anwenden.

miteinander, um die Korrelationen zwischen den Absatz- und Rückflussmengen in unterschiedlichen Zeitpunkten besser zu schätzen: Die zukünftigen Absatzmengen werden mittels des Kalman Filters auf Grundlage des Lebenszyklus geschätzt und neue Beobachtungen mit Hilfe des Bayes-Ansatzes bei der Prognose der Güterrückflussmengen berücksichtigt¹⁾. Clottey wendet den Distributed-lag-Ansatz für eine mehrschrittige Prognose durch die Integration von prognostizierten Absatzmengen XE^{PR} an, so dass für die Rückflussmenge in $t + t'$ ($t' = 1, 2, \dots$) gilt²⁾:

$$XR_{t+t'} = \widehat{pr} \cdot \widehat{\beta}_1 XE_{t+t'-1}^{Pr} + \widehat{pr} \cdot \widehat{\beta}_2 XE_{t+t'-2}^{Pr} + \dots + \widehat{pr} \cdot \widehat{\beta}_t XE_t + \dots + \widehat{pr} \cdot \widehat{\beta}_{t+t'-1} XE_1 + u_t \quad (1.6)$$

- *Berücksichtigung unterschiedlicher Rückflusssorte*: Zhou et al. entwickeln einen Ansatz zur Prognose der Güterrückflussmenge auf Grundlage der GERT-Netzplantechnik. Der Netzplan beschreibt aufbauend auf der Stückliste des Produkts alle Prozesse der (Closed-Loop) Supply Chain (Produktion, Absatz, Sortierung, Aufbereitung und Abfallbeseitigung) unter Berücksichtigung von Eintrittswahrscheinlichkeiten und unsicheren Prozessdauern der einzelnen Prozesse. Die Dauern der Aktivitäten werden mithilfe von Verteilungen modelliert. Die Güterrückflussmenge in einem Knoten des Netzwerkes ergibt sich aus den bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten (bzw. Rückflusswahrscheinlichkeiten) und den Absatzmengen. Zur Lösung des stochastischen Problems werden Transferfunktionen angewendet.³⁾

Zur Prognose von Güterrückflüssen können alternativ auch Ansätze der *Survival-Analyse* zur Anwendung gelangen⁴⁾, die auf Hazard-Funktionen aufbauen⁵⁾. Die Hazard-Funktion $HF(b')$ gibt im vorliegenden Kontext die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass ein Rückflussereignis zum aktuellen Zeitpunkt eintritt, wenn sich aus einem Absatzereignis vor b' Zeiteinheiten bislang noch kein Rückflussereignis ergeben hat. Sie ist der Quotient aus Dichtefunktion und Überlebensfunktion:

$$HF(b') = \frac{f(b')}{S(b')} \quad \text{mit } S(b') = 1 - F(b') \quad (1.7)$$

¹⁾ Vgl. Krapp/Nebel/Sahamie (2013b), S. 981 ff.

²⁾ Vgl. Clottey (2016), S. 2780 ff.

³⁾ Vgl. Zhou et al. (2016), S. 315 ff.

⁴⁾ Vgl. Hess/Mayhew (1997), S. 23; Kumar/Chinnam/Murat (2017), S. 354 ff.

⁵⁾ Vgl. Blossfeld/Rohwer (2002), S. 32 ff.; Cox/Oakes (1984), S. 14 ff.; Helsen/Schmittlein (1993), S. 398 ff.; Kalbfleisch/Prentice (1980), S. 6 ff.; Yamaguchi (1991), S. 9 ff.

Symbole:

$HF(\cdot)$ Hazard-Funktion

$f(\cdot)$ Dichtefunktion der Rückflusswahrscheinlichkeit

$F(\cdot)$ Verteilungsfunktion der Rückflusswahrscheinlichkeit

$S(\cdot)$ Überlebensfunktion der Rückflusswahrscheinlichkeit

Die Rückflussmenge zu einem Zeitpunkt t ergibt sich damit zu:

$$XR(b') = \int_{t-b'}^t XE(t-b') \cdot HF(b') db \quad (1.8)$$

Symbole:

t Zeitpunkt

b' Verweildauer

$XE(\cdot)$ zeitpunktbezogene Absatzmenge

$XR(\cdot)$ zeitpunktbezogene Rückflussmenge

Hess/Mayhew stellen einen Ansatz zur Prognose von Güterrückflüssen vor, in dem ein geeigneter Verlauf der Hazard-Funktion durch Exponentialmodelle mit Polynomterm beschrieben wird¹⁾. Deren Schätzung erfolgt durch regressionsanalytische Verfahren. Bei der Berücksichtigung zusätzlicher Einflussgrößen ist in diesem Fall zwischen Verweildauer-beeinflussenden (z.B. Kunden- und Verkaufscharakteristika) und Rückflusswahrscheinlichkeits-beeinflussenden Größen (z.B. Bedeutung der Passung, Verwendung des Gutes als Geschenk) zu unterscheiden. Im zuerst genannten Fall können die beeinflussenden Größen durch Multiplikation der Hazard-Funktion mit einem Anpassungsfaktor in Form einer Exponentialfunktion einbezogen werden. Im einfachsten Fall werden dabei die Kovariablen im Exponenten mit einer linearen Funktion erfasst. Rückflusswahrscheinlichkeits-beeinflussenden Größen können

¹⁾ Vgl. Hess/Mayhew (1997), S. 24 und S. 34, die ein Polynom zweiten Grades zugrunde legen.

durch Überführung der Hazard-Funktion in eine Split-Hazard-Funktion erfasst werden, bei der sie im einfachsten Fall additiv in einer Logit-Funktion berücksichtigt sind.¹⁾

Kumar/Chinnam/Murat wenden das semi-parametrische Proportional-Hazard-Modell von *Cox*²⁾ und das parametrische Weibull-Hazard-Modell zur Prognose von Güterrückflussmengen an, um die Effekte der unterschiedlichen Kovariablen (Produkttyp und Konsument) mit einer zeitabhängigen Hazard-Rate zu untersuchen. Insbesondere das Proportional-Hazard-Modell von *Cox* bietet im Vergleich zu den anderen erwähnten Ansätzen den Vorteil keine funktionale Form der Verweildauer anzunehmen.³⁾

Zur kausalanalytischen Prognose mit Hilfe des *Soft-Computing* wird auf Neuro-Fuzzy-Verfahren zurückgegriffen⁴⁾. Bedingt durch die zugrundeliegende heuristische Vorgehensweise ist es möglich, eine Vielzahl von Einflussgrößen (z.B. Absatzmengen, Phase des Lebenszyklus, Rückgabeanreize, Nutzungsart, technische Lebensdauer, demographische Daten der Konsumenten) auf den Güterrückfluss in die Prognose einzubeziehen, und zwar auch dann, wenn eine relativ schwache Datenbasis vorliegt, die statistischen Verfahren wenig zugänglich ist. Bei einer Neuro-Fuzzy-Prognose wird im Fuzzy-Teil von den Werten der Einflussgrößen unscharf auf die Werte des Rückflusses geschlossen, wohingegen im Neuro-Teil zur Verringerung des Prognosefehlers die Parameter des Schlussfolgerungsverfahrens angepasst werden. Im Fuzzy-Teil werden für relevante Einflussgrößen auf der Grundlage historischer Daten und Expertenschätzungen Fuzzy-Regeln in Form von Wenn-dann-Aussagen generiert. Die Abbildung der beobachteten Bandbreite von Werten der Einflussgrößen (Wenn-Teil) erfolgt durch Fuzzy-Zahlen mit einer festzulegenden Zugehörigkeitsfunktion. Die Fuzzy-Schlussfolgerungskomponente wendet dann in Abhängigkeit

¹⁾ Vgl. Hess/Mayhew (1997), S. 23 f. und S. 34 f.

²⁾ Vgl. Cox (1972), 187 ff.

³⁾ Vgl. Kumar/Chinnam/Murat (2017), S. 354 ff.

⁴⁾ Vgl. Hanafi/Kara/Kaebernik (2007), S. 246 ff.; Marx-Gómez et al. (2002), S. 122 ff.; Temur/Balcilar/Bolat (2014), S. 318 ff.

von der gewählten Inferenz-Strategie die Fuzzy-Regeln auf die Werte der Einflussgrößen an. Als Output ergeben sich Fuzzy-Zahlen, die den erwarteten Güterrückfluss beschreiben. Um eine einwertige Güterflussprognose zu erhalten, werden die Output-Fuzzy-Zahlen mit einer geeigneten Methode defuzzifiziert. Im Neuro-Teil erfolgt ein Lernprozess, in dem iterativ in Abhängigkeit vom Prognosefehler Anpassungen von Parametern des Fuzzy-Teils (Regeln, Fuzzy-Zahlen) und der Schlussfolgerungskomponente so lange vorgenommen werden, bis eine akzeptable Prognosegenauigkeit erreicht ist.

Insbesondere zur Erstellung von Langfristprognosen gelangen *Simulationsmodelle* zur Anwendung, mit denen auf der Grundlage von historischen Daten und Expertenbefragungen zu Entwicklungstendenzen und deren Wechselwirkungen höchstwahrscheinliche Szenarien und Extremszenarien bestimmt werden¹⁾. Da es dabei das Ziel ist, die Effekte ausgewählter Datenkonstellationen zu ermitteln, ist es möglich, ein breites Spektrum von Einflüssen zu berücksichtigen (z.B. Lebenszyklus, Verweildauer, Qualität der Rückflussgüter, Diffusion konkurrierender Produkte, Ausfallraten, Reklamationsraten, Reparaturraten, Umweltschutzpolitik, Nutzen eines grünen Image, Marktsegmentierung, demographische Daten der relevanten Absatzregionen oder Rückgabanreize). In der Regel wird aufbauend auf den ermittelten Daten und Zusammenhängen ein System-dynamics-Modell formuliert und problemspezifisch durch systematische Experimente analysiert sowie interpretiert.

1.3 Forschungsbedarf

In der Gesamtsicht der Ansätze mit inhaltlichen Bezügen zur Kapazitätsdimensionierung zeigt sich, dass die Problemstellung in den letzten Jahren immer mehr an Relevanz hinzugewonnen hat. Seit der Jahrtausendwende werden zunehmend Planungsansätze entwickelt, welche die Problemstellung direkt adressieren oder die eine untergeordnete Fragestellung im Rahmen des Network-Design-Problems bilden. Die

¹⁾ Vgl. z.B. Georgiadis/Athanasidou (2010), S. 420 ff.; Linton/Yeomans/Yoogalingam (2002), S. 1185 ff.; Marx-Gómez et al. (2002), S. 119 ff.; Srivastava/Srivastava (2006), S. 524 ff.

Analyse der Ansätze erfolgte hinsichtlich der drei Kriterien: Kapazitätsentscheidungen, Berücksichtigung von Besonderheiten zwischen originären Produkten und ihren Güterrückflüssen und Maßnahmen zur Handhabung von Unsicherheiten. Die Analyse der deterministischen und stochastischen Ansätze zeigte hinsichtlich des ersten Kriteriums folgende Ergebnisse:

- Die Möglichkeit des Kapazitätsabbaus ist nicht in allen Ansätzen zur Kapazitätsdimensionierung gegeben. Die Kapazitätsentscheidungen werden hauptsächlich als strategisches Kalkül berücksichtigt, z.B. im Rahmen des Network-Design-Problems (Standorterrichtung), so dass oftmals nur die Möglichkeit der Kapazitätsexpansion gegeben ist.
- Die simultane Planung von Gütererstellungs- und Rückflussbewältigungskapazität wird nur in wenigen Ansätzen bei vollständiger Information betrachtet. Stochastische Ansätze sind bislang nicht bekannt.

Folgende Schlussfolgerungen haben sich hinsichtlich der zu berücksichtigten Interdependenzen ergeben:

- Die Ansätze haben gezeigt, dass Marktinterdependenzen unter unterschiedlichen Annahmen Berücksichtigung finden. Jedoch werden die Wechselwirkungen zwischen den Nachfragen unterschiedlicher Produkte nur teilweise im Zeitablauf berücksichtigt.
- Die Berücksichtigung von Ressourceninterdependenzen wird von keinem Ansatz berücksichtigt. Die Produkterstellungs- und die Rückflussbewältigungskapazität werden zumeist unabhängig voneinander geplant, so dass die aufgrund der Vernetzung der Güterflüsse bestehenden Wechselwirkungen unberücksichtigt bleiben. Obwohl in wenigen Ansätzen aufbereitete Güterrückflüsse als gleichwertiges Produkt (Remanufacturing-Option) in die SC eingehen, findet keine Konkurrenz hinsichtlich der Ressourcen statt. Des Weiteren wird die qualitative Kapazität einer Ressource bislang nicht ausreichend betrachtet. So werden keine Potentialfaktoren betrachtet, die mehrere Leistungen erbringen können (flexible Ressourcen).
- Leistungsinterdependenzen werden nur in wenigen Ansätzen bei vollständiger Information betrachtet. Insbesondere besteht Forschungsbedarf bei der Betrachtung der Leistungsinterdependenzen in einem stochastischen Entscheidungsfeld, um die Auswirkungen von Unsicherheiten auf die Leistungserstellung zu analysieren.

Im Hinblick auf den Forschungsbedarf bzgl. der Handhabung von Unsicherheiten (ursachen- und wirkungsbezogene Maßnahmen) im Planungsprozess können folgende Aussagen getätigt werden:

- Die Ansätze bei vollständiger Information überwiegen gegenüber Ansätzen bei unvollständiger Information. Unsicherheiten bzgl. Nachfrage- und Rückflussmengen (bzw. -raten), Aufbereitungsraten der Güterrückflüsse und Konsumdauern stehen hauptsächlich im Fokus der Betrachtung. In den Ansätzen des Network-Design-Problems werden zusätzliche problemspezifische Unsicherheiten wie unsichere Transportkosten thematisiert.
- In Ansätzen mit direkter Adressierung von Kapazitätsentscheidungen und bei unvollständiger Information werden die Güterrückflüsse überwiegend als unabhängige Zufallsvariablen mit bekannter Wahrscheinlichkeitsverteilung oder als bekannte Szenarien modelliert. Damit fließen die zwischen Absatz- und Rückflussmenge bestehenden Wechselwirkungen nicht in das Planungskalkül ein. In deterministischen Ansätzen werden die Unsicherheiten durch Ersatzwerte eliminiert.
- Ursachenbezogene Maßnahmen werden durch Prognoseverfahren nur partiell berücksichtigt und kommen hauptsächlich in einwertigen Ansätzen zum Einsatz. Einflussfaktoren auf die Güterrückflussmengen werden bei der Prognose nur partiell berücksichtigt. Als Haupteinflussfaktor des Güterrückflusses wird der Absatz als erklärende Variable bei der Prognose angewandt. Besonderheiten sind die Prognose der Produktnachfrage anhand des Produktlebenszyklus. Nur einfache Prognoseverfahren, die die Rückflussmenge anhand von absatzabhängigen Raten oder anhand des exponentiellen Glättens erster Ordnung abbilden, werden eingesetzt. Ausnahmen bei der Prognose sind die Berücksichtigung von Konsumdauern, die zu einer zeitlichen Verzögerung des Güterrückflusses führen. Andere Einflussfaktoren des Güterrückflusses werden nicht berücksichtigt.
- Die Einbeziehung von wirkungsbezogenen Maßnahmen ist nur in wenigen Ansätzen gegeben. Neben der Methode des Aufbaus von Pufferbeständen zur Handhabung der Unsicherheiten¹⁾ ist in den Ansätzen des Network-Design-Problems die Möglichkeit gegeben, in hybride Standorte zu investieren (Aufbau von Flexibilität). Auf strategischer Ebene wird Flexibilität auch diskutiert, in dem die Auswirkungen von Unsicherheit im Rahmen von Sensitivitätsanalysen bei unterschiedlichen Kapazitätsaufbaustrategien analysiert werden.

¹⁾ Vgl. Mahapatra/Pal/Narasimhan (2012), S. 3786 ff.

- Die bei taktischen Entscheidungen anzunehmende Risikoaversion findet überwiegend in Modellen zum CLSC-Network-Design-Problem durch Robustheitsüberlegungen Berücksichtigung.

In der Gesamtsicht ist zu erkennen, dass die simultane Planung der Produktions- und Rückbewältigungskapazität bei unvollständiger Information noch nicht betrachtet wurde. Forschungslücken ergeben sich dadurch in der Berücksichtigung von Leistungs- und Ressourceninterdependenzen zwischen originären Produkten und ihren Güterrückflüssen. In den bisherigen Ansätzen wurden die (Aus-)Wirkungen der im Planungszeitraum auftretenden Unsicherheiten bzgl. der Produktnachfrage und des Güterrückflusses noch nicht ausreichend modelliert und analysiert. Die Beziehungen wurden bisher nur in wenigen Aufsätzen durch eine direkte Relation zwischen Güterrückflussmengen und den vergangenen Absatzmengen (Rate) berücksichtigt. Abhängig von der vorliegenden Planungssituation hinsichtlich Nachfrageerfüllung und Rücknahme von Güterrückflüssen werden unterschiedliche Anforderungen an den Planungsprozess gestellt. Aufgrund dieser Forschungslücke besteht der Forschungsbedarf hinsichtlich der Integration von ursachenbezogenen Maßnahmen zur Handhabung der Unsicherheit. Insbesondere ist die Relevanz gegeben, Informationen über den Güterrückfluss in quantitativer, qualitativer und zeitlicher Hinsicht in Abhängigkeit von Wechselwirkungen zwischen Nachfrage-/Absatz- und Rückfluss-/Rücknahmemengen sowie der Möglichkeit der Beeinflussung dieser Mengen durch den Anbieter in den Planungsprozess miteinzubeziehen. Die Integration von Prognoseverfahren in die Entscheidungsmodelle ist relevant, um diese Forschungslücke zu schließen. Bislang ist dieses Problem insbesondere in Ansätzen der Kapazitätsdimensionierung wenig analysiert. Insbesondere werden die Auswirkungen unterschiedlicher Rückflussqualitäten auf den Planungsprozess nicht berücksichtigt¹⁾. Des Weiteren ist der Forschungsbedarf hinsichtlich der Integration von wirkungsbezogenen Maßnahmen in Ansätzen zur Kapazitätsdimensionierung bei unvollständiger Information identifiziert worden. Insbesondere die Generierung von Robustheit ist nur

¹⁾ Vgl. Akçali/Çetinkaya (2011), S. 2401, die eine generelle Forschungslücke bei der Berücksichtigung von unterschiedlichen Rückflussqualitäten bei Entscheidungsmodellen im Rahmen von CLSCs schlussfolgern.

vereinzelt diskutiert¹⁾. Der Ansatz der Schaffung von Flexibilität zur Handhabung von Unsicherheiten soll für das vorliegende Problem der Kapazitätsdimensionierung konkretisiert werden.

Die Analyse der in der Literatur diskutierten Ansätze hat gezeigt, dass der Güterrückfluss ein bislang relativ selten analysiertes Prognoseproblem aufwirft²⁾. Eine Vielzahl verschiedener Prognosetypen (z.B. zeitreihenanalytische Verfahren, Survival-Analyse-Verfahren, Neuro-Fuzzy-Modelle und Simulationsmodelle) wurden auf ihre Eignung analysiert und problemspezifisch erweitert. Überwiegend kommen zeitreihenanalytische Verfahren zum Einsatz, die um die problemspezifischen Besonderheiten erweitert werden. Forschungsbedarf ist in der Berücksichtigung folgender Faktoren zu erkennen:

- Die Prognose verschiedener Rückflussqualitäten ist bislang nur partiell erforscht: Aufgrund unterschiedlicher Nutzungsgrade und -dauern der originären Produkte ist die Prognose der Produktqualität besonders relevant, um die Güterrückflüsse effizient in den Produktions- und Rückbewältigungsprozess einzubauen. Bislang werden hauptsächlich Ausfallraten sowie Güterrückflüsse mit schlechter Qualität prognostiziert.
- Im Hinblick auf die zeitreihenanalytischen Verfahren ist die Einbeziehung von Unsicherheiten der erklärenden Variablen und deren Wechselwirkungen als Einflussfaktoren des Güterrückflusses noch nicht in den Prognoseverfahren berücksichtigt.

Für die vorliegende Dissertation ergeben sich somit folgende Forschungsfragen:

- Wie lassen sich zeitliche und sachliche (Markt-, Leistungs- und Ressourcen-) Interdependenzen zwischen originären Produkten und ihren Güterrückflüssen in einem dynamischen Entscheidungsprozess kombinieren?

¹⁾ Vgl. Chan et al. (2017), S. 1219, die eine Forschungslücke bzgl. der Robustheitsbetrachtung zur Handhabung von Unsicherheiten für nachhaltige Produktionssysteme aufzeigen.

²⁾ Vgl. Cao/Folan (2012), S. 646 ff. und S. 655 ff.; Govindan/Soleimani/Kannan (2015), S. 617 f.

- Welche ökonomischen Implikationen ergeben sich für die Kapazitätsdimensionierung, wenn unterschiedliche Planungssituationen, hinsichtlich Nachfrageerfüllung und Rücknahme von Güterrückflüssen, berücksichtigt werden?
- Welche Auswirkungen hat die Risikoaversion des Entscheidungsträgers unter der Annahme unvollständiger Information auf das Entscheidungskalkül?
- Wie können die zusätzlichen Unsicherheiten in CLSCs, die sich durch die Wechselbeziehungen zwischen Produktnachfrage-/Absatzmenge und Güterrückfluss-/Rücknahmemenge ergeben, im Entscheidungsmodell erfasst werden?
- Welche Auswirkungen haben Prognosefehler und der Einsatz von flexiblen Ressourcen auf den Rechenaufwand, auf das monetäre Ziel und auf die Robustheit, und wie können sie gemessen werden?
- Welchen Einfluss hat die Höhe der Expansions- und Kontraktionsauszahlungen der Potentialfaktoren auf die Planungsrobustheit?

1.4 Zielsetzung und Vorgehensweise

Aufbauend auf der Analyse der bisherigen Forschung ist es das Ziel der vorliegenden Dissertation, einen Planungsansatz zur simultanen Planung von Gütererstellungs- und Rückflussbewältigungskapazität unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen der Güterhin- und -rückflüsse und unter unvollständiger Information zu entwickeln. Im Fokus der Betrachtung steht ein dynamischer Ansatz der Investitionsplanung, der alle im Zeitablauf auftretenden taktischen Kapazitätsanpassungsentscheidungen bzgl. Auf- und Abbau sowie die Auswirkungen auf das Absatz- und Rückflussprogramm bewerten soll. Dem Entscheider soll dabei die Möglichkeit gegeben werden, Entscheidungen bzgl. Absatz- und Rücknahmemengen beeinflussen zu können. Dies soll durch die ökonomische Einbeziehung der Markt-, Leistungs- und Ressourceninterdependenzen zwischen originären Produkten und ihren Güterrückflüssen indiziert werden, wobei die Wechselwirkungen mit Hilfe eines Transformationsprogramms aller entscheidenden Güterströme abgebildet werden.

Zudem steht die Handhabung der externen Unsicherheit bzgl. der Absatzhöchstmenge und der Güterrückflussmenge in qualitativer, zeitlicher und mengenmäßiger Hinsicht im Fokus dieser Arbeit. Diese soll durch ursachenbezogene Maßnahmen, Anreicherung der Informationsbasis durch intensive Informationsbeschaffungs- und

-verarbeitungsaktivitäten beschränkt werden. Die verbleibende Unsicherheit ist durch wirkungsbezogene Maßnahmen zu handhaben. Beide Aspekte können mit Hilfe der in der Literatur verfügbaren Ansätze in die Kapazitätsplanung integriert werden.

Den Ausgangspunkt zur Erreichung der Ziele bildet die Strukturierung des Planungsproblems (Kapitel 2). In Abschnitt 2.1 werden verschiedene Planungssituationen beschrieben, und aufgezeigt, wie diese die Handlungsmöglichkeiten im Rahmen der Kapazitätsdimensionierung beeinflussen. Sie ergeben sich durch intrinsische und extrinsische Beweggründe des Entscheidungsträgers bezüglich des Absatzes und der Rücknahme von Güterrückflüssen. Auf Grundlage dieser Rahmenbedingungen wird ein deterministisches Modell zur simultanen Planung von Gütererstellungs- und Rückflussbewältigungskapazität als Ausgangspunkt der weiteren Betrachtung entwickelt (Abschnitt 2.2). Das Planungsproblem wird in zwei Modelle eingeteilt: ein Güterflussmodell und ein Kapazitätsanpassungsmodell (Unterabschnitt 2.2.1). Zur Berücksichtigung der Leistungsinterdependenzen werden die für die zu produzierenden und zurückfließenden Gütermengen auszuführenden Prozesse und deren Kapazitätsnachfrage in einem mehrperiodigen aktivitätsanalytischen Güterflussmodell abgebildet. Marktinterdependenzen werden durch die Einbeziehung von Absatzhöchstmengen, die die Produktnachfrage charakterisieren, berücksichtigt (Unterabschnitt 2.2.2). Die Ressourceninterdependenzen ergeben sich durch den Kapazitätsbedarf der bei der Leistungserstellung auszuführenden Prozesse und werden im Kapazitätsanpassungsmodell abgebildet (Unterabschnitt 2.2.3). Dieses beschreibt die Wirkungen des im Zeitablauf erfolgenden Auf- und Abbaus der erforderlichen Kapazität.

Das Grundmodell wird um Ansatzpunkte zur Generierung robuster Pläne erweitert, um die externen Unsicherheiten bzgl. der Produktnachfrage und des Güterrückflusses (in qualitativer, zeitlicher und mengenmäßiger Hinsicht) zu handhaben (Abschnitt 2.3). Ziel der Ermittlung von robusten Plänen ist keine neue Planungskonzeption. Stattdessen werden spezielle Anforderungen an die Planung gestellt, die sich in zu erfüllenden Robustheitskriterien widerspiegeln. Da die Kapazitätsaufbau- und -abbauentscheidungen im Rahmen der Kapazitätsdimensionierung weitreichende Auswirkungen auf die Handlungsmöglichkeiten, wie Produktion und Transformation von Güterflüssen, haben, ist die Berücksichtigung der Planungsrobustheit eine geeignete

Möglichkeit, um die negativen Zielauswirkungen zu reduzieren: Es werden drei in der Literatur aufgezeigte Ansätze zur Generierung der Robustheit im Planungsansatz integriert:

- Im Rahmen der Berücksichtigung zusätzlicher Handlungsoptionen steht die Flexibilisierung des Planungsobjektes, als wirkungsbezogene Maßnahme zur Reduzierung der Unsicherheit, im Mittelpunkt der Betrachtung (Unterabschnitt 2.3.1). Die Möglichkeit, zusätzlich zu der quantitativen auch die qualitative Kapazität zu berücksichtigen, wird gegeben. Flexibilität wurde im Rahmen von Reverse Logistics kaum thematisiert¹⁾. Die Kapazität wird durch Investitionen in Anlagen bereitgestellt, die unterschiedlich flexibel im Hinblick auf die darauf ausführbaren Prozesse sind (z.B. Montage und Demontage auf derselben Anlage oder auf separaten Anlagen). Durch diese flexibilitätsorientierte Ausstattung wird versucht, aktiv auf die Auswirkungen der Unsicherheiten zu reagieren.
- Eine weitere Maßnahme zur Erhöhung der Robustheit ist die Einbeziehung der Unsicherheit bei der Entscheidungsfindung (Unterabschnitt 2.3.2). Die relevanten unsicheren Parameter im Rahmen der Kapazitätsdimensionierung werden als Zufallsvariablen definiert. Im Hinblick auf die Robustheit steht mit dem stochastischen Kompensationsmodell eine geeignete Modellierungstechnik zur Verfügung, die an einer zweistufigen Modellstruktur ansetzen kann. Durch die Abbildung der Zufallsvariablen anhand von Szenarien können mögliche unsichere Ausprägungen der Parameter berücksichtigt werden.
- Der Planungsansatz wird durch die Betrachtung eines rollierenden Planungshorizontes erweitert (Unterabschnitt 2.3.3). Durch die Aktualisierung der Datenbasis in jedem Planungsschritt werden die Ausprägungen der unsicheren Parameter bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt („rollierende Planung“).

In Abschnitt 2.4 wird das Grundmodell um die beschriebenen Maßnahmen erweitert. Um die Auswirkungen der Maßnahmen auf die Robustheit quantifizieren zu können, werden in der Literatur bekannte Maße auf das vorliegende Planungsproblem angewendet (Abschnitt 2.5).

Zur Verbesserung der Informationsgrundlage werden ursachenbezogene Maßnahmen mittels *Informationsbeschaffungs- und Verarbeitungsaktivitäten* in den Planungsan-

¹⁾ Vgl. Bai/Sakris (2013), S. 306.

satz integriert (Kapitel 3): Mit Hilfe einer Prognose der Nachfrage nach Endprodukten und des Güterrückflusses bestehen im Hinblick auf die Unsicherheit Möglichkeiten der aktiven Einflussnahme, durch die die Informationssituation verbessert und damit die Unsicherheit reduziert werden kann¹⁾.

Aus dem hervorgehenden Planungsproblem werden die Anforderungen an eine problemspezifische Prognose herausgearbeitet (Abschnitt 3.1). Abhängig von der vorliegenden Planungssituation wird der Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Nachfrage-/Absatz- und Rückfluss-/Rücknahmemengen bei der Prognose der Nachfrage- und Rückflussmengen eine unterschiedliche Relevanz zugesprochen. Die Klasse der dynamischen Regressionsverfahren wird als Klasse geeigneter Prognoseverfahren identifiziert. Unterschiedliche Modelle zur Absatz- und Rückflussprognose werden entsprechend des Aggregationsgrades der vorliegenden Informationsbasis und der Entscheidungssituation formuliert und entsprechende Schätzverfahren für unterschiedlich komplexe Beziehungen zwischen Absatz- und Rückflussmengen identifiziert (Abschnitt 3.2). Bei Verfügbarkeit univariater Zeitreihen steht mit dem autoregressiven Distributed-lag-Modell eine geeignete Modellierungstechnik zur Verfügung (Unterabschnitt 3.2.1). Aufgrund unterschiedlicher Rückflussqualitäten ist die Berücksichtigung mehrerer Güterarten bei der Prognose relevant. Ein multivariates Prognosemodell wird formuliert und um entscheidungsspezifische Besonderheiten modifiziert (Unterabschnitt 3.2.2). Aufbauend auf den vorgestellten Prognosemodellen wird im nächsten Abschnitt erklärt, wie eine mehrschrittige Prognose für endogen oder exogen zu bestimmende Größen abläuft (Abschnitt 3.3). Zur Prognose endogener Größen werden die vorgestellten Prognosemodelle angewendet; für exogene Größen gelangen in der Literatur diskutierte Verfahren zur Anwendung. Um den Entscheidungsträgern die Möglichkeiten zu geben, die Absatz- und Rückflussmengen zu beeinflussen und Marktinterdependenzen zwischen den originären Produkten und ihren Güterrückflüssen abzubilden, werden die beschriebenen Prognose-

¹⁾ Vgl. Guide et al. (2000), S. 132; Schröter (2006), S. 55.

modelle in den Planungsansatz integriert. Die Besonderheiten der Integration werden aufgezeigt (Abschnitt 3.4).

Der Planungsansatz wird im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse getestet (Kapitel 4). Für eine strukturierte Analyse werden Vermutungen bzgl. der Ergebnisse aufgestellt (Abschnitt 4.1). Um den Einfluss der integrierten Maßnahmen auf den Rechenaufwand, das monetäre Ziel und die Robustheit zu analysieren, werden unterschiedliche Parameter (Prognosefehler, Kapazitätsanpassungsauszahlungen) systematisch variiert. Zudem wird die Möglichkeit gegeben, in unterschiedlich flexible Potentialfaktoren zu investieren (Abschnitt 4.2). Durch die simultane Betrachtung besteht erstmals die Möglichkeit, das Zusammenwirken der beiden Ansatzpunkte (Dimensionierung von quantitativer und qualitativer Kapazität) zur Generierung von Robustheit zu analysieren (Abschnitt 4.3). Die Planungsergebnisse werden anhand geeigneter Kriterien analysiert (Abschnitt 4.4). Ein Fazit und ein kurzer Ausblick über mögliche weitere Forschungsfragen bilden den Abschluss dieser Arbeit (Kapitel 5).

2 Strukturierung des Planungsproblems

2.1 Planungssituationen

Der Begriff der Produktrücknahme beschreibt den Prozess, dass der Hersteller nach der Produktnutzung durch den Kunden, das Produkt wieder annimmt¹⁾. Dies kann in unterschiedlichen Rücknahme- und Absatzsituationen erfolgen. Einerseits entspricht im Falle von gesetzlichen Forderungen (national und international)²⁾ an die Unternehmung und/oder vertraglichen Vereinbarungen die Produktrücknahme- auch der Rückflussmenge. Der Unternehmung sind keine alternativen Handlungsmöglichkeiten gegeben. Es liegt im Ermessen der Unternehmung Entscheidungen über die Rücknahmemengen zu fällen. Ein Spezialfall liegt vor, wenn die Unternehmung mindestens eine Rücknahmequote α erfüllen muss. Das heißt, dass die Unternehmung die Rückflussmengen unabhängig von der Qualität akzeptieren muss³⁾. Andererseits kann die Rücknahmemenge von der Rückflussmenge abweichen. Neben den umweltrechtlichen Rahmenbedingungen werden diese Relationen auch von ökonomischen sowie den sozialen (bzw. ethischen) Motiven getrieben⁴⁾. Aufgrund der Wechselwirkungen zwischen der Kapazitätsdimensionierung und der Produktions- und Absatzplanung lassen sich die *ökonomischen* Motive in *unmittelbar (direkt)* und *mittelbar (indirekt) vorteilhaft wirkend* einteilen⁵⁾. Im ersten Fall werden das Kostenreduktionspotential (z.B. Reduzierung der Produktionskosten und/oder Abfallbeseitigungskosten) und die resultierenden Gewinne (Nachfragebedienung) unmittelbar vorteilhaft genannt, die durch die Transformation oder Weiter- bzw. Wiederverwen-

¹⁾ Vgl. Minner (2001), S. 417.

²⁾ Vgl. Govindan/Soleimani/Kannan (2015), S. 617 f.; Souza (2013), S. 14 ff.; Thierry (1997), S. 9 ff.

³⁾ Vgl. Clotey/Benton (2014), S. 880.

⁴⁾ Vgl. Das/Dutta (2015), S. 141 ff.; de Brito/Dekker (2004), S. 10 ff.; Fleischmann et al. (1997), S. 1 ff.; Rogers/Tibben-Lembke (1999), S. 14 ff.; Toffel (2004), S. 120 ff., unterscheidet zwischen un- bzw. freiwilligen Motiven zur Produktrücknahme.

⁵⁾ Vgl. de Brito/Dekker (2004), S. 10 ff.; Fleischmann et al. (2000), S. 663; Guide/van Wassenhove (2001), S. 142; Schröter (2006), S. 12 ff.

derung der Rückflussprodukte entstehen¹⁾. Im zweiten Fall ergeben sich durch die Produktrücknahme ökonomische Vorteile aufgrund einer Erhöhung der Kundenbindung, des Aufbaus eines grünen Images, der Positionierung am Markt und Vorbeugung von zukünftigen Gesetzen²⁾. Das Motiv der *ethischen* bzw. *sozialen* Verpflichtung der Umwelt gegenüber ist selten gesondert bei der Unternehmungsstrategie zu finden, sondern liegt als Konsequenz des Strebens der Unternehmung nach Gewinnmaximierung vor³⁾. Hauptziel jeder Unternehmung ist ihre ökonomische Nachhaltigkeit⁴⁾. In den meisten Fällen lassen sich die ökonomischen und sozialen Motive miteinander vereinbaren und schließen sich nicht aus⁵⁾. Treffen die diskutierten Motive nicht zu, dann können die Rückflussmengen auch abgelehnt werden. In diesem Fall können die nicht zurückgenommenen Rückflussmengen an vom Hersteller unabhängige Unternehmungen zurückgegeben werden⁶⁾. Dadurch werden die Be- und Verarbeitung für die Ursprungswertschöpfungskette ausgegliedert.

Auch für die Absatzmengen lassen sich analoge Situationen unterscheiden. Während z.B. langfristige vertragliche Vereinbarungen feste Absatzmengen und damit eine volle Nachfrageerfüllung begünstigen, gibt es in anderen Unternehmungen die Möglichkeit abhängig von den Rahmenbedingungen zu entscheiden, inwieweit die Nachfrage unter Berücksichtigung der Bedingungen bedient werden soll. Diese Entscheidungen werden, wie auch die Rücknahmeentscheidungen, von ökonomischen und sozialen Faktoren beeinflusst. Durch Kombination der möglichen Rücknahme- und Absatzsituationen können sich folgende Planungssituationen in jeder Periode t ergeben (siehe Tabelle 2.1).

¹⁾ Vgl. Tibben-Lembke (1998), S. 51 ff.; Toffel (2004), S. 122 f.

²⁾ Vgl. de Brito/Dekker (2004), S. 10 f.

³⁾ Vgl. Gungor/Gupta (1999), S. 824 ff.

⁴⁾ Vgl. Guide/Harrison/van Wassenhove (2003), S. 5.

⁵⁾ Vgl. Fleischmann et al. (1997), S. 3; Inderfurth (2005), S. 319.

⁶⁾ Vgl. Goggin/Reay/Browne (2000), S. 188.

Absatzmenge Rücknahmemenge	muss der Nachfrage- menge entsprechen	kann von der Nachfrage- menge abweichen
muss der Rückflussmenge entsprechen	Situation I $XN_t = XR_t$ $XE_t = ME_t$	Situation II $XN_t = XR_t$ $XE_t \leq ME_t$
kann von der Rückfluss- menge abweichen	Situation III $XN_t \leq XR_t$ $(XN_t \geq \alpha \cdot XR_t)$ $XE_t = ME_t$	Situation IV $XN_t \leq XR_t$ $(XN_t \geq \alpha \cdot XR_t)$ $XE_t \leq ME_t$
XN_t Rücknahmemenge	XE_t Absatzmenge	
XR_t Rückflussmenge	ME_t Nachfragemenge bzw. Absatzhöchstmenge	

Tabelle 2.1: Planungssituationen

Im weiteren Verlauf werden für jede Planungssituation die ökonomischen Implikationen für die Kapazitätsdimensionierung herausgearbeitet. Dabei ist zu beachten, dass aufgrund des mittelfristigen Zeithorizonts neben den ökonomischen, gesetzlichen und sozialen Einflussfaktoren auch die Unsicherheiten bzgl. der Nachfrage und des zeitlichen, mengenmäßigen und qualitativen Auftretens der Rückflüsse entscheidende Faktoren sind, die das Rücknahmeverhalten der Unternehmung beeinflussen¹⁾.

Zunächst werden alle Handlungsalternativen systematisch dargestellt, um anschließend aufzuzeigen, welche Handlungsmöglichkeiten in den jeweiligen Situationen relevant sind. Die Handlungsalternativen lassen sich in taktische und operative Entscheidungsmöglichkeiten einteilen (siehe Tabelle 2.2). Auf taktischer Ebene wird über den Auf- und Abbau (Expansion und Kontraktion) von Kapazität entschieden. Dabei werden insbesondere Entscheidungen bzgl. des Ausmaßes, des Zeitpunktes

¹⁾ Vgl. Guide (2000), S. 472 f.; Inderfurth (2005), S. 319; Thierry (1997), S. 49 ff.

und der Kapazitätsart getroffen¹⁾. Andere taktische Maßnahmen, die ergriffen werden, um Kapazitätsengpässe in einem unsicheren Entscheidungsfeld zu handhaben, sind z.B. Verteilungspläne, erhöhte Preise, Aufbau von Auftragsrückständen und ein erweiterter Lageraufbau²⁾. Wenn diese Maßnahmen nicht im Modell verankert sind, müssen Annahmen getroffen werden, wie mit einem Übermaß an Kapazität verfahren wird³⁾. Während die taktischen Handlungsalternativen zur Sicherstellung des Kapazitätsangebots der Unternehmung genutzt werden können, determinieren die operativen Alternativen im Rahmen der Kapazitätsdimensionierung die Kapazitätsnachfrage der Prozesse, um das Absatzprogramm und das Rückflussprogramm zu bewältigen. Die operativen Handlungsmöglichkeiten lassen sich nach den Gestaltungsfeldern Beschaffung, Transformation, Lagerung, Vertrieb, Sammlung und Entsorgung einteilen. Das Ziel der Beschaffung ist es, das Beschaffungsprogramm so zu bestimmen, dass der Bedarf an Produktionsfaktoren gedeckt wird. Dieser ist abhängig vom Produktions- und Rückflussbewältigungsprogramm in den Perioden des Planungszeitraums, welches der Output von Transformationsfunktionen ist. Die Transformationsmengen dienen zur Erfüllung des Absatzprogramms. Produktions- und Absatzprogramm können aufgrund der Möglichkeit der Lagerhaltung voneinander abweichen. Das Absatzprogramm beschreibt die Mengen, die in einer Periode abgesetzt werden sollen und wird von der Kundennachfrage als Obergrenze begrenzt. Der Gestaltungsbereich Sammlung beschreibt die Mengenentscheidungen bzgl. der Rücknahme der Güterrückflussmengen.

¹⁾ Vgl. Luss (1982), S. 910 ff.

²⁾ Vgl. Lovelock/Wirtz (2011), S. 249 ff.

³⁾ Vgl. Van Mieghem (2003), S. 279.

taktische Entscheidungen					
Kapazitätsexpansion			Kapazitätskontraktion		
operative Entscheidungen					
Beschaffung	Transformation	Lagerung	Absatz	Sammlung	Entsorgung

Tabelle 2.2: Handlungsalternativen für die Kapazitätsdimensionierung

Bei der Ausarbeitung der ökonomischen Implikationen für die Kapazitätsdimensionierung in den unterschiedlichen Planungssituationen wird berücksichtigt, dass die Wirkungen der getroffenen taktischen Entscheidungen bzgl. Kapazitätsexpansion und -kontraktion mit einer zeitlichen Verzögerung eintreten können. Die Handlungsmöglichkeiten der Kapazitätsexpansion und -kontraktion sind in jeder Planungssituation gegeben und vom prognostizierten Kapazitätsbedarf abhängig:

- *Situation I:* Bei dieser Planungssituation hat die Unternehmung keine Entscheidungsmöglichkeiten bzgl. der Rücknahme- und Absatzentscheidungen; die Nachfrage muss bedient werden und alle Güterrückflüsse werden zurückgenommen. Diese Planungssituation basiert auf vertraglichen und/oder gesetzlichen Verpflichtungen. Die Nachfrageerfüllung und die Handhabung von Rückflussmengen müssen kapazitatativ sichergestellt werden, obwohl Nachfrageunsicherheiten und Unsicherheiten bzgl. des zeitlichen, mengenmäßigen und qualitativen Rückflussaufkommens bestehen. Dadurch müssen auf strategischer Ebene Entscheidungen getroffen werden, z.B. ein hoher Lageraufbau, um durch zeitliche und mengenmäßige Puffer und durch Anpassung der operativen Mengenentscheidungen bzgl. Beschaffung, Transformation, Lagerung und Entsorgung die Unsicherheit handzuhaben. Handlungsalternativen bzgl. des Vertriebes und der Sammlung entfallen. Ein Beispiel dieser Planungssituation unter Nachfrage- und Rückflussunsicherheit ist die öffentliche Wasserversorgung.
- *Situation II:* Güterrückflüsse müssen aufgrund von gesetzlichen und vertraglichen Verpflichtungen zurückgenommen werden und die Absatzmenge kann von der Nachfragemenge abweichen. Prognosefehler bei Nachfrage- und Rückflussmengen (Unsicherheiten), die als Rohstoffe für vorwärts gerichtete Güter in dem Produktionsprozess genutzt werden, können mit modifizierten Beschaffungs-, Transformations-, Lager- und Absatzmengen aufgefangen werden. Dies kann zu Auftragsrückständen oder nicht erfüllbarer Nachfrage führen. Auf taktischer Ebene muss eine ausreichende Rückflussbewältigungskapazität zur Verfügung (entweder zur Verarbeitung oder Beseitigung) gestellt werden. Bzgl. der Sammlung von Gü-

terrückflüssen bestehen keine alternativen Handlungsmöglichkeiten. Beispiele für diese Planungssituation sind Hersteller von Autobatterien.

- *Situation III*: In dieser Planungssituation muss die Nachfragemenge bedient werden und die Rücknahme- kann von der Rückflussmenge abweichen. Das bedeutet, dass Nachfrage- und Rückflussunsicherheit durch die Anpassung von Beschaffungs-, Transformations-, Lagerungs- und Rücknahmemengen gehandhabt werden können. Ein Spezialfall liegt vor, wenn die Unternehmung einer gesetzlichen Rücknahmequote unterliegt. Durch taktische Handlungsmöglichkeiten muss die Bedienung der Nachfrage kapazitativ sichergestellt werden (z.B. Aufbau von Puffern). Die Möglichkeit, über Absatzmengen zu entscheiden, entfällt in dieser Planungssituation. Beispiele für diese Plansituation sind das Telefonbuch oder der Online-Handel.
- *Situation IV*: In dieser Situation kann sowohl die Absatz- von der Nachfragemenge, als auch die Rücknahme- von Rückflussmenge abweichen, bzw. es muss eine gesetzliche Rücknahmequote erfüllt werden. Unsicherheiten bzgl. der Nachfrage und des Güterrückflussaufkommens können durch eine Anpassung der Beschaffungs-, Transformations-, Lagerungs-, Absatz-, Rücknahme- und Entsorgungsentscheidungen ausgeglichen werden¹⁾. Da keine vertraglichen bzw. gesetzlichen Verpflichtungen vorherrschen, kann die Unternehmung ihre ökonomische Performance selbst steuern. Die Getränkeindustrie mit ihrem Leegutaufkommen als Rückfluss ist ein treffendes Beispiel für diese Plansituation.

2.2 Grundmodell

2.2.1 Abgrenzung von Teilmodellen

Ziel dieses Kapitels ist die Entwicklung eines deterministischen Modells zur simulanten Planung von Gütererstellungs- und Rückflussbewältigungskapazität mit integrierter Absatz- und Rückflussprognose. Aufgrund des zeitlichen Horizonts und der Stärke der resultierenden Zahlungsströme handelt es sich um ein spezifisches Problem der Investitionsprogrammplanung. Das Planungsproblem wird als dynamisches lineares gemischt-ganzzahliges Programm modelliert. Das Modell verfolgt als Ziel die Maximierung des erwarteten Barwerts. Dadurch können die Zahlungen der ver-

¹⁾ Vgl. Guide (2000), S. 472.

schiedenen Zeitpunkte miteinander verglichen werden. Es soll die folgenden Fragen auf taktischer und operativer Ebene beantworten:

- Wann soll Kapazität in welchem Ausmaß aufgebaut bzw. abgebaut werden?
- Wann und in welchem Ausmaß werden Güter beschafft, transformiert, gelagert, abgesetzt und/oder entsorgt?

Abbildung 2.1 zeigt beispielhaft die Problematik der Abstimmung der Kapazitätsnachfrage mit dem Kapazitätsangebot im Rahmen der Kapazitätsdimensionierung. Die Kapazitätsnachfrage wird anhand verschiedener Güterhin- (Absatz) und -rückflussarten (z.B. reparaturbedürftige Produkte, Gebrauchte am Ende der technischen Lebensdauer (end-of-life-Produkte)) einer CLSC abgebildet, für die die Gütererstellungs- und Rückflussbewältigungskapazität (Aufbereitungs- und Reparaturkapazität) simultan geplant werden soll. Das Kapazitätsangebot ergibt sich durch den schrittweisen Auf- und Abbau von Kapazität (Des-/Investitionsprogramm). Dieser ist in der Abbildung durch die gestrichelten Linien abgebildet. Es können zwei wichtige Aspekte erkannt werden:

- Der Umfang der Hin- und Rückflussmengen unterscheidet sich voneinander, weil nicht alle Güter wieder zum Hersteller zurückfließen. Generell ist die Produktnachfrage höher als der Güterrückfluss¹⁾.
- Die Rückflussmengen fließen zeitversetzt durch die Nutzungszeit beim Kunden wieder zurück („time-lag“).

¹⁾ Vgl. Jung (2016), S. 535.

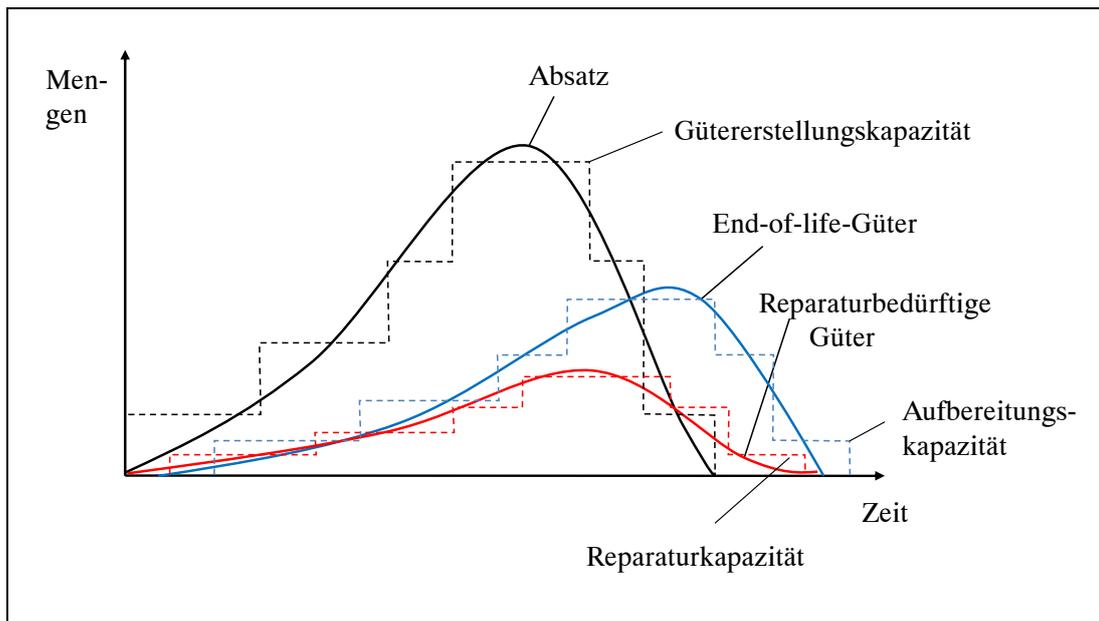


Abbildung 2.1: Beispielhafte Kapazitätsanpassung von Gütererstellungs- und Rückflussbewältigungskapazität

Den Ausgangspunkt für die Erstellung eines Entscheidungsmodells, das die beschriebenen Anforderungen erfüllt, bildet eine Strukturierung des Planungsproblems, die die Ideen aus den unterschiedlichen vorhandenen Kapazitätsdimensionierungsansätzen zusammenführt und um ein Güterflussmodell erweitert (Kapitel 2). Aus dem daraus hervorgehenden Planungsmodell werden die Anforderungen an eine problem-spezifische Prognose herausgearbeitet sowie ein Prognosemodell und entsprechende Schätzverfahren identifiziert (Kapitel 3). Daraus ergibt sich ein Planungsansatz, der aus zwei Teilen besteht: das Güterflussmodell mit integriertem Prognosemodell und das Kapazitätsanpassungsmodell:

- Auf operativer Ebene werden die für die zu produzierenden und zurückfließenden Gütermengen auszuführenden Prozesse und deren Kapazitätsnachfrage in einem mehrperiodigen aktivitätsanalytischen *Güterflussmodell* abgebildet¹⁾. Es werden operative Entscheidungen über die Mengen bei Beschaffung, Transformation, Lagerung, Absatz und Entsorgung der Güter getroffen. Die Hin- und Rückflüsse sind über das Prognosemodell gekoppelt, das die Wechselbeziehungen der Güterströme durch eine funktionale Beziehung abbildet.

¹⁾ Vgl. Spengler/Ploog/Schröter (2003), S. 417 ff., die auf der Grundlage der Aktivitätsanalyse ein Rückflussgüterprogrammplanungsmodell formulieren.

- Das *Kapazitätsanpassungsmodell* auf der taktischen Ebene bildet die Wirkungen des im Zeitablauf erfolgenden Auf- und Abbaus der für die Prozessausführungen erforderlichen Kapazität ab. Die Kapazität wird durch Investitionen in Anlagen bereitgestellt. Ein Kapazitätsabbau geht mit Liquidationserlösen einher. Zusätzlich erfasst dieses Teilmodell die Verzögerung zwischen der Investitions-/Desinvestitionsentscheidung und der daraus resultierenden Änderung der verfügbaren Kapazität.

Die Struktur des Planungsansatzes ist graphisch in Abbildung 2.2 dargestellt.

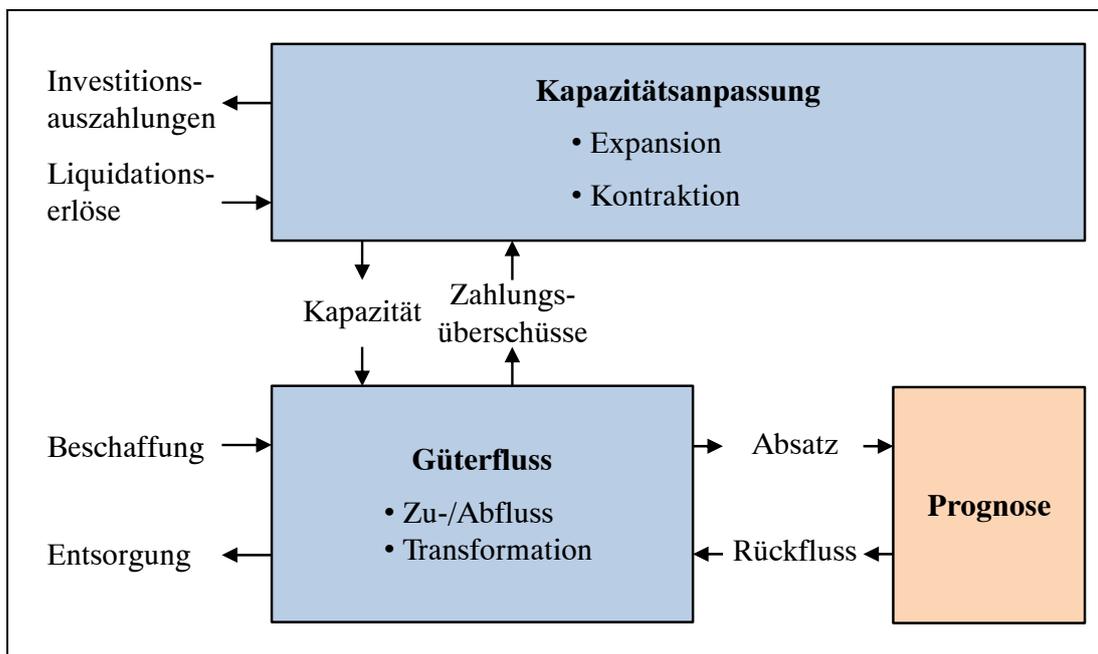


Abbildung 2.2: Struktur des Planungsansatzes

Im Vergleich zu anderen Planungsansätzen, berücksichtigt der Planungsansatz drei zusätzliche Aspekte:

- Gütererstellungs- und Rückflussbewältigungskapazität werden simultan geplant.
- Der Güterrückfluss kann teilweise durch eine integrierte Absatz- und Rückflussprognose geplant und beeinflusst werden.
- Es werden mehrere Rückflussqualitäten in der Kapazitätsplanung berücksichtigt.

2.2.2 Güterflussmodell

Auf operativer Ebene wird im Güterflussmodell das Produktions- und Rückfluss-handlungsprogramm determiniert, um das zugrundeliegende ökonomische Ziel zu erfüllen.

Aufgrund des taktischen Charakters der Kapazitätsdimensionierung wird angenommen, dass eine hinreichend genaue Detaillierung des Modells vorliegt, wenn

- die Güterflüsse auf der Ebene der Endprodukte erfasst werden,
- die Abbildung von Transformationen in Form von linear-limitationalen Prozessen erfolgt und
- die Transformationshöchstdauer eines Endproduktes maximal eine Teilperiode des Planungszeitraumes beträgt.

Der Planung liegen folgende *Informationen* zugrunde: Die *Güterarten* j ($j = 1, \dots, J$) sind Endprodukte, die sich in ihrer Gestaltung oder bei identischer Gestaltung in ihrem Transformationszustand (z.B. unmontierte Komponenten eines Produkts, Neuprodukt, funktionsfähiges Gebrauchtprodukt, zu reparierendes Neuprodukt, zu reparierendes Gebrauchtprodukt, Gebrauchtprodukt am Ende der technischen Lebensdauer) unterscheiden. In der CLSC können zur Gütertransformation die *Prozesse* i ($i = 1, \dots, I$) zur Anwendung gelangen (z.B. Montage, Reparatur, Demontage), deren Basisaktivitäten mit Hilfe von Flussvektoren $U_i \in \mathbb{R}^J [J \times 1]$ erfasst werden¹⁾. Die Flussvektoren werden in der Matrix $U [J \times I]$ zusammengefasst. Durch die Angabe von Netto-Mengen ergeben sich dabei für Inputgüter negative und für Outputgüter positive Werte. Die Menge zulässiger Aktivitäten bildet eine *lineare Technologie*. Aus dem Kapazitätsanpassungsmodell ist die pro Periode t ($t = 0, \dots, T$) verfügbare Kapazität $C_t \in \mathbb{R}_0^+ [I \times 1]$ bekannt. Vor Beginn des Planungszeitraumes ($t = 0$) ist der Lagerbestand $L_t \in \mathbb{R}_0^+ [J \times 1]$ null. Absatz-/Entsorgungshöchstmengen $ME_t [J \times 1]$ und Beschaffungshöchstmengen $MI_t [J \times 1]$ sind

¹⁾ Vgl. Dyckhoff (2006), S. 83 ff.; Spengler/Ploog/Schröter (2003), S. 417 ff. Letztere formulieren auf der Grundlage der Aktivitätsanalyse ein Rückflussgüterprogrammplanungsmodell.

prognostische Informationen, ebenso wie der funktionale Zusammenhang zwischen Rückflussmenge $\mathbf{XR}_t [J \times 1]$ und den in den $(l = 0, \dots, L)$ zurückliegenden Perioden realisierten Absatz-/Entsorgungsmengen $\mathbf{XE}_{t-l} [J \times 1]$ (sowie weiteren Einflussgrößen $\mathbf{YN}_{t-l} [M \times 1]$ ($l = 0, \dots, L$), wie etwa demografische, technologische und rechtliche Rahmenbedingungen).

Zur Bestimmung der Zahlungsüberschüsse sind die einzelnen Güterflüsse mit Preisen zu bewerten. Die folgenden Daten sind bekannt:

- Vom Beschaffungsmarkt bezogene Güterarten \mathbf{XI}_t , die in der CLSC zu Endprodukten transformiert werden, werden mit den Beschaffungspreisen $\mathbf{PI} \in \mathbb{R}_0^{J+} [1 \times J]$ bewertet.
- Durch die Sammlung von Rückflussgütern, den sogenannten Rücknahmemengen \mathbf{XN}_t , entstehen Sammlungskosten in Höhe von $\mathbf{PR} \in \mathbb{R}_0^{J+} [1 \times J]$ Geldeinheiten pro Mengeneinheit.
- Pro Durchführung eines Transformationsprozesses entstehen Kosten in Höhe von $\mathbf{PT} \in \mathbb{R}_0^{I+} [1 \times I]$ Geldeinheiten. Kosten der Kapazitätsbereitstellung sind für Güterflussentscheidungen nicht entscheidungsrelevant.
- Die Zwischenlagerung von Güterarten in der CLSC kostet $\mathbf{PL} \in \mathbb{R}_0^{J+} [1 \times J]$ Geldeinheiten pro Mengeneinheit und Periode.
- Die Absatzpreise $\mathbf{PE} \in \mathbb{R}^J [1 \times J]$ pro Mengeneinheit sind bei Endprodukten positiv und bei zu deponierenden Produkten negativ.

Im Güterflussmodell wird den *Entscheidungsfragen* nachgegangen, welche Quantitäten der Niveaus $\boldsymbol{\tau}_t \in \mathbb{R}_0^{I+} [I \times 1]$, mit denen die einzelnen Prozesse für die Transformation der relevanten Güterarten in den Perioden t des Planungszeitraumes betrieben werden, benötigt werden, und welche Quantitäten dieser Güterarten dafür zu beschaffen $\mathbf{XI}_t \in \mathbb{R}_0^{J+} [J \times 1]$, abzusetzen (zu entsorgen) $\mathbf{XE}_t \in \mathbb{R}_0^{J+} [J \times 1]$ und zu lagern $\mathbf{L}_t \in \mathbb{R}^J [J \times 1]$ sind. Des Weiteren wird im Güterflussmodell der Frage nachgegangen, in welchem Ausmaß die Rückflussmengen von der Unternehmung zurückgenommen werden (Rücknahmemenge $\mathbf{XN}_t \in \mathbb{R}_0^{J+} [J \times 1]$).

Der aggregierte Güterflussvektor $\mathbf{XF}_t \in \mathbb{R}^J [J \times 1]$ des gesamten Transformationssystems in Periode t ergibt sich aus der Multiplikation der Matrix der Flussvektoren \mathbf{U}_i und den Prozessniveaus τ_t :

$$\mathbf{U} * \tau_t = \mathbf{XF}_t \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (2.1)$$

Die Prozesse werden durch den Einsatz von Potentialfaktoren vollzogen. Es wird angenommen, dass sich der jeweilige Bestand an Potentialfaktoren durch den Prozessvollzug nicht verändert (kein technischer Verschleiß). Er kann aber von Periode zu Periode durch Investitions-/Desinvestitionsentscheidungen verändert werden.

Bei der Festlegung der Variablen ist folgenden *Beschränkungen* des Entscheidungsfeldes Rechnung zu tragen:

Für das Güterflussmodell ist die pro Periode verfügbare *Kapazität* $\mathbf{C}_t \in \mathbb{R}_0^{I+} [I \times 1]$ relevant, die die Wahl der Prozessniveaus τ_t restringiert:

$$\tau_t \leq \mathbf{C}_t \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (2.2)$$

Eine weitere Transformation der Endprodukte erfolgt nach ihrem Absatz aufgrund der Nutzung durch den Kunden. Da im Allgemeinen nur ein Teil der abgesetzten Endproduktmengen zur SC zurückfließt und der Rückfluss unterschiedliche Ursachen haben kann (z.B. Fehlfunktion, Ende der ökonomischen Nutzungsdauer oder der technischen Lebensdauer), wird dieser durch ein *Prognosemodell* erfasst, das durch statistische Verfahren auf der Grundlage von Vergangenheitsdaten geschätzt wird. Das Modell erfasst die erwarteten Rückflussmengen $\mathbf{XR}_t \in \mathbb{R}_0^{J+} [J \times 1]$ der einzelnen Güterarten in Periode t in Abhängigkeit von den realisierten Absatzmengen der Güterarten \mathbf{XE}_{t-l} ($l = 0, \dots, L$) und weiteren Einflussgrößen $\mathbf{YN}_{t-l} [N \times 1]$ ($l = 0, \dots, L$), wie etwa demografische, technologische und rechtliche Rahmenbedingungen, sowie den realisierten Rückflussmengen $\mathbf{XR}_{t-l'}$ in den L' Vorperioden:

$$\mathbf{XR}_t = g(\mathbf{XE}_{t-l}, \mathbf{YN}_{t-l}, \mathbf{XR}_{t-l'}; l = 0, \dots, L; l' = 1, \dots, L') \quad \forall t-l, t-l' > 0 \quad (2.3)$$

Die Güterrücknahmemenge \mathbf{XN}_t einer Periode muss nicht der Güterrückflussmenge \mathbf{XR}_t entsprechen, kann diese jedoch auch nicht übersteigen:

$$\mathbf{XN}_t \leq \mathbf{XR}_t \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (2.4)$$

Die in einer Periode realisierten Absatzmengen \mathbf{XE}_t der einzelnen Güterarten übersteigen die prognostizierten Absatzhöchstmengen $\mathbf{ME}_t \in \mathbb{R}_0^{J+} [J \times 1]$ nicht:

$$\mathbf{XE}_t \leq \mathbf{ME}_t \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (2.5)$$

Abhängig von der Planungssituation werden die Restriktionen (2.4) und (2.5) weiter eingeschränkt (siehe Tabelle 2.1). Befindet sich die Unternehmung in Planungssituation I, wird die Gleichheit der Restriktion (2.4) und (2.5) und in Planungssituation II bzw. III nur die Gleichheit der Restriktion (2.4) bzw. (2.5) gefordert. Liegt in Planungssituation III oder IV aufgrund von gesetzlichen Bestimmungen eine Mindestrücknahmequote $\alpha_t \in \mathbb{R}_0^{J+} [J \times 1]$ mit $\alpha_{j,t} \in [0;1]$ für die Güterarten vor, so folgt zusätzlich:

$$\mathbf{XN}_t \geq \alpha_t \cdot \mathbf{XR}_t \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (2.4b)$$

Aus Gründen der Nachhaltigkeit determinieren die zu erwartenden Güterrückflüsse den Planungshorizont:

$$\mathbf{XR}_t = \mathbf{0} \quad \forall t > T \quad (2.6)$$

Zusätzlich zu den Rücknahmemengen werden im Transformationsprozess Gütermengen \mathbf{XI}_t eingesetzt, die dem Beschaffungsmarkt entnommen werden. Aufgrund der begrenzten Kapazität der Zulieferer können dabei die Beschaffungshöchstmengen $\mathbf{MI}_t \in \mathbb{R}_0^{J+} [J \times 1]$ nicht überschritten werden:

$$\mathbf{XI}_t \leq \mathbf{MI}_t \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (2.7)$$

Die unterschiedlich starken Güterströme in der CLSC werden durch *Zwischenlager* synchronisiert, deren Bestand $\mathbf{L}_t \in \mathbb{R}_0^{J+} [J \times 1]$ in keiner Periode negativ ist. Durch den Vektor $\mathbf{XL}_t \in \mathbb{R}^J [J \times 1]$ werden die Lagerzugänge ($XL_{j,t} \geq 0$) und -abgänge ($XL_{j,t} < 0$) in einer Periode erfasst. Im Planungshorizont gilt die Kontinuitätsbedingung:

$$\mathbf{L}_{t-1} + \mathbf{XL}_{t-1} = \mathbf{L}_t \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (2.8)$$

Für die einzelnen Güterarten (insb. die zu deponierenden) ist aus Gründen der Nachhaltigkeit zu fordern, dass nach dem Ende des Planungshorizonts keine Zwischenlagerbestände vorliegen:

$$\mathbf{L}_t = \mathbf{0} \quad \forall t > T \quad (2.9a)$$

Diese Bedingung lässt sich unter Berücksichtigung von (2.6) umformulieren:

$$\mathbf{L}_T + \mathbf{X}\mathbf{L}_T = \mathbf{0} \quad (2.9b)$$

In jeder Planungsperiode besteht in der CLSC ein Gleichgewicht zwischen transformierten, zufließenden und abfließenden Gütermengen:

$$\mathbf{X}\mathbf{F}_t + \mathbf{X}\mathbf{N}_t + \mathbf{X}\mathbf{I}_t = \mathbf{X}\mathbf{E}_t + \mathbf{X}\mathbf{L}_t \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (2.10)$$

Der Zahlungsüberschuss G_t ergibt sich aus den mit Preisen bewerteten transformierten, zufließenden, abfließenden und zu lagernden Gütermengen in den einzelnen Planungsperioden:

$$G_t = -\mathbf{P}\mathbf{I} * \mathbf{X}\mathbf{I}_t - \mathbf{P}\mathbf{R} * \mathbf{X}\mathbf{N}_t - \mathbf{P}\mathbf{T} * \tau_t - \mathbf{P}\mathbf{L} * \mathbf{L}_t + \mathbf{P}\mathbf{E} * \mathbf{X}\mathbf{E}_t \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (2.11)$$

2.2.3 Kapazitätsanpassungsmodell

Im Kapazitätsanpassungsmodell wird die Investitionsprogrammplanung auf taktischer Ebene abgebildet. Hierbei werden die Interdependenzen der Güterströme der operativen Ebene berücksichtigt.

Dabei liegen die folgenden *Informationen* zugrunde: Zu Beginn des Planungszeitraumes ($t=0$) haben die Prozesse eine Anfangskapazität von $\mathbf{C}_0 \in \mathbb{R}_0^{I+} [I \times 1]$. Für jede Periode t ($t=1, \dots, T$) des Planungszeitraumes ist das Prozessniveau $\tau_t \in \mathbb{R}_0^{I+} [I \times 1]$ einzelner Prozesse aus dem Güterflussmodell bekannt. Kapazitätsaufbau und -abbau gehen mit Auszahlungen einher, die zwei Komponenten aufweisen:

- Fixe Auszahlungen $\mathbf{I}\mathbf{E}, \mathbf{I}\mathbf{K} \in \mathbb{R}_0^{I+} [1 \times I]$ sind unabhängig vom Umfang der Kapazitätsänderung zu tätigen, sobald diese vorgenommen wird.

- Variable Auszahlungen bemessen sich nach dem Umfang der geplanten Kapazitätsänderung und betragen pro Kapazitätseinheit $ie, ik \in \mathbb{R}_0^{I+}$ $[1 \times I]$ Geldeinheiten.

Die laufenden Zahlungsüberschüsse G_t in Abhängigkeit von den operativen Maßnahmen sind aus dem Güterflussmodell bekannt.

Die folgenden Entscheidungsfragen stehen im Rahmen der Kapazitätsanpassung im Fokus der Betrachtung: In welcher Periode des Planungszeitraumes und in welchem Umfang steht die für die einzelnen Prozesse bestehende Gesamtkapazität C_t zur Verfügung? Wann werden Entscheidungen zur Kapazitätsanpassung, d.h. Expansion $YE_t [I \times 1]$ bzw. Kontraktion $YK_t [I \times 1]$, ausgeführt? In welchem Ausmaß entwickelt sich die Gesamtkapazität durch (Des-) Investitionsentscheidungen über die Expansion $ce_t \in \mathbb{R}_0^{I+} [I \times 1]$ oder Kontraktion $ck_t \in \mathbb{R}_0^{I+} [I \times 1]$ des Potentialfaktorbestandes im Zeitablauf?

Das Entscheidungsfeld unterliegt den folgenden *Beschränkungen*: Die für die einzelnen Prozesse bestehende Gesamtkapazität C_t kann periodenweise durch Expansion ce_t oder Kontraktion ck_t an die Kapazitätsnachfrage angepasst werden. Aufgrund der dazu erforderlichen Konstruktions-, Montage-/Demontage- und Inbetriebnahme-/Außerbetriebsetzungsmaßnahmen müssen Anpassungsentscheidungen mit einem zeitlichen Vorlauf getroffen werden. In einem *Distributed-lag-Modell* geben $qe_{i,\hat{l}}$ und $qk_{i,\hat{l}}$ deshalb die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass die in einer Periode beschlossene Kapazitätsänderung am Prozess i nach \hat{l} Perioden wirksam ist. Dabei gilt:

$$\sum_{\hat{l}=1}^{\hat{L}} qe_{i,\hat{l}} = 1 \text{ und } \sum_{\hat{l}=1}^{\hat{L}} qk_{i,\hat{l}} = 1 \quad \forall i \quad (2.12)$$

Die Werte für einen Prozess sind in den Vektoren $qe_i \in \mathbb{R}_0^{\hat{L}+} [1 \times \hat{L}]$ und $qk_i \in \mathbb{R}_0^{\hat{L}+} [1 \times \hat{L}]$ enthalten. Bedingt durch die in den Vorperioden $t - \hat{l}$ getroffenen Anpassungsentscheidungen besteht in der Periode t ein *Kapazitätsangebot* des Prozesses i :

$$C_{i,t} = C_{i,t-1} + \sum_{\hat{l}=1}^{\hat{L}} (ce_{i,t-\hat{l}} \cdot qe_{i,\hat{l}} - ck_{i,t-\hat{l}} \cdot qk_{i,\hat{l}}) \quad \forall i, t - \hat{l} \geq 0 \quad (2.13)$$

Es kann zu keinem Zeitpunkt negativ werden und wird aus Nachhaltigkeitsgründen nur innerhalb des Planungshorizonts aufrechterhalten:

$$C_t \geq \mathbf{0} \quad \forall t = 0, \dots, T \quad (2.14)$$

$$C_t = \mathbf{0} \quad \forall t > T \quad (2.15)$$

Aufgrund der Bedingung (2.15) wird dem Modell folgende Formel hinzugefügt:

$$C_{i,T} + \sum_{\hat{l}=1}^{\hat{L}} (ce_{i,T+1-\hat{l}} \cdot qe_{i,\hat{l}} - ck_{i,T+1-\hat{l}} \cdot qk_{i,\hat{l}}) = 0 \quad (2.16)$$

Unabhängig vom Ausmaß der Kapazitätsanpassungen ce_t und ck_t sind Vorbereitungsmaßnahmen $YE_t [I \times 1]$ bzw. $YK_t [I \times 1]$ (mit $ye_{i,t}, yk_{i,t} \in \{0,1\}$) erforderlich. Die sehr große Zahl M ist so zu wählen, dass folgende Nebenbedingungen gelten:

$$ce_t \leq M \cdot YE_t \quad \forall t = 0, \dots, T \quad (2.17)$$

$$ck_t \leq M \cdot YK_t \quad \forall t = 0, \dots, T \quad (2.18)$$

Unter der Annahme, dass Kapazitätsanpassungsentscheidungen unverzüglich zahlungswirksam werden, gilt für die *Anpassungsauszahlungen* in Periode t :

$$I_t = IE \cdot YE_t + IK \cdot YK_t + ie \cdot ce_t + ik \cdot ck_t \quad \forall t = 0, \dots, T \quad (2.19)$$

Kapazitätskontraktion geht mit *Liquidationserlösen* in Höhe des Restwertes der abgebauten Kapazität einher. Wird ein Restwert $vr_t \in \mathbb{R}_0^{'+} [I \times 1]$ gemäß Abschreibung $AB_t \in \mathbb{R}_0^{\hat{L}+} [1 \times \hat{L}]$ erwartet, wobei $AB_{i,\hat{l}}$ den Wertverlust nach \hat{l} Perioden erfasst, dann gelten unter Berücksichtigung von zwischenzeitlich vorgenommenen Aufbau- und Abbaumaßnahmen folgende Restriktionen:

- Durch Entscheidungen zur Kapazitätsexpansion erfolgt ein periodischer Wertaufbau ve :

$$ve_{i,t} = ie_i \cdot \sum_{\hat{l}=1}^{\hat{L}} (ce_{i,t-\hat{l}} \cdot qe_{i,\hat{l}}) \quad \forall i, t - \hat{l} \geq 0 \quad (2.20)$$

- Der Restwert entwickelt sich im Zeitablauf aus Wertaufbau und -abbau:

$$vr_{i,t}^r = ve_{i,t} + \underbrace{\sum_{\hat{l}=1}^{\hat{l}} \left(ve_{i,t-\hat{l}} \cdot (1 - AB_{i,\hat{l}}) \right)}_{\text{nicht-abgeschriebener Wert-
aufbau der Vorperioden}} \cdot \underbrace{\left(1 - \frac{\sum_{\hat{l}=1}^{\hat{l}} (ck_{i,t-\hat{l}} \cdot qk_{i,\hat{l}})}{C_{i,t-1} + \sum_{\hat{l}=1}^{\hat{l}} (ck_{i,t-\hat{l}} \cdot qk_{i,\hat{l}})} \right)}_{\text{Anteil der in der Vorperiode
nicht abgebauten Kapazität}}$$

$$\forall i, t - \hat{l} \geq 0 \quad (2.21)$$

Aus dem Blickwinkel der algorithmischen Lösbarkeit des Planungsproblems ist diese explizite Formulierung aufgrund ihrer Nichtlinearität und ihrer Unzulässigkeit für

$$C_{i,t-1} + \sum_{\hat{l}=1}^{\hat{l}} (ck_{i,t-\hat{l}} \cdot qk_{i,\hat{l}}) = 0 \quad \forall i, t - \hat{l} \geq 1 \quad (2.22)$$

als zeitkritisch einzustufen. Deshalb wird im Folgenden eine lineare Formulierung verwendet, die von prognostizierten periodenbezogenen Absatzpreisen $lk_{h,t}$ pro Kapazitätseinheit, die die Alterszusammensetzung des Kapazitätsbestandes implizit berücksichtigen, ausgeht:

$$LK_t = \sum_{i=1}^I \left(lk_{i,t} \cdot \sum_{\hat{l}=1}^{\hat{l}} (ck_{i,t-\hat{l}} \cdot qk_{i,\hat{l}}) \right) \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (2.23)$$

Die Unternehmung befindet sich im Finanzierungsgleichgewicht, wenn der Zahlungssaldo in keiner Periode einen festgelegten Betrag $W < 0$ unterschreitet:

$$-I_t + G_t + LK_t \geq W \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (2.24)$$

Auf dieser Grundlage lässt sich das Güterflussmodell zu einem Kapazitätsdimensionierungsmodell erweitern, mit dem das Ziel der Maximierung des Barwertes entscheidungsrelevanter Zahlungen verfolgt wird. Unter Berücksichtigung des Diskontierungsfaktors f lautet die Zielfunktion Z dann:

$$Z = \max \sum_{t=1}^T \left((-I_t + G_t + LK_t) \cdot f^{-t} \right) - I_0 \quad (2.25)$$

2.3 Erweiterungen zur Generierung von Robustheit

Aufgrund der vorliegenden unvollständigen Informationsbasis und des verbreiteten risikoaversen Verhaltens des Entscheidungsträgers stellt das Generieren robuster Pläne eine relevante wirkungsbezogene Maßnahme zur Handhabung von externen Unsicherheiten dar. Hier wird insbesondere auf die Nachfrage- und Rückflussunsicherheiten eingegangen, da ihre Vernetzung die Problemkomplexität der Kapazitätsdimensionierung in einer CLSC maßgeblich erhöht. Planungsrobustheit eines mehrstufigen dynamischen Planungsprozesses unter Unsicherheit liegt vor, wenn die zu früheren Zeitpunkten generierten Pläne nachträglich nur in geringem Ausmaß angepasst werden müssen, um unter der in der Zwischenzeit eingetretenen Situation zumindest akzeptable Ergebnisse erreichen zu können¹⁾. Welches Ausmaß der Anpassung als gering einzustufen ist und welche Ergebnisse noch akzeptabel sind, kann nicht allgemeingültig begründet werden, sondern ist durch den Entscheidungsträger problem- und situationsspezifisch festzulegen. Die beiden Ansatzpunkte zur Generierung von Robustheit, d.h.

- die Berücksichtigung der für das zu planende System bestehenden Handlungsmöglichkeiten durch Eventualpläne und
- die Einplanung von zeitlichen und mengenmäßigen Puffern

sind im vorliegenden Kontext für die Gestaltung von Kapazität zu konkretisieren²⁾.

Während die beiden ersten Erweiterungen Maßnahmen beschreiben, die zur Vermeidung oder zur Verminderung der Unsicherheiten ermöglicht werden, beschäftigt sich die dritte Erweiterung mit der Frage, wie sukzessive Informationszugänge im Planungsablauf Berücksichtigung finden. Das bedeutet, dass nach der Realisierung eines

¹⁾ Vgl. Kimms (1998), S. 355 ff.; Sridharan/Berry/Udayabhanu (1988), S. 147 ff. Zu einem Überblick über das Spektrum möglicher Robustheitskriterien vgl. Scholl (2001), S. 98 ff.

²⁾ Vgl. Grubbström/Olhager (1997), S. 74 f.; Herroelen/Leus (2004), S. 1603 ff.; Pujawan/Smart (2012), S. 2253 f.

möglichen Szenarios der unsicheren Parameter die neuen Informationen als Planungsgrundlage für den weiteren Verlauf eingebaut werden.

2.3.1 Berücksichtigung zusätzlicher Handlungsoptionen

Zusätzlich zur Bestimmung der quantitativen Kapazität wird in einer *ersten* Erweiterung die Möglichkeit einbezogen, dass Entscheidungen über die qualitative (variationale) Kapazität zu treffen sind. Dabei wird davon ausgegangen, dass jeder Potentialfaktor durch sein Spektrum an Einsatzmöglichkeiten definiert ist. Potentialfaktoren, die mehrere Tätigkeits- oder Werkverrichtungsarten ausrichten können, werden als *flexible Ressourcen*, hybride Anlagen bzw. Mehrzweckaggregate bezeichnet¹⁾. Können sie hingegen nur eine Verrichtungsart ausführen, werden sie *starre Ressource* genannt. Flexible Ressourcen erhöhen die Flexibilität²⁾ einer Unternehmung, die anhand der Anzahl der möglichen Handlungsoptionen gemessen werden kann³⁾. Als größtes Potential der Mehrzweckaggregate zur Handhabung der Unsicherheiten wird in diesem Beitrag die Bestandsflexibilität gesehen, die die Möglichkeit eines vorhandenen Produktionssystems beschreibt, sich an aktuelle Veränderungen anzupassen⁴⁾. Die zusätzlichen Handlungsoptionen können die Ausbreitung von Störungen (Unsicherheiten) in der CLSC einschränken⁵⁾ und somit die Planungsrobustheit erhöhen. Jedoch ist die Anschaffung von Mehrzweckaggregaten im Vergleich zu Spezialgerä-

¹⁾ Vgl. Corsten/Gössinger (2012), S. 15.

²⁾ Allgemein wird Flexibilität als Möglichkeit unvorhersehbare Änderungen (z.B. Nachfrageschwankungen) zu bewältigen, definiert. Vgl. Bengtsson/Olhager (2002), S. 13 f.; Schneeweiss/Schneider (1999), S. 98 f.

³⁾ Vgl. Bengtsson/Olhager (2002), S. 14; Grubström/Olhager (1997), S. 77; Mandelbaum/Buzacott (1990), S. 17 ff.

⁴⁾ Viele Autoren sprechen im Kontext des Einsatzes von flexiblen Ressourcen auch von einer Produktionsflexibilität (z.B. Boyabatli/Toktay (2011), S. 2163 ff., Kouvelis/Tian (2014), S. 861 ff.) oder einer „product mix flexibility“ (z.B. Bengtsson/Olhager (2002), S. 13 ff.; Chen/Li/Tirupati (2002), S. 781 ff.). Ein Überblick über verschiedene Flexibilitätsarten ist bei Bengtsson/Olhager (2002), S. 14 ff. zu finden.

⁵⁾ Vgl. Fine/Freund (1990), S. 449. Weitere Gründe des Einsatzes von flexiblen Ressourcen sind: schnelle Einführung neuer Produktmodelle, Reduzierung des Erfordernisses von Zwischenlagerbeständen und Erhöhung des Produktumfangs um Marktanteile der Konkurrenten zu erschließen.

ten mit höheren Investitionskosten verbunden¹⁾. In vorwärts gerichteten SCs werden als Einflussfaktoren dieser Entscheidungen drei wichtige Aspekte genannt: der Preis (bzw. Deckungsbeitrag), die Investitionskosten sowie die multivariate unsichere Kapazitätsnachfrage²⁾. Im Mehrproduktfall kann die Kapazitätsnachfrage der angebotenen Produkte miteinander korrelieren und die Planung aufgrund der Unsicherheit der Produktnachfrage erschwert werden. In Rahmen von CLSCs werden die Einflussfaktoren aufgrund der Vernetzung der Güterflüsse um folgende Faktoren ergänzt: die funktionale Beziehung zwischen Gütererstellungs- und Güterrückflussmengen (z.B. Substituierbarkeit) und deren Kapazitätsbedarf (Leistungs- und Ressourceninterdependenzen), die Korrelationen zwischen Güterrückflussmengen und Nachfragemengen (Marktinterdependenzen) sowie die Unsicherheiten der Güterrückflussmengen. Insbesondere stellt sich in CLSCs die Frage, ob in Anlagen investiert werden soll, die sowohl in Prozessen der vorwärts- als auch rückwärtsgerichteten Güterflüsse einsetzbar sind (z.B. Montage und Demontage). Durch diese flexibilitätsorientierte Ausstattung wird versucht aktiv auf die Auswirkungen der Unsicherheiten zu reagieren.

Die Grundmodelle des Güterflusses und der Kapazitätsanpassung werden um die Entscheidungsmöglichkeit bzgl. der qualitativen Kapazität erweitert. Dies hat zur Folge, dass zusätzliche Entscheidungsfragen, Entscheidungsvariablen und Beschränkungen ergänzt werden müssen.

Um die Flexibilität der einzelnen Potentialfaktoren berücksichtigen zu können, werden die Potentialfaktoren im Modell direkt adressiert. Bisher wurde der Kapazitätsbestand durch die für die Transformationen benötigten Prozesse pro Zeiteinheit abgebildet. Die geeignete Hilfsgröße zur Abbildung der Flexibilität von hybriden Anlagen ist ihre zeitliche Verfügbarkeit (Zeitfonds). Dadurch wird im Güterflussmodell der zusätzlichen *Entscheidungsfrage* über die Allokation der Zeitfonds der Potentialfaktoren $CZ_t \in \mathbb{R}_0 [K \times H]$ auf die benötigten Kapazitätsarten nachgegangen.

¹⁾ Vgl. Chen/Li/Tirupati (2002), S. 782; Chod/Zhou (2014), S. 709; Van Mieghem (1998), S. 1071.

²⁾ Vgl. Van Mieghem (1998), S. 1071.

Es liegt folgende *Informationsbasis* vor: Die *Kapazitätsnachfragematrix* $\kappa [K \times I]$ erfasst, wie viel Kapazität der Art k ($k=1, \dots, K$) ein einmaliger Vollzug des Prozesses i beansprucht. Die periodenbezogene *Gesamtkapazität* (Zeitfonds) $F_t \in \mathbb{R}_0^{H+} [H \times 1]$ der Potentialfaktoren h ($h=1, \dots, H$) kann zur Erfüllung von Kapazitätsnachfragen der Art k ($k=1, \dots, K$) herangezogen werden. Die binäre Eignungsmatrix $CA [K \times H]$ ($ca_{k,h} \in \{0,1\}$) gibt deshalb an, welche Arten der Kapazitätsnachfrage aufgrund der technologischen Gegebenheiten von den einzelnen Potentialfaktoren grundsätzlich bedient werden können. Jeder Potentialfaktor ist für mindestens eine Kapazitätsart relevant, und jede Kapazitätsart wird durch mindestens einen Potentialfaktor bedient:

$$\sum_{k=1}^K ca_{k,h} \geq 1 \quad \forall h \quad (2.26)$$

$$\sum_{h=1}^H ca_{k,h} \geq 1 \quad \forall k \quad (2.27)$$

Je größer die Spaltensumme für einen Potentialfaktor in dieser Matrix ist, umso flexibler ist dieser für unterschiedliche Leistungsarten einsetzbar¹⁾.

Die *Entscheidungsvariable* $CZ_t \in \mathbb{R}_0 [K \times H]$ beschreibt die Allokationsmatrix der Zeitfonds der Potentialfaktoren h auf die benötigten Kapazitätsarten k . Die zusätzliche Entscheidungsvariable unterliegt folgenden *Schranken*: Die Nachfrage $\kappa \cdot \tau_t$ wird vom Kapazitätsangebot $D_t * AD(H)$ beschränkt. Der Vektor $AD(H)$ beschreibt einen Additionsvektor $[1, \dots, 1]^{TR} \in \mathbb{R}^H$, der eine Bestimmung des Angebotes je Kapazitätsart k ermöglicht. Damit wird die Formel (2.2) als Schnittstelle von Güterfluss- und Kapazitätsdimensionierungsmodell ersetzt (2.2'a, 2.2'b):

$$\kappa * \tau_t \leq D_t * AD(H) \quad \forall t \quad (2.2'a)$$

Die Matrix $D_t \in \mathbb{R}^+ [K \times H]$ gibt die Mengenzuordnung des Zeitfonds zu den Kapazitätsarten an:

¹⁾ So berücksichtigen z.B. Lee et al. (2007), S. 20 ff., in ihrem Network-design-Modell hybride Anlagen, die Güterhin- und -rückflüsse zu transformieren vermögen.

$$D_t = (CA \otimes CZ_t) \quad \forall t \quad (2.2'b)$$

Aufgrund des robustheitsorientierten Planungsverhaltens ist eine Überbuchung der Zeitfonds dabei nicht zulässig; Unterauslastung ist hingegen erlaubt.

Im Rahmen der *Kapazitätsanpassung* wird festgelegt, in welcher Periode t des Planungszeitraumes die einzelnen Potentialfaktoren h in welchem Umfang $F_t \in \mathbb{R}_0^{H+} [H \times 1]$ (Zeitfonds) verfügbar sind.

Die *Entscheidungsfragen* bzgl. der Zeitfonds werden durch die im Zeitablauf entwickelten (Des-) Investitionsentscheidungen über die Expansion $ce_t \in \mathbb{R}_0^{H+} [H \times 1]$ oder Kontraktion $ck_t \in \mathbb{R}_0^{H+} [H \times 1]$ des Potentialfaktorbestandes beantwortet. Zwischen der (Des-) Investitionsentscheidung und ihrer Umsetzung liegt eine unsichere Zeitspanne. Die Parameter $qe_{h,\hat{l}}$ und $qk_{h,\hat{l}}$ mit

$$\sum_{\hat{l}=1}^{\hat{l}} qe_{h,\hat{l}} = 1 \quad \text{und} \quad \sum_{\hat{l}=1}^{\hat{l}} qk_{h,\hat{l}} = 1 \quad \forall h \quad (2.12')$$

geben die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass die in einer Periode beschlossene Anpassung am Potentialfaktor h nach \hat{l} Perioden wirksam ist. Die Anpassung der Verfügbarkeit von Potentialfaktoren erfordert unabhängig von ihrem Ausmaß ce_t und ck_t Vorbereitungsmaßnahmen $YE_t \in \mathbb{R}_0^{H+}$ bzw. $YK_t \in \mathbb{R}_0^{H+}$.

Es ergeben sich folgende *Entscheidungsschranken* im Rahmen des Kapazitätsanpassungsmodells:

Die Kapazitätsnachfrage $(D_t)^{TR} * AD(K)$ (Additionsvektor $[1, \dots, 1]^{TR} \in \mathbb{R}^K$) aus dem Güterflussmodell wird durch die Zeitfonds beschränkt:

$$(D_t)^{TR} * AD(K) \leq F_t \quad \forall t \quad (2.28)$$

Der Zeitfonds eines Potentialfaktors in einer Periode ergibt sich aus dessen Zeitfonds in der Vorperiode und den in der aktuellen Periode realisierten Anpassungen. Er kann zu keinem Zeitpunkt negativ werden und wird aus Nachhaltigkeitsgründen nur innerhalb des Planungshorizonts aufrechterhalten. Bedingungen (2.13), (2.14) und (2.15) werden wie folgt ersetzt:

$$F_{h,t} = F_{h,t-1} + \sum_{\hat{l}=1}^{\hat{L}} \left(ce_{h,t-\hat{l}} \cdot qe_{h,\hat{l}} - ck_{h,t-\hat{l}} \cdot qk_{h,\hat{l}} \right) \quad \forall h, t - \hat{l} \geq 0 \quad (2.13')$$

$$F_t \geq 0 \quad \forall t = 0, \dots, T \quad (2.14')$$

$$F_t = 0 \quad \forall t > T \quad (2.15')$$

Liquidationserlöse werden in Höhe des Restwertes der abgebauten Kapazität erwartet. Bei der Berechnung werden die prognostizierten periodenbezogenen Absatzpreise $lk_{h,t}$ pro Kapazitätseinheit berücksichtigt:

$$LK_t = \sum_{i=1}^I \left(lk_{h,t} \cdot \sum_{\hat{l}=1}^{\hat{L}} \left(ck_{h,t-\hat{l}} \cdot qk_{h,\hat{l}} \right) \right) \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (2.23')$$

2.3.2 Berücksichtigung von Unsicherheit

Die Kapazitätsdimensionierung in CLSCs unterliegt im Zeitablauf unterschiedlichen gesetzlichen, ökologischen, ökonomischen, und sozialen Einflüssen, die interne und externe Unsicherheiten bedingen können. Je größer das Ausmaß dieser Einflüsse ist, umso unzuverlässiger sind Planungen, die von einer deterministischen Umweltsituation ausgehen. Eine weitere Maßnahme zur Erhöhung der Planungsrobustheit ist deshalb die Berücksichtigung bestehender Unsicherheiten in der Planung. Die bisherigen Grundmodelle können als deterministische Ersatzwertmodelle¹⁾ bezeichnet werden, in denen eine Abschätzung der unsicheren Parameter durch Prognosewerte (Erwartungswerte) erfolgt. Ansätze der stochastischen Optimierung ermöglichen darüber hinaus, durch eine unsicherheitsadäquate Festlegung der quantitativen Kapazität oberhalb des Erwartungswertes der Kapazitätsnachfrage, die Ausbreitung von Unsicherheit entlang der Wirkungskette von CLSC einzuschränken. In Unterunterabschnitt 2.3.2.1 werden relevante Annahmen zu einer unvollständigen Informationsbasis begründet. Darauf aufbauend, und mit Berücksichtigung des risikoaversen Entscheidungsverhaltens, ergeben sich Auswirkungen für die Auswahl geeigneter Ansätze der stochastischen Optimierung und deren Umsetzung. In Unterunterabschnitt

¹⁾ Vgl. z.B. Scholl (2001), S. 73 ff.; Winter (2011), S. 191.

2.3.2.2 wird der ausgewählte Ansatz des *zweistufigen Kompensationsmodells* auf das vorliegende Planungsproblem angewendet.

2.3.2.1 Annahmen

Im Folgenden wird von einem unvollständigen Informationsstand (Entscheidung unter Risiko) ausgegangen, der in der Planung Berücksichtigung finden soll. Im Rahmen der Kapazitätsdimensionierung ergibt sich der erforderliche Kapazitätsbedarf durch den Gebrauch der relevanten Kapazitätseinheiten, die zur Bewältigung des Produkt- und Rückflussgüterprogramms benötigt werden. Damit fällt der Prognose der perspektivischen Produktnachfrage und des Güterrückflusses eine große Bedeutung zu¹⁾, der im vorliegenden Ansatz durch eine integrierte Prognose Rechnung getragen wird. Aufgrund der möglichen Nachfrageschwankungen des Neuproduktes und der zeitlichen, mengenmäßigen und qualitativen Unsicherheiten bzgl. des Rückflusses steht die Vernetzung dieser beiden Größen im Folgenden im Fokus der Betrachtung. Die Relevanz der Prognose der beiden Größen wird durch die Rahmenbedingungen der unterschiedlichen Planungssituationen I-IV (u. U. vollständige Nachfrageerfüllung, vollständige Rücknahmebedingung) verstärkt. Aus diesem Grund werden zwei unsichere Parameter in die Modellierung aufgenommen, die Produktnachfrage \widetilde{ME}_t und die Rückflussmengen \widetilde{XR}_t . Bedingt durch ihre Vernetzung führen diese beiden Parameter zu einer Erhöhung der Planungskomplexität der Kapazitätsdimensionierung in CLSCs. Abhängig von der vorliegenden Planungssituation werden die Produktnachfrage und der Güterrückfluss entweder innerhalb oder außerhalb des Modells prognostiziert. Die Güterrückflussmengen sind durch eine funktionale Beziehung $g(\cdot)$ zwischen vergangenen und aktuellen Absatzmengen, Rückflussmengen und weiteren Einflussfaktoren beschrieben (siehe Nebenbedingung (2.3) des Güterflussmodells). Aufgrund der funktionalen Abhängigkeit von den Absatzmengen sind die Rückflussmengen keine Parameter im engsten Sinne, sondern eine von Entscheidungsvariablen und Umweltbedingungen abhängige Größe. Es

¹⁾ Vgl. Slack/Chambers/Johnston (2007), S. 325 ff. Die Autoren erklären die Wichtigkeit einer akkuraten Nachfrageprognose im Rahmen der Kapazitätsdimensionierung.

wird davon ausgegangen, dass deren funktionale Definition durch unsichere Parameter charakterisiert ist. Im Weiteren werden die Nachfrage und die Rückflussmengen als Zufallsvariablen bezeichnet, die verschiedene Realisationswerte je nach auftretender Umweltbedingung annehmen können. Die Rückflussmenge wird als diskret bezeichnet, weil die realisierten Mengen endlich sind. Die Rückflussmengen sind nämlich eine Teilmenge der bisherigen Absatzmengen. Die unsicheren Parameter werden in dem Vektor ξ_s zusammengefasst. Es wird angenommen, dass die unsicheren Parameter durch eine diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilung mit einer finiten Anzahl von Realisationswerten (Szenarien ($s = 1, \dots, S$)) hinreichend genau erfasst werden können. Für die zugehörigen Eintrittswahrscheinlichkeiten p_s gilt¹⁾:

$$p_s = P(\xi_s) \quad \forall s = 1, \dots, S$$

$$\text{mit } \sum_{s=1}^S p_s = 1 \text{ und } p_s \geq 0 \quad \forall s = 1, \dots, S$$

Daraus ergeben sich die folgenden szenarienabhängigen Zufallsvariablen:

- $(ME_{1,t}^s, \dots, ME_{j,t}^s)^{TR}$: Zufallsvariable der Absatzhöchstmengen für jede Güterart j in Periode t in Szenario s
- $(XR_{1,t}^s, \dots, XR_{j,t}^s)^{TR}$: Zufallsvariable der Güterrückflussmengen für jede Güterart j in Periode t in Szenario s

Ist die Datenbasis ausreichend, um Annahmen der unsicheren Parameter verschiedenen äquidistanten Zeitpunkten zuzuordnen, dann ist die Modellierung von Unsicherheiten mittels Szenarien eine sinnvolle Methode, um Abhängigkeiten zwischen Parametern im Zeitablauf zu identifizieren und darzustellen²⁾. Somit eignen sich diskrete Szenarien besser zur Abbildung von grundsätzlich langfristigen Entwicklungen als kontinuierliche Verteilungen. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Szenarios durch die Anzahl vorliegender Ausprägungen ermittelt wer-

¹⁾ Vgl. Di Domenica et al. (2007), S. 2204 ff.

²⁾ Vgl. Mukhopadhyay/Ma (2009), S. 5 ff. Die Autoren heben die Notwendigkeit einer Szenario-basierten Analyse in Remanufacturing-Systemen hervor.

den können. Bei kontinuierlichen Verteilungen werden die Wahrscheinlichkeiten unter Berücksichtigung statistischer Korrelationskonzepte bestimmt.¹⁾

Zur Generierung der Szenarien gelangen zwei generelle Verfahrensweisen zum Einsatz: die Generierung von Datentrajektorien auf Grundlage ausgewählter Modelle oder die Diskretisierung der Verteilungen durch Approximation statistischer Charakteristika (siehe Kapitel 3).

Aus Sichtweise der robusten Planung sind an die Generierung von Szenarien Anforderungen gestellt²⁾:

- *Berücksichtigung aller Einflussfaktoren:* Aufgrund der Risikoscheue müssen alle Einflussfaktoren und Risiken identifiziert und ihre Relevanz beurteilt werden. Bei der Szenariogenerierung wird angenommen, dass die Zufallsvariablen (unsichere Variablen) von zwei Faktoren bestimmt werden. Der erste Faktor ist die systematische Unsicherheit, die z.B. anhand von Zeitreihenanalysen und/oder Experten-erwartungen ein prognostizierbarer Faktor ist (z.B. Trend oder saisonale Schwankungen). Der zweite Faktor beschreibt unsystematische Unsicherheiten, die zufällige Schwankungen widerspiegeln.
- *Berücksichtigung einer beschränkten Anzahl von Szenarien:* Es sollen eindeutige Entwicklungen in den Szenarien erkennbar sein. Der Aufwand ein stochastisches Modell zu lösen, steigt mit der Anzahl der Perioden und Szenarien. Zur Erhöhung der Lösungsqualität und des Rechenaufwands empfiehlt sich eine Szenarioaggregation (Verdichtung der Informationen) bzw. Szenarioreduktion³⁾. Im ersten Fall können situationsabhängig verschiedene Methoden, wie Klassifikations- bzw. Clusterverfahren Anwendung finden⁴⁾. Ein einfaches Verfahren für die Szenarioreduktion ist, dass nur die Szenarien Berücksichtigung finden, die eine Mindesteintrittswahrscheinlichkeit aufweisen.
- *Anwendbarkeit der Szenariogenerierung:* Die Methode muss aus Sicht des Aufwandes (Informationsbeschaffung und Rechenaufwand) realisierbar sein. Die

¹⁾ Vgl. Scholl (2001), S. 206 f.

²⁾ Vgl. Kouvelis/Yu (1997), S. 344 ff.; Scholl (2001), S. 213 ff.

³⁾ Zu Überblicksdarstellungen vgl. Chun/Robinson (1995), S. 39 ff.; Kall/Wallace (1994), S. 129 ff.; Rockafellar/Wets (1991), S. 119 ff.

⁴⁾ Vgl. Ambrosi (1978), S. 79 ff.; Dupacova/Gröwe-Kuska/Römisch (2003), S. 493 ff.; Martino/Chen (1978), S. 61 ff.; Mißler-Behr (1993), S. 121 ff.; Opitz (1980), S. 65 ff.; Rockafellar/Wets (1991), S. 119 ff.

Aufstellung sowie die Auswirkungen müssen für den Entscheidungsträger dabei transparent sein.

Im Folgenden wird angenommen, dass Informationen über die unsicheren Parameter als Szenarien darstellbar sind. Das bedeutet, dass ausreichend verfügbare Vergangenheitsdaten vorhanden sind oder hinreichend genaue Einschätzungen aufgrund Expertenwissen und/oder ähnlichen Produkten möglich sind. Die Modelle der stochastischen¹⁾ und robusten²⁾ Optimierung bieten die Möglichkeit unsichere Umweltzustände anhand von Szenarien in der Entscheidungsfindung zu berücksichtigen³⁾. Die Analyse der Ansätze zeigt, dass die robuste Optimierung keine grundsätzlich neue Planungskonzeption ist. Vielmehr werden spezielle Anforderungen an die Planung gestellt, die sich in zu erfüllenden Robustheitskriterien (Optimalitäts- und/oder Zuverlässigkeitsrobustheit) widerspiegeln⁴⁾.

Im Hinblick auf die Planungsrobustheit und das risikoaverse Planungsverhalten steht mit dem stochastischen *Kompensationsmodell*⁵⁾ eine geeignete Modellierungstechnik zur Verfügung⁶⁾. Das Modell setzt an einer zweistufigen Modellstruktur an: Die Planungsrobustheit kann durch die Festlegung der Variablen, die szenariounabhängig („first-stage“) oder -abhängig („second-stage“) sind, beeinflusst werden, wobei eine

¹⁾ Ansätze der stochastischen Optimierung sind der Chance-Constrained-Ansatz, das Fat-Solution-Modell (Spezialfall des Chance-Constrained-Ansatzes) und das Kompensationsmodell. Für Erläuterungen dieser Ansätze siehe Birge/Louveaux (2003), S. 103 ff.; Charnes/Cooper (1959), S. 73 ff.; Kall/Wallace (1994), S. 8 f. und S. 41 ff.; Ruszczyński/Shapiro (2003), S. 1 ff.; Sahinidis (2004), S. 974.; Scholl (2011), S. 73 ff.

²⁾ Die zwei grundlegenden verschiedenen Modellierungsansätze der robusten Optimierung sind von Mulvey et al. und von Kouvelis et al. Siehe für detaillierte Erläuterungen: Beyer/Sendhoff (2007), S. 3199 f.; Kouvelis/Kurawarwala/Gutiérrez (1992), S. 287 ff. Kouvelis/Yu (1997), S. 1 ff.; Malcolm/Zenios (1994), S. 1041 ff.; Mulvey/Vanderbei/Zenios (1995), S. 264 ff., Sahinidis (2004), S. 973; Scholl (2001), S. 174 ff.

³⁾ Vgl. Zeballos/Méndez/Barbosa-Povoa (2016), S. 6236, die von einer Unvermeidbarkeit der Anwendung von „Stochastic Programming“-Ansätzen bei dem Design und der Planung von CLSCs reden.

⁴⁾ Vgl. Kouvelis/Yu (1997), S. 11 f.

⁵⁾ Vgl. z.B. Birge/Louveaux (2011), S. 59 ff.; Klein/Scholl (2011), S. 186 f.; Ruszczyński/Shapiro (2003), S. 12; Sahinidis (2004), S. 972.

⁶⁾ Der Ansatz des Chance-Constrained-Modells wird aus robustheitsbegründeter Sicht nicht weiter verfolgt, weil in diesem Ansatz keine Handlungsalternativen berücksichtigt werden, mit denen auf Verletzungen von Nebenbedingungen bzw. auf unsichere Umweltzustände reagiert werden kann. Vgl. Scholl (2001), S. 205 ff.

Erhöhung der Anzahl der „first-stage“-Variablen die Planungsrobustheit tendenziell erhöht. Durch die Modellierung von Kompensationsmaßnahmen („second-stage“-Variablen) wird die Realisierbarkeit des Planes miteinbezogen. Eine Erhöhung der „first-stage“-Variablen kann aber nur geschehen, wenn sicher ist, dass operative Maßnahmen bzw. Handlungsmöglichkeiten bestehen, die alle als möglichst erachteten zukünftigen Ereignisse der Realisationen der Zufallsvariablen in der Realität kompensieren. Ansonsten ist die Durchführbarkeit des Planes gefährdet. Durch die Festlegung des Zielkriteriums z.B. der Erwartung oder des (μ, σ) -Kriteriums kann die Planungsrobustheit gefördert werden, indem alle im Modell möglichen Umweltzustände berücksichtigt werden.

2.3.2.2 Zweistufiges Kompensationsmodell

Die Aufgabe des Kompensationsmodells besteht darin, operative Eventualpläne für unterschiedliche mögliche Umweltsituationen (dargestellt durch die Szenarien $s=1, \dots, S$) unter der Annahme von festen Kapazitätsentscheidungen zu ermitteln. Aufgrund der bereits vorliegenden Einteilung der Entscheidungsvariablen in taktische und operative Variablen sowie der Strukturierung des Modells in ein Güter- und Kapazitätsanpassungsmodell, können die taktischen (operativen) Entscheidungsvariablen unmittelbar als szenariounabhängige (szenarioabhängige) Variablen modelliert werden.

Die Aufgabe des *Güterflussmodells* ist es, die Kompensationsmaßnahmen bezüglich der zu realisierenden Kapazitätsentscheidungen auf taktischer Ebene zu ermitteln. Es wird von einer vollständigen Kompensation ausgegangen. Das heißt, dass alle Verletzungen von Nebenbedingungen durch die gegebenen Handlungsalternativen (Beschaffung, Transformation, Lagerung, Sammlung und Entsorgung) aufgefangen werden. Die Informationsbasis ändert sich nicht. Der unvollständigen Informationsbasis wird durch die Modellierung möglicher Realisationen der Zufallsvariablen als Szenarien im Kompensationsmodell Rechnung getragen.

Die im Grundmodell formulierte Entscheidungsfrage des Güterflussmodells wird durch die operativen szenarioabhängigen Transformationsentscheidungen Prozessniveau $\tau_t^s \in \mathbb{R}_0^{I+} [I \times 1]$, Beschaffungsmengen $XI_t^s \in \mathbb{R}_0^{J+} [J \times 1]$, Lagerbestandsverän-

derungen $\mathbf{X}\mathbf{L}_t^s$, Absatzmengen $\mathbf{X}\mathbf{E}_t^s$ und Rücknahmemengen $\mathbf{X}\mathbf{N}_t^s$ beantwortet. Diese werden als „*second-stage*“-Variablen modelliert, denen nach dem Eintreten von unsicheren Ereignissen Werte zugewiesen werden. Damit ist es möglich, nachträglich im Kapazitätsanpassungsmodell z.B. durch Schwankungen der Nachfrage- oder Rückflussmengen eingetretene Restriktionsverletzungen zu kompensieren.

Durch diese Umformulierung der Entscheidungsvariablen ändern sich die Restriktionen des Güterflussmodells (2.2)-(2.11) ebenfalls in szenarioabhängige Nebenbedingungen, wodurch sich die Anzahl der einzelnen Restriktionen um die Anzahl der Szenarien erhöht. Zudem werden Parameter, die sich durch die Definition der Entscheidungsvariablen ergeben, ebenfalls szenarioabhängig. Dies gilt für den Güterflussvektor $\mathbf{X}\mathbf{F}_t^s \in \mathbb{R}^J [J \times 1]$ des gesamten Transformationssystems in Periode t

$$\mathbf{U} * \boldsymbol{\tau}_t^s = \mathbf{X}\mathbf{F}_t^s \quad \forall s, t \quad (2.1')$$

und den Lagerbestand

$$\mathbf{L}_{t-1}^s + \mathbf{X}\mathbf{L}_{t-1}^s = \mathbf{L}_t^s \quad \forall s, t \quad (2.8')$$

Das komplette Ausmaß der unsicheren Absatzhöchstmenge und Rückflussmenge ist an den laufenden und unsicheren Einzahlungsüberschüssen G_t^s erkennbar. Die Einzahlungsüberschüsse G_t^s ergeben sich aus der Bewertung der Beschaffungs-, Rückfluss-, Transformations-, Lagerungs- und Absatzmengen mit den entsprechenden Preisen:

$$G_t^s = -\mathbf{P}\mathbf{I} * \mathbf{X}\mathbf{I}_t^s - \mathbf{P}\mathbf{R} * \mathbf{X}\mathbf{N}_t^s - \mathbf{P}\mathbf{T} * \boldsymbol{\tau}_t^s - \mathbf{P}\mathbf{L} * \mathbf{L}_t^s + \mathbf{P}\mathbf{E} * \mathbf{X}\mathbf{E}_t^s \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (2.11')$$

Im *Kapazitätsanpassungsmodell* wird der zu realisierende Kapazitätsplan unter Berücksichtigung der Unsicherheiten ermittelt. Die taktischen Entscheidungen $\mathbf{c}\mathbf{e}_t$ und $\mathbf{c}\mathbf{k}_t$ werden durch „*first-stage*“-Variablen erfasst, deren Werte vor der Realisation der unsicheren Parameter zu bestimmen sind. Für die Beschränkungen des Kapazitätsanpassungsmodells ergeben sich dabei zwei Änderungen. Bedingt durch die unsicheren Werte der Absatzhöchstmenge und der Rückflussmenge sind die laufenden Einzahlungsüberschüsse G_t^s unsicher. Das Finanzierungsgleichgewicht ergibt sich zu:

$$-I_t + G_t^S + LK_t \geq W \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (2.24')$$

Auf dieser Grundlage wird das Ziel der Maximierung des erwarteten Barwertes entscheidungsrelevanter Zahlungen im Kapazitätsanpassungsmodell formuliert. Die unsicheren Einzahlungsüberschüsse werden für eine repräsentative Stichprobe von S Szenarien erfasst, die sich im Hinblick auf die Realisationswerte von Absatzhöchstmenge und Rückflussmenge unterscheiden und mit den Eintrittswahrscheinlichkeiten p_s verbunden sind. Unter Berücksichtigung des Diskontierungsfaktors f lautet die Zielfunktion Z dann:

$$Z = \max \sum_{t=1}^T \left(-I_t + LK_t + \sum_{s=1}^S (p_s \cdot G_t^s) \right) \cdot f^{-t} - I_0 \quad (2.25')$$

2.3.3 Berücksichtigung sukzessiver Informationszugänge

Im Rahmen der Kapazitätsdimensionierung werden Des- bzw. Investitionsentscheidungen in einem mittelfristigen Planungshorizont getroffen. Aufgrund des Planungsverhaltens sowie der Auswirkungen der taktischen Ausstattungsentscheidungen der Kapazitätsdimensionierung auf das Absatz- und Rückflussgüterprogramm bestehen zeitlich-vertikale Interdependenzen. Die Informationen (Prognosen) werden mit zunehmender Planreichweite immer unsicherer und unzuverlässiger¹⁾, so dass vorhandene Prognosen vielleicht überarbeitet oder aktualisiert werden müssen²⁾. Somit wird versucht, die Prognosegüte durch Aktualisierung der Informationen zu verbessern, damit Fehleinschätzungen bzw. Prognosefehler frühzeitig korrigiert werden können³⁾. Zudem kann es sein, dass sogar das Ende des Gesamtplanungszeitraumes T nicht absehbar ist. Auch in diesen Fällen ist es hilfreich den Planungshorizont künstlich zu schließen. Zum einen sind Umweltzustände mit langem Abstand zum Planungszeitpunkt mit höherer Unsicherheit behaftet und der Planungshorizont sollte die Perioden umfassen, in denen die Zustände ausreichend prognostizierbar sind und zum anderen

¹⁾ Vgl. Chand/Hsu/Sethi (2002), S. 25.

²⁾ Vgl. Sethi/Sorger (1991), S. 387 und 389.

³⁾ Vgl. Steven (1994), S. 55 ff.

sind Informationen über die Zukunft nur in begrenztem Maß vorhanden¹⁾. Im Rahmen der Kapazitätsdimensionierung besteht aufgrund der Tragweite der Entscheidungen den Planungshorizont dem (prognostizierten) erweiterten Lebenszyklus der Produkte anzupassen. Mit einem „langen“ Planungshorizont ist es möglich, die zeitlichen Interdependenzen zwischen originären Produkten und den Güterrückflüssen in der Entscheidungsfindung zu berücksichtigen. Dadurch wird eine höhere Entscheidungssicherheit gewährleistet²⁾. Aus diesem Grund besteht die Notwendigkeit die im Zeitablauf (unerwartet) auftretenden Veränderungen bzgl. der unsicheren Umweltsituationen mit Hilfe eines Planungsinstruments in der Planung zu berücksichtigen. Ein häufig in der Praxis angewendetes Mittel ist die *rollierende Planung*³⁾. Eine rollierende Planung ist dadurch charakterisiert, dass die Entscheidungen der ersten A Perioden (Planungsperiode n) eines definierten Planungshorizontes verbindlich festgelegt werden. Alle übrigen Entscheidungen bis zum Ende des Planungshorizonts haben einen vorläufigen Charakter. Nach einer fest definierten Anzahl von Perioden (Planabstand), wird neu geplant und der Planungshorizont um die Anzahl der Perioden verschoben⁴⁾ (siehe Abbildung 2.3). In der Abbildung gilt $T_1 < T$. Die Länge des Planungshorizontes kann nach jeder Planungsstufe geändert werden.

¹⁾ Vgl. Baker (1977), S. 19 f.

²⁾ Vgl. Steven (1994), S. 57.

³⁾ Vgl. Heisig/Fleischmann (2001), S. 25 f.

⁴⁾ Vgl. Chand/Hsu/Sethi (2002), S. 27; Stadler (1988), S. 56 ff.

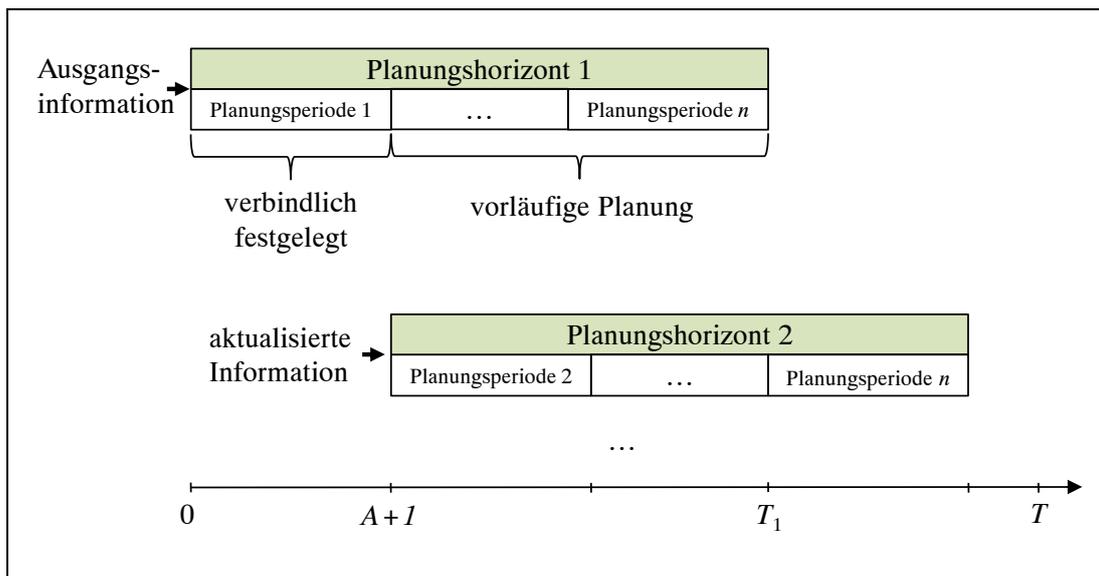


Abbildung 2.3: Rollierende Planung

Das Konzept der rollierenden Planung wird im Folgenden auf das vorliegende Planungsproblem angewendet und modifiziert: Aus Gründen der Nachhaltigkeit wird für die Planung das Entscheidungsfeld künstlich geschlossen ($T < \infty$). Da es sich bei den Kapazitätsanpassungen um taktische Entscheidungen handelt und die mittelfristigen Entwicklungen des Neuproduktes relevant für die Entscheidungen im Rahmen der Investitionsplanung sind, ist es relevant den Gesamtplanungszeitraum auf jeder Stufe in Betracht zu setzen. Der Gesamtplanungszeitraum ist von der jeweiligen Planungssituation der Unternehmung abhängig. Bei Gewährleistung der vollständigen Produktrücknahme (Planungssituation I bzw. II) kann der Planungszeitraum die Länge des erweiterten Produktlebenszyklus umfassen. Unternehmungen können diese erweiterte Planung umgehen, indem sie den Rücknahme- und/oder Verwertungsprozess an unabhängige Dritte ausgliedern. Das bedeutet, dass bis zum Ende des Gesamtplanungszeitraums und nicht für einen vordefinierten Planungshorizont geplant wird. Die rollierende Planung unterliegt folgenden Bedingungen: Die Anzahl der durchzuführenden Planungsschritte \widehat{PS} ergibt sich für den Gesamtplanungshorizont T bei einem Planabstand A zu $\widehat{PS} = T/A$.

Dabei gilt, dass die taktischen Entscheidungen der Kapazitätsanpassung für die Planungsperiode von A Perioden umzusetzen sind und die restlichen Werte als vorläufige

fige Werte angesehen werden, die für die Zukunft eine grobe Orientierung geben (siehe Abbildung 2.4).

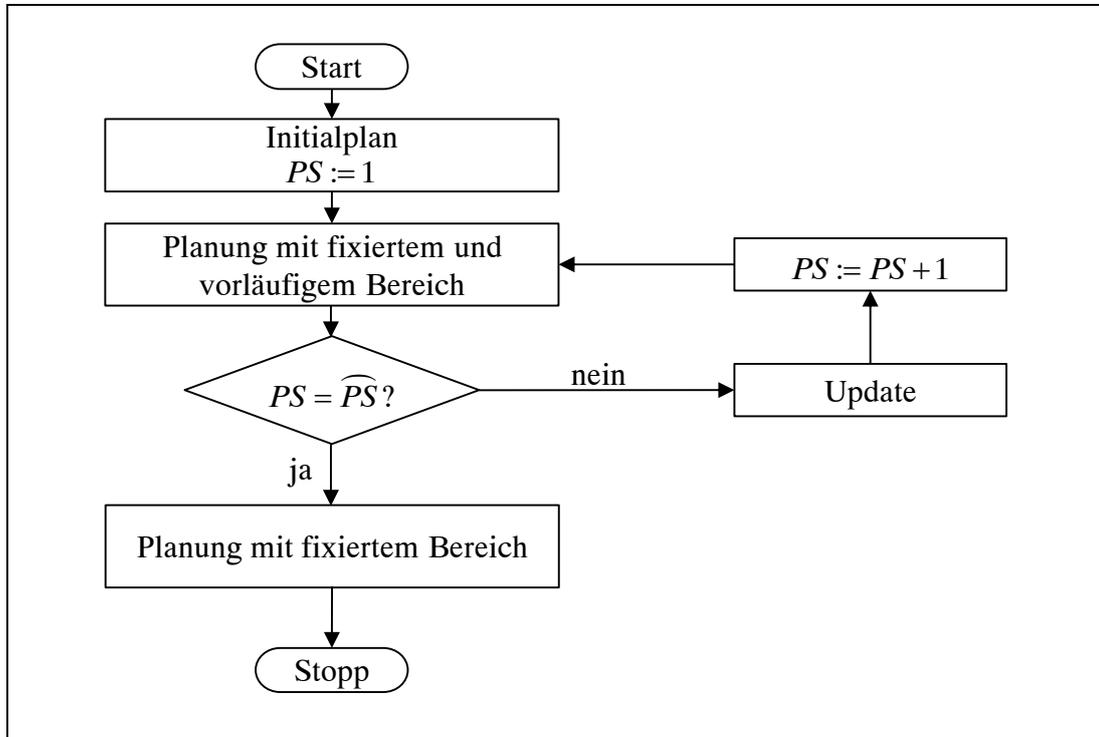


Abbildung 2.4: Planungsablauf

Der Initialplan (Planungsschritt $PS = 1$) wird nach dem Planabstand von A Perioden mit den in der Zwischenzeit realisierten Daten geupdatet (siehe Abbildung 2.4). Daraufhin wird im nächsten Planungsschritt ein neuer Plan mit fixiertem und vorläufigem Bereich erstellt. Damit verkürzt sich die Länge des aktuellen Planungshorizontes in jedem Schritt PS ($\forall PS = 2, \dots, \widehat{PS}$) um A Perioden. Die Reichweite des Planes in Planungsschritt PS beträgt also $T - ((PS - 1) \cdot A)$ Perioden und der Planungshorizont verläuft von Periode $((PS - 1) \cdot A + 1)$ bis Periode T . Nach Ablauf der A Perioden beginnt der nächste Schritt. Die Planungsschritte werden solange durchgeführt bis der letzte aufgestellte Plan die Länge von A Perioden hat bzw. der letzte Planungsschritt beginnt ($PS = \widehat{PS}$).

Unter der Berücksichtigung der Kapazitätspläne aus der taktischen Planung, die als Vorgabe dienen, sind in der operativen Planung bei aktueller Umweltsituation operative Anpassungsentscheidungen zu treffen (siehe Abbildung 2.5).

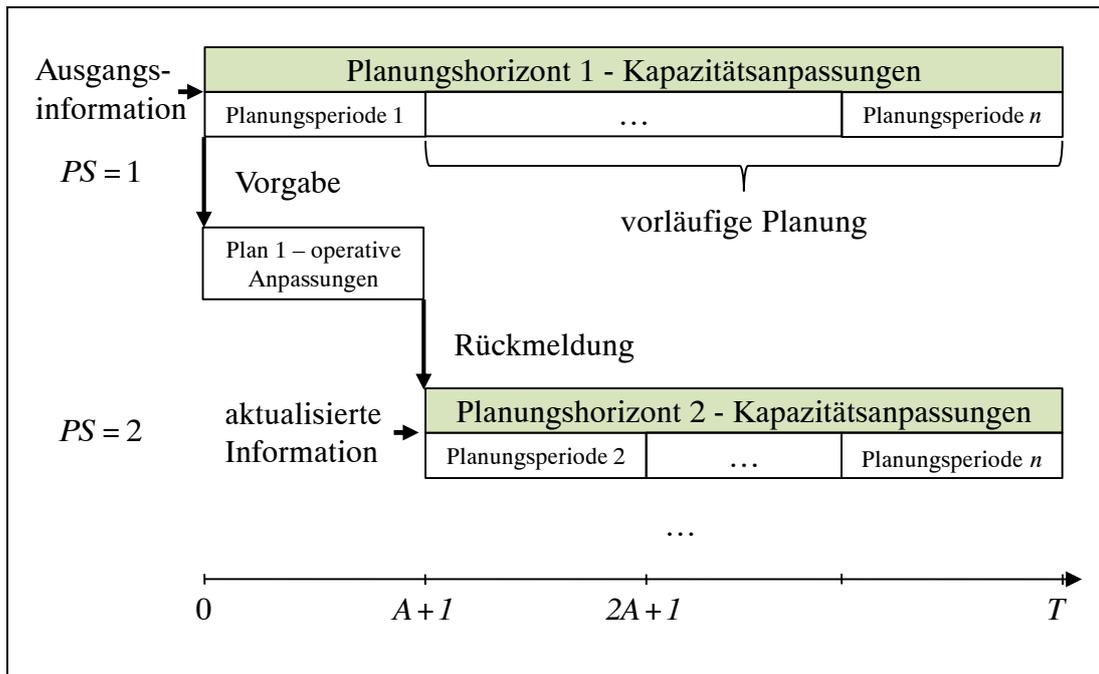


Abbildung 2.5: Rollierende Kapazitätsdimensionierung

Für den weiteren Planungsablauf bedeutet dies, dass im nächsten Planungsschritt die realisierten Entscheidungen und Umweltzustände als Informationsgrundlage dienen. Insbesondere wird bei der Bestimmung der möglichen Realisationen der unsicheren Parameter ξ_s (unsichere Nachfrage- und Güterrückflussmengen) die Informationsbasis im Planungsablauf unter Einbeziehung der realisierten und neuen zukünftigen Erwartungen aktualisiert. Die unsicheren Absatzhöchstmengen für den nächsten Planungsschritt ergeben sich aus der Relation von der realisierten Nachfrage $\bar{N}_{t'}$ ($\forall t' = 1, \dots, (PS-1) \cdot A$) und zukünftigen Erwartungen der unsicheren Nachfrage \tilde{N}_t^s ($\forall t = (PS-1) \cdot A + 1, \dots, T$):

$$ME_t^s = g'(\bar{N}_{t'}, \tilde{N}_t^s) \quad \forall s, t = (PS-1) \cdot A + 1, \dots, T \quad (2.29)$$

Auch bei der Bildung der unsicheren Parameter der Güterrückflussmengen fließen die realisierten Werte und zukünftigen Erwartungen über Absatzmengen, Rückflussmengen und andere Einflussgrößen mit ein:

$$\mathbf{XR}_t^s = g\left(\overline{\mathbf{XE}}_t^s, \overline{\mathbf{YN}}_t^s, \overline{\mathbf{XR}}_t^s, \widetilde{\mathbf{XE}}_t^s, \widetilde{\mathbf{YN}}_t^s, \widetilde{\mathbf{XR}}_t^s\right) \quad \forall s, t = (PS-1) \cdot A + 1, \dots, T \quad (2.30)$$

2.4 Zusammenführung der Erweiterungen

Durch die Zusammenführung der bisherigen Überlegungen lässt sich ein zwei-stufiges Kompensationsmodell formulieren, das operative Eventualpläne für verschiedene Umweltsituationen (dargestellt durch Szenarien) bestimmt, um fixierte Kapazitätspläne (charakterisiert durch quantitative und qualitative Eigenschaften) unter der Berücksichtigung von möglichen Restriktionsverletzungen zu realisieren.

Im *Güterflussmodell* werden die operativen Kompensationsmaßnahmen ($\mathbf{XE}_t^s, \mathbf{XI}_t^s, \mathbf{XJ}_t^s \in \mathbb{R}_0^{J+}$ und $\boldsymbol{\tau}_t^s \in \mathbb{R}_0^{I+}$) unter der Berücksichtigung einer unsicheren Informationsbasis ($\mathbf{ME}_t^s, \mathbf{XR}_t^s \in \mathbb{R}_0^{J+}$) ermittelt.

Mit der Definition des Güterflussvektors

$$\mathbf{U} * \boldsymbol{\tau}_t^s = \mathbf{XF}_t^s \quad \forall s, t \quad (2.1')$$

gelten die folgenden für die Kapazitätsnutzung relevanten szenarioabhängigen *Entscheidungs-schranken*:

- Allokation der Nachfrage:

$$\mathbf{D}_t^s = (\mathbf{CA} \otimes \mathbf{CZ}_t^s) \quad \forall s, t \quad (2.2'a')$$

- Kapazitätsnachfrage:

$$\boldsymbol{\kappa} * \boldsymbol{\tau}_t^s \leq \mathbf{D}_t^s * \mathbf{AD}(H) \quad \forall s, t \quad (2.2'b')$$

- Rücknahmebedingung:

$$\mathbf{XN}_t^s \leq \mathbf{XR}_t^s \quad \forall s, t \quad (2.4'a')$$

$$\mathbf{XR}_t^s = g\left(\mathbf{XE}_{t-l}^s, \mathbf{YN}_{t-l}^s, \mathbf{XR}_{t-l'}^s; l = 0, \dots, L; l' = 1, \dots, L'\right) \quad \forall s, t - 1 > 0 \quad (2.3')$$

- Absatz:

$$\mathbf{XE}_t^s \leq \mathbf{ME}_t^s \quad \forall s, t \quad (2.5'a')$$

- Beschaffung:

$$\mathbf{XI}_t^s \leq \mathbf{MI}_t \quad \forall s, t \quad (2.7')$$

- Lagerbestand:

$$\mathbf{L}_{t-1}^s + \mathbf{XL}_{t-1}^s = \mathbf{L}_t^s \quad \forall s, t \quad (2.8')$$

- Nachhaltigkeit:

$$\mathbf{L}_t^s = 0 \quad \forall s, t > T \quad (2.9')$$

- Mengenbilanz:

$$\mathbf{XF}_t^s + \mathbf{XN}_t^s + \mathbf{XI}_t^s + \mathbf{L}_{t-1}^s = \mathbf{XE}_t^s + \mathbf{L}_t^s \quad \forall s, t \quad (2.10')$$

Die erwarteten Einzahlungsüberschüsse G_t^s werden durch verschiedene Transformationsentscheidungen und deren Bewertung determiniert.

$$G_t^s = \mathbf{PE} * \mathbf{XE}_t^s - \mathbf{PI} * \mathbf{XI}_t^s - \mathbf{PR} * \mathbf{XN}_t^s - \mathbf{PT} * \tau_t^s - \mathbf{PL} * \mathbf{L}_t^s \quad \forall s, t \quad (2.11')$$

Die Zusammenführung hat für das *Kapazitätsanpassungsmodell* wenige Veränderungen zur Folge. Die Kapazitätspläne werden durch Entscheidungen bzgl. Expansion ($\mathbf{ce}_t \in \mathbb{R}_0^{H+}$, $\mathbf{ye}_{h,t} \in \{0,1\}$) und Kontraktion ($\mathbf{ck}_t \in \mathbb{R}_0^{H+}$, $\mathbf{yk}_{h,t} \in \{0,1\}$) unter der Berücksichtigung der unsicheren Nachfrage \mathbf{D}_t^s aus dem Güterflussmodell bestimmt. Durch die Schaffung von zusätzlichen Handlungsoptionen auf taktischer Ebene ergeben sich folgende Entscheidungsschranken:

- Kapazitätsnachfrage pro Ressource:

$$(\mathbf{D}_t^s)^T \cdot \mathbf{AD}(K) \leq \mathbf{F}_t \quad \forall s, t \quad (2.28')$$

- Kapazitätsanpassung:

$$\mathbf{F}_{h,t} = \mathbf{F}_{h,t-1} + \sum_{\hat{t}=1}^{\hat{L}} (\mathbf{ce}_{h,t-\hat{t}} \cdot \mathbf{qe}_{h,\hat{t}} - \mathbf{ck}_{h,t-\hat{t}} \cdot \mathbf{qk}_{h,\hat{t}}) \quad \forall h, t - \hat{t} \geq 0 \quad (2.13')$$

$$\mathbf{F}_t \geq 0 \quad \forall t \quad (2.14')$$

$$ce_t \leq M \cdot YE_t \quad \forall t = 0, \dots, T \quad (2.17')$$

$$ck_t \leq M \cdot YK_t \quad \forall t = 0, \dots, T \quad (2.18')$$

- Nachhaltigkeit:

$$F_t = 0 \quad \forall t > T \quad (2.15')$$

- Finanzierungsgleichgewicht:

$$-I_t + G_t^s + LK_t \geq W \quad \forall s, t \quad (2.24')$$

Die unsichere Nachfrage D_t^s bewirkt unsichere Einzahlungsüberschüsse G_t^s , so dass die Zielfunktion unter Berücksichtigung der Maximierung des Barwertes wie folgt transformiert wird:

$$\max \sum_{t=1}^T \left(-I_t + LK_t + \sum_{s=1}^S (p_s \cdot G_t^s) \right) \cdot f^{-t} - I_0 \quad (2.25')$$

Die Investitionsauszahlungen und Liquidationserlöse werden dabei wie folgt ermittelt:

$$I_t = IE * YE_t + IK * YK_t + ie * ce_t + ik * ck_t \quad \forall t = 0, \dots, T \quad (2.19')$$

$$LK_t = \sum_{h=1}^H \left(lk_{h,t} \cdot \sum_{l=1}^L (ck_{h,t-l} \cdot qk_{h,l}) \right) \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (2.23')$$

2.5 Robustheitsmessung

Aufgrund des risikoaversen Planungsverhaltens der Unternehmung besteht eines der Ziele darin, dass Veränderungen der Pläne nur einen geringen Einfluss auf das Planungsziel haben. Um die negativen Zielauswirkungen der Planungsunsicherheiten (Nachfrage- und Rückflussunsicherheit) zu reduzieren, wurden Maßnahmen zur Generierung von Robustheit in den Planungsansatz integriert. Im Folgenden werden Indikatoren vorgestellt, die ermöglichen, die Eignung des Planungsansatzes zu prüfen, sowie das Ausmaß der Wirkungen der einzelnen Maßnahmen, wie Berücksichtigung der Unsicherheit und Möglichkeit der Investition in qualitative Kapazität von Potentialfaktoren, auf die Kapazitätspläne (Planungsrobustheit) und auf das monetäre Ziel (Ergebnisrobustheit), zu messen.

Der Begriff der *Planungsrobustheit*¹⁾ beschreibt die Situation, dass sich vorläufige Pläne in einem rollierenden Planungshorizont nach Eintreffen von neuen Informationen nur in geringem Ausmaß ändern²⁾. Dabei werden die Entscheidungen in einem definierten Planabstand (von z.B. A Perioden) als realisierbar (nicht mehr veränderbar bzw. fixiert) angesehen, die restlichen Entscheidungen haben hingegen vorläufigen Charakter. Ein Plan wird als *vollkommen (total) robust* bezeichnet, wenn er sich im Planungszeitraum bei Berücksichtigung neuer Informationen nicht ändert³⁾. Pläne werden als *relativ planungsrobust* bezeichnet, wenn das Ausmaß, ihre Erforderlichkeit und die Auswirkungen auf das Ergebnis gering sind⁴⁾.

In dem zugrunde liegenden Modell der Kapazitätsdimensionierung geht es darum, die Planänderungen bzgl. der Kapazitätsentscheidungen zu reduzieren. Schon im deterministischen Grundmodell wird durch die Berücksichtigung von variablen und fixen Kapazitätsauf- und -abbaukosten ein Ansatz aufgezeigt, um die Kapazitätsentscheidungen in der Zielerreichung miteinzubeziehen und eine optimale Abstimmung zwischen Kapazitätsangebot und -bedarf zu erzielen. Weitere Maßnahmen werden in den Erweiterungen der Grundmodelle zur Ermöglichung zusätzlicher Handlungsmöglichkeiten und dem Aufbau von zeitlichen und mengenmäßigen Puffern aufgezeigt. Im Rahmen der Kapazitätsdimensionierung wirken sich Änderungen der Pläne unmittelbar auf die Höhe der Des- bzw. Investitionsentscheidungen in den Vorbereitungsmaßnahmen der Potentialfaktoren aus. Sollten Änderungen an den vorläufigen Plänen vorgenommen werden, deutet dies auf Prognosefehler in der bisherigen Planung hin. Solche Fehleinschätzungen bzgl. der Kapazitätspläne können im vorliegenden Planungsproblem zu erhöhten operativen Anpassungen führen, wie z.B. zu erhöhten Beschaffungs-, Lagerungs-, Sammlungs- und Entsorgungsmengen und entgangenen Erlösen durch fehlende Absatzmengen. Aufgrund der verschiedenen Pla-

¹⁾ In der Literatur besteht keine einheitliche Definition von Planungsrobustheit. Synonyme Ausdrücke sind z.B. Planungsstabilität und Systemnervosität. Siehe dazu z.B. vgl. Heising/Fleischmann (2001), S. 25 ff.; Inderfurth/Jensen (1997), S. 817 ff.

²⁾ Vgl. Sridharan/Berry/Udayabhanu (1988), S. 149 f.

³⁾ Vgl. Sridharan/Berry/Udayabhanu (1988), S. 149.

⁴⁾ Vgl. Scholl (2001), S. 109.

nungssituationen, die durch unterschiedlich starke Rahmenbedingungen geprägt sind, können fehleingeschätzte Umweltbedingungen eine unterschiedliche Notwendigkeit und damit Bewertung der Planveränderungen bewirken. Während bei zu erfüllender vollständiger Nachfrage- und/oder Rücknahmebedingung Änderungen der Pläne aufgrund von unerwartender Umweltbedingungen Zusatzkosten bewirken können, können in den anderen Planungssituationen Planveränderungen aus ökonomischer Sicht vorteilhaft sein.

Die Planungsrobustheit des vorliegenden Problems kann anhand von in der Literatur erwähnten Instrumenten gemessen werden. Als geeignete Methode bieten sich Robustheitsmaße an, bei denen die Planabweichungen je Planungsschritt ermittelt werden¹⁾. Damit stehen die mengenmäßigen Anpassungen im Mittelpunkt der Betrachtung. Als Messgrundlage werden die Kapazitätspläne, gemessen an den Kapazitätsentscheidungen zu Expansion $ce_{h,t}^{PS}$ und Kontraktion $ck_{h,t}^{PS}$ der Potentialfaktoren h in jedem Planungsschritt PS herangezogen. Das Robustheitsmaß ist auf das zugrunde gelegte Planungsproblem innerhalb eines rollierenden Planungshorizonts ausgelegt. Der Kapazitätsplan in Planungsschritt PS ist durch die Differenz aus Expansions- und Kontraktionsanpassungsentscheidungen determiniert:

$$KA_{h,t}^{PS} = ce_{h,t}^{PS} - ck_{h,t}^{PS} \quad \forall PS, h, t \quad (2.31)$$

Die Änderung des Kapazitätsplans zu einem Potentialfaktor h ergibt sich zwischen Planungsschritt $PS-1$ und PS als gewichtete absolute Differenz KD_h^{PS} der verfügbaren Zeitfonds mit den Planwerten des vorherigen Planschritts²⁾:

$$KD_h^{PS} = \sum_{t=1+(PS-1) \cdot A}^T (|KA_{h,t}^{PS-1} - KA_{h,t}^{PS}| \cdot \omega_t) \quad \forall PS > 2, h \quad (2.32)$$

mit

$$\omega_t = \frac{1}{t - (PS - 1) \cdot A} \quad (2.33)$$

¹⁾ Vgl. Kimms (1998), S. 359.

²⁾ Zu diesen und den weiteren Ausführungen vgl. Kimms (1998), S. 359 ff.

A Anzahl der fixierten Entscheidungen in jedem Planungsschritt, Planabstand

PS betrachteter Planungsschritt, $PS = 1, \dots, \widehat{PS} = T / A$

h Potentialfaktor

t betrachtete Periode

ω_t Gewichtungsfaktor für Planabweichungen in Periode t

Mit dem Gewichtungsfaktor wird Planänderungen, die nah am Planungszeitpunkt liegen, eine höhere Bedeutung zugesprochen, als Entscheidungen, die weiter in der Zukunft liegen¹⁾.

Die durchschnittliche Robustheit RM_h zum Plan eines Potentialfaktors für den Gesamtplanungszeitraum T und für alle Messschritte $\widehat{PS} - 1$ ergibt sich damit durch folgenden Indikator:

$$RM_h = \left(\frac{\sum_{PS=2}^{\widehat{PS}} \frac{\sum_{t=1+(PS-1) \cdot A}^T (|KA_{h,t}^{PS-1} - KA_{h,t}^{PS}| \cdot \omega_t)}{\max \left(\sum_{t=1+(PS-1) \cdot A}^T \omega_t \cdot |KA_{h,t}^{PS-1}|, 1 \right)}}{\widehat{PS} - 1} \right) \times \frac{1}{\widehat{PS} - 1} \quad \forall h \quad (2.34)$$

Dabei werden in jedem Planungsschritt die gewichteten Planabweichungen mit der Gesamtmenge aller Anpassungsentscheidungen des vorherigen Schrittes in Bezug gesetzt bzw. normiert.

Je niedriger die Werte der oben beschriebenen Indikatoren sind, umso robuster ist die Planung.

Um das Ausmaß der einzelnen Maßnahmen auf die Planungsrobustheit ermitteln zu können, ist die Anwendung von Sensitivitätsanalysen notwendig.

Anhand der *Ergebnisrobustheit* kann ermittelt werden, welche Auswirkungen die Berücksichtigung von unsystematischen Unsicherheiten auf den realisierten Barwert haben. Eine mehrfache Durchführung des Experimentes ($ep = 1, \dots, EP$) ist notwen-

¹⁾ Vgl. Chand/Hsu/Sethi (2002), S. 25.

dig, um die Ergebnisrobustheit zu messen. Dabei sind der Mittelwert ZM der realisierten Barwerte Z_{ep}

$$ZM = \sum_{ep=1}^{EP} Z_{ep} / EP \quad (2.35)$$

die Standardabweichung

$$\sigma = \sqrt{V(\mathbf{Z})} \quad (2.36)$$

und der Variationskoeffizient $VarK_Z$

$$VarK_Z = \frac{\sigma}{ZM} = \frac{\sqrt{V(\mathbf{Z})}}{ZM} \quad (2.37)$$

zu berechnen, um die Stabilität der Ergebnisse zu überprüfen. Die Analyse der Standardabweichung und des Variationskoeffizienten geben einen Überblick darüber, inwieweit die zufälligen Schwankungen der Absatzhöchst- und Rückflussmengen bei unterschiedlichen Ausprägungen der Maßnahmen absorbiert werden. Hierzu sind Sensitivitätsanalysen bzgl. der Variation des Ausmaßes der Handlungsmaßnahmen durchzuführen.

3 Strukturierung des Prognoseproblems

3.1 Vorüberlegungen

Bedingt durch die Wirkungsdauer der Kapazitätsdimensionierung als Teilproblem der taktischen Planung ist davon auszugehen, dass die Initialentscheidungen über die Kapazitätsausstattung und das Güterprogramm auf der Grundlage einer relativ *schwachen Informationsbasis* getroffen werden müssen. Bereits die originären Prognosedaten, wie

- der Gesamtzeitraum, in dem Absätze und Güterrückflüsse erfolgen,
- die Absatz- und Rückflussmengen in den Teilperioden des Gesamtzeitraums und
- die entscheidungsrelevanten Rückflussqualitäten,

weisen eine hohe Unsicherheit auf. Im Extremfall sind beobachtbare Absatz- und Rückflussereignisse für die berücksichtigten Güter den Initialentscheidungen nachgelagert¹⁾, so dass lediglich Sekundärinformationen über ähnliche Güter herangezogen werden können, die in Abstufungen im Spektrum von „selbsterstellt und selbst zurückgenommen“ bis „fremderstellt und fremd zurückgenommen“ eruierbar sind. Während im zuerst genannten Fall aufbauend auf Detaildaten zu Absatz- und Rückflussmengen Prognosemodelle mit statistischen Verfahren geschätzt werden können²⁾, ist im zuletzt genannten Fall eine Abschätzung der im Ablauf des erweiterten Produktlebenszyklus zu erwartenden Absatz- und Rückflussmengen auf der Grundlage aggregierter statistischer Werte und Expertenschätzungen möglich³⁾.

Beginnend mit der Markteinführung wird jedoch die Informationsbasis durch die Beobachtung der eintretenden Absatz- und Rückflussereignisse sukzessive verbes-

¹⁾ Vgl. Chittamvanich/Ryan (o.J.), S. 5 f. und S. 10 f.

²⁾ Vgl. Goh/Varaprasad (1986), S. 43 f.

³⁾ Vgl. Linton/Yeomans (2002), S. 23 ff.; Linton/Yeomans/Yoogalingam (2002), S. 1187 ff.; Linton/Yeomans/Yoogalingam (2005), S. 339 ff. Zur Vielfalt der möglichen Datenquellen vgl. Kricke/van Harten/Schuur (1998), S. 129.

sert, so dass Anpassungen von Kapazitätsausstattung und Güterprogramm mit einer größeren Genauigkeit vorgenommen werden können. Um die Kapazitätsdimensionierung in einem solchen mehrstufigen Entscheidungsprozess vornehmen zu können, ist das Prognoseverfahren um eine *Update-Funktion*¹⁾ zu erweitern²⁾.

Bei der Kapazitätsdimensionierung sollte im Hinblick auf den *Aggregationsgrad* nicht auf *Item-level*-, sondern auf *Period-level*-Daten³⁾ zurückgegriffen werden, d.h., dass für jede vergangene Periode die Daten über Absatz-, Rückflussmengen und weitere Einflussfaktoren vorliegen. Item-level-Daten sind dadurch charakterisiert, dass für jedes Produkt alle produktspezifischen Informationen, wie z.B. Verkaufs- und Rückflussdatum, bekannt sind. Diese Informationen sind jedoch im Rahmen der Kapazitätsdimensionierung nicht notwendig, da sie der periodenbezogenen Abstimmung von Kapazitätsangebot und -nachfrage dienen und insbesondere zeitliche Rückkopplungen zwischen den relevanten Größen im Fokus der Betrachtung stehen. Des Weiteren sind abgesehen vom höheren technischen Aufwand, den die Bereitstellung von Item-level-Daten induziert, Prognosen auf dieser Basis bei fehlenden Werten und ungenauen Angaben weniger konsistent als auf der Basis von Period-level-Daten⁴⁾.

Eine Klasse von quantitativen Prognoseverfahren, die für die vorliegende Problemstellung aufgrund des Prognosehorizontes und der verfügbaren Informationsbasis eine hohe Relevanz aufweisen, sind die *dynamischen Regressionsgleichungen*. Abbildung 3.1 gibt einen detaillierten Überblick über die wesentlichen Ansätze, die sich für die Prognose in einem mittelfristigen Planungshorizont eignen⁵⁾. Durch die Berücksichtigung von Rückkopplungen im Zeitablauf können funktionale Abhängigkei-

¹⁾ Vgl. Clotey/Srivastava (2008), S. 1694 ff.; Kelle/Silver (1989), S. 22 ff.; Toktay/Wein/Zenios (2000), S. 1416 f.

²⁾ Zu einer rein inkrementellen Vorgehensweise bei der Kapazitätsdimensionierung vgl. Georgiadis/Vlachos/Tagaras (2006), S. 519; Vlachos/Georgiadis/Iakovou (2007), S. 376 f.

³⁾ Vgl. Toktay/van der Laan/de Brito (2004), S. 51.

⁴⁾ Vgl. Toktay/van der Laan/de Brito (2004), S. 57 ff.; Toktay/Wein/Zenios (2000), S. 1417.

⁵⁾ Vgl. Hansmann (1983), S. 149.

ten von Variablen abgebildet werden. Im vorliegenden Kontext bedeutet dies, dass die Beziehungen des Güterrückflusses zu anderen erklärenden Variablen (z.B. Absatzmengen) anhand der Prognosemodelle erfasst werden können. Zudem ist es bei multivariaten Ansätzen möglich, Zeitreihen unterschiedlicher Güter mit ihren Abhängigkeiten simultan zu prognostizieren, so dass Marktinterdependenzen zwischen den unterschiedlichen Gütern, erfasst werden. Durch die Integration des Prognosemodells in das Planungsmodell ergibt sich der Vorteil, dass die Auswirkungen der Planungsentscheidungen auf die zu prognostizierenden Größen, wie Nachfrage- und Rückflussmengen bei der Entscheidungsfindung Berücksichtigung finden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die Beziehungen zwischen verschiedenen Rückflussarten einzubeziehen. Durch die Prognose unterschiedlicher Rückflussarten, die durch ihre Qualität charakterisiert sind, kann die Kapazität güterartenindividuell dimensioniert werden.

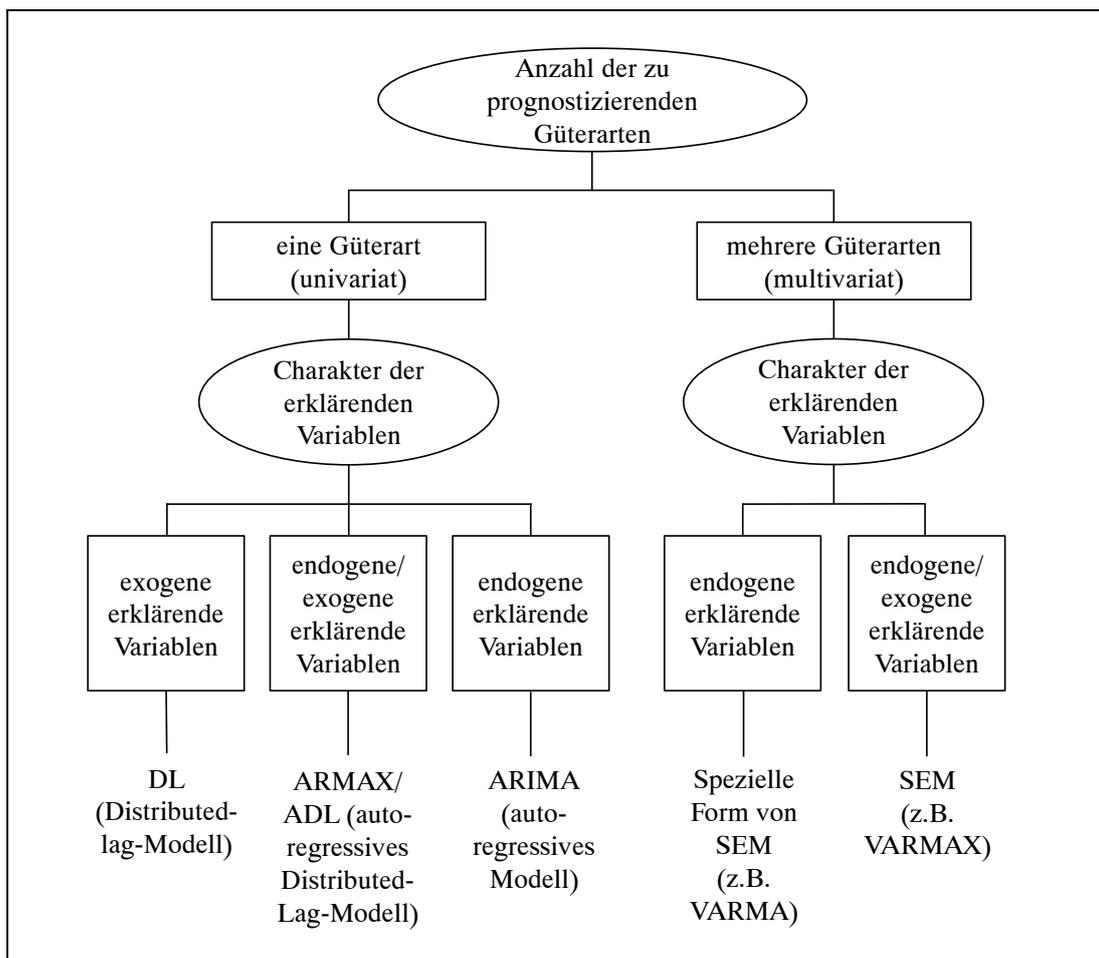


Abbildung 3.1: Spektrum von Prognosemodellen mit dynamischen Regressionsgleichungen

In Abhängigkeit von den Arten der einbezogenen Einflussgrößen wird im *univariaten* Fall zwischen folgenden Ausprägungen unterschieden¹⁾:

1. Berücksichtigung verzögerter exogener Variablen: Distributed-lag-Modell²⁾.
2. Berücksichtigung verzögerter endogener Variablen und unverzögerter exogener Variablen: Derartige Modelle werden als endogene dynamische Regressionsgleichungen, autoregressive Prozesse (AR) oder inhomogene stochastische Differenzgleichungen bezeichnet.
3. Berücksichtigung verzögerter endogener und verzögerter exogener Variablen: Autoregressives Distributed-lag-Modell (ADL(L' , L)-Modell) und ARMAX-Modell³⁾.

Da in der Realität die Güterrückflüsse häufig von weiteren Faktoren, wie z.B. Produktcharakteristika (Preis, Design usw.), beeinflusst werden und im Rahmen der Kapazitätsdimensionierung Informationen über die Produktqualität der zurückfließenden Güter entscheidend für die Planung sind, liegt der Schwerpunkt im vorliegenden Beitrag auf den *multivariaten Modellen*. Je nach Modellformulierung ist es mit ihnen möglich, mehrere verzögerte/unverzögerte endogene/exogene Variablen als Einflussgrößen auf den Güterrückfluss zu berücksichtigen. Damit stellen SEM eine Verallgemeinerung von Distributed-lag-Modellen dar. Auch in diesem Fall erfolgt eine Unterscheidung nach dem Charakter der erklärenden Variablen:

1. Modelle, deren zu erklärende Variablen (endogene Variablen) durch ihren eigenen Verlauf beschrieben werden, werden als eine reduzierte Form der Systeme mit simultanen Gleichungen (SEM) benannt (z.B. Vektor-autoregressive Modelle (VARMA)).
2. Modelle, die auch exogene Variablen als erklärende Variablen beinhalten, werden als Systeme mit simultanen Gleichungen (SEM) bezeichnet.

¹⁾ Vgl. Assenmacher (2002), S. 243 f.

²⁾ Die in der Literatur vorgeschlagenen statistischen Verfahren zur Prognose von Güterrückflüssen basieren auf den Distributed-lag-Modellen (DL), deren einzige exogene Variable die periodenbezogene Absatzmenge ist. Vgl. Clotey/Srivistava (2008); Goh/Varaprasad (1986); Kelle/Silver (1989); Toktay/Wein/Zenios (2000).

³⁾ Unter einem ARMAX-Modell wird ein ADL-Modell mit Moving-average Schocks verstanden. Beide Modelle sowie das Distributed-lag-Modell gehören zu der Klasse der Transferfunktionsmodelle. Vgl. Rinne/Spocht (2002), S. 467 ff.

Die Wahl der Modellformulierung ist von den Gegebenheiten der CLSC abhängig. Diese zeigen sich einerseits in den Möglichkeiten über die Höhe der Absatz- und Rücknahmemengen zu entscheiden und andererseits im Abhängigkeitsverhältnis von Nachfrage- und Rückflussmenge. Für die Modellierung des Prognosemodells gilt Folgendes:

- Größen, die nicht durch Entscheidungen der CLSC festgelegt werden, zu prognostizierende Größen beeinflussen und von diesen beeinflusst werden, werden als endogene Variablen modelliert.
- Größen, die nicht durch Entscheidungen der CLSC festgelegt werden und zu prognostizierende Größen beeinflussen, aber von diesen nicht beeinflusst werden, werden als exogene Variablen modelliert und außerhalb des Modells bestimmt.
- Größen, die durch Entscheidungen der CLSC festgelegt werden und die zu prognostizierenden Größen beeinflussen, werden als exogene Variablen modelliert.

Abhängig davon, ob zwischen den Rückflussmengen und den weiteren Einflussfaktoren einseitige oder wechselseitige Abhängigkeiten bestehen, werden die Variablen bzw. Parameter als endogene oder exogene Variablen deklariert. In einem SEM sind die endogenen Variablen auch die zu erklärenden Zeitreihen, die die Anzahl der Gleichungen im Gleichungssystem bestimmen. Die exogenen Variablen sind die erklärenden Variablen. Bei Vorliegen von einseitiger Abhängigkeit haben die Rückflussmengen keinen Einfluss auf die erklärenden Zeitreihen (wie Absatz-, Nachfrage- und/oder Rücknahmemengen). Bei wechselseitigen Abhängigkeiten besteht hingegen ein direkter Einfluss.

Neben dem Güterrückfluss als zu erklärende Variable des Prognosemodells wird die Nachfragemenge zu einer zu erklärenden Variable, wenn zwischen Rückflussmenge und Nachfragemenge eine wechselseitige Abhängigkeit besteht. In diesem Fall wird die Nachfrage als endogene Variable modelliert. Für den Fall, dass eine einseitige Abhängigkeit zwischen Nachfrage- und Rückflussmenge besteht, stellt die Nachfrage eine exogene Variable dar. Dies erlaubt eine separate Prognose unter Berücksichtigung längerfristiger Entwicklungstendenzen, wie sie etwa bei Produktlebenszyklen vorliegen.

Bei fehlenden Entscheidungsmöglichkeiten müssen die Absatz- und Rücknahmemengen den Nachfrage- bzw. Rückflussmengen entsprechen (Planungssituation I, Tabelle 2.1). Sind in der CLSC hingegen autonome Entscheidungen über Absatz- und/oder Rücknahmemengen möglich und haben diese nachweislich Einfluss auf die Güterrückflussmengen, dann können diese Mengen als Einflussfaktoren bei der Prognose der Güterrückfluss- und Nachfragemengen Berücksichtigung finden, um die Prognosegüte zu erhöhen. Der Absatzsatzmenge, als Verursachungsquelle, wird bei der Modellierung die größte Bedeutung zugesprochen. Daraus folgt, dass nur Güter zurückfließen können, die auch vorher abgesetzt worden sind. Realisierte Rücknahmemengen können einen Einfluss auf die Kundenreaktion und/oder die Nachfrage haben und so die Rückflussmengen bestimmen. Damit werden sie als exogene Variablen definiert.

Je nach Konstellation der CLSC (bestimmt von der Planungssituation und dem Abhängigkeitsverhältnis zwischen Rückfluss- und Nachfragemenge) bestehen unterschiedliche funktionale Abhängigkeiten zwischen den erklärenden und zu erklärenden Variablen. Die zu erklärenden Variablen stellen für den autonom disponierbaren Güterfluss Obergrenzen dar, während die exogenen erklärenden Variablen Entscheidungsvariablen des autonom disponierbaren Güterflusses sind. Die Werte der erklärenden Variablen wurden ggf. in der Vergangenheit beobachtet (z.B. Werte des Vorgängerproduktes, bereits bekannte Werte des Neuproduktes) und stellen die Informationsbasis dar. Tabelle 3.1 zeigt die zugrundeliegenden Zeitreihen in den einzelnen Fällen. Mit steigender Anzahl der Entscheidungsmöglichkeiten steigt auch die Anzahl der erklärenden Variablen.

Abhängigkeiten	Entscheidungsmöglichkeiten	zu erklärende Variablen	erklärende Variablen	
			endogen	exogen
einseitig	$\neg(R \vee A)$	XR_t	$XR_{t-l'}$	ME_{t-l}
	$A \wedge \neg R$	XR_t	$XR_{t-l'}$	ME_{t-l}, XE_{t-l}
	$R \wedge \neg A$	XR_t	$XR_{t-l'}$	ME_{t-l}, XN_{t-l}
	$R \wedge A$	XR_t	$XR_{t-l'}$	$ME_{t-l}, XE_{t-l}, XN_{t-l}$
wechselseitig	$\neg(R \vee A)$	XR_t, ME_t	$XR_{t-l'}, ME_{t-l'}$	–
	$A \wedge \neg R$	XR_t, ME_t	$XR_{t-l'}, ME_{t-l'}$	XE_{t-l}
	$R \wedge \neg A$	XR_t, ME_t	$XR_{t-l'}, ME_{t-l'}$	XN_{t-l}
	$R \wedge A$	XR_t, ME_t	$XR_{t-l'}, ME_{t-l'}$	XE_{t-l}, XN_{t-l}
A ... Entscheidungen über Absatzmengen möglich				
R ... Entscheidungen über Rücknahmemengen möglich				

Tabelle 3.1: Zu modellierende Variablen bzw. Parameter¹⁾

In den nächsten Abschnitten steht die Spezifizierung der Nachfragemengen ME_t und der Güterrückflussmengen XR_t , welche in Formel (2.3) des Grundmodells (Unterabschnitt 2.2.2) definiert ist, im Zentrum des Interesses. Die Güterrückflussmengen XR_t einer Periode sollen durch eine funktionale Beziehung zwischen den vergangenen Rückflussmengen, den Absatzmengen XE und weiteren Einflussfaktoren YN erklärt werden:

$$XR_t = g(XE_{t-l}, YN_{t-l}, XR_{t-l'}; l = 0, \dots, L; l' = 1, \dots, L') \quad \forall t-l, t-l' > 0 \quad (2.3)$$

mit

l', l Lag-Index ($l' = 1, \dots, L', l = 0, \dots, L$)

t Periodenindex

Als weitere Einflussfaktoren YN werden ausschließlich die Rücknahme- XN und Nachfragemengen ME diskutiert. Andere exogene Einflussfaktoren (z.B. demogra-

¹⁾ Vgl. Gössinger/Panitz (2016), S. 610.

phische, technologische und rechtliche Rahmenbedingungen) können analog zur erläuterten Vorgehensweise modelliert werden.

Durch eine Quantifizierung dieses Zusammenhangs und eine darauf aufbauende Prognose wird es möglich, eine simultane Dimensionierung von Produkterstellungs- und Rückflussbewältigungskapazität vorzunehmen. Die Herausforderungen, die eine Quantifizierung des funktionalen Zusammenhangs mit sich bringt, und Lösungsansätze werden aufgezeigt.

3.2 Prognosemodelle

3.2.1 Univariates Grundmodell

Den Ausgangspunkt der Formulierung eines Modells, das die angesprochenen Anforderungen berücksichtigt, bildet das autoregressive Distributed-lag-Modell (ADL (L', L)) mit den Lag-Strukturen der Ordnung L in den exogenen Variablen und der Ordnung L' in den endogenen Variablen¹⁾:

$$XR_t = \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{l'} \cdot XR_{t-l'} + \sum_{l=0}^L \beta_l \cdot XE_{t-l} + u_t \quad (3.1)$$

mit

l', l Lag-Index ($l' = 1, \dots, L', l = 0, \dots, L$)

t Periodenindex

u Störvariable

XE periodenbezogene Absatzmenge (exogene Variable)

XR periodenbezogene Rückflussmenge (endogene Variable)

γ, β Regressanden

¹⁾ Vgl. Hackl (2013), S. 309.

Im Grundmodell wird davon ausgegangen, dass die Rückflüsse XR einer Periode t nicht nur von den Absatzmengen der Vorperioden abhängig sind, sondern auch von den in den Vorperioden realisierten Rückflüssen, die als verzögerte endogene Variablen erfasst werden. Die Parameter L' und L geben Aufschluss darüber, inwiefern vergangenheitsbezogene Daten in die Prognose einbezogen werden. Die endogenen Variablen sind die vom Modell zu erklärenden Variablen und die verzögerten endogenen Variablen werden als vorher bestimmt bezeichnet. Dem Modell liegt die Annahme zugrunde, dass letztere nicht mit der aktuellen oder mit zukünftigen Störvariablen korreliert sind¹⁾. Ebenso wird angenommen, dass die exogenen Variablen nicht mit der Störgröße einer beliebigen Periode korreliert sind.

Das Modell (3.1) ist eine Verkürzung des allgemeinen ADL-Modells, das zur Beschreibung der erklärenden Variablen einen Absolutterm (ausgliederter Input) enthält. Aus ökonomischer Sicht beschreibt dieser Term den erwarteten Wert, den die endogene Variable annimmt, wenn die exogenen Variablen den Wert 0 haben²⁾. Da die Absatzmengen als Verursachungsquelle die Güterrückflussmengen bedingen, entfällt dieser Term.

In der Kurzschreibweise und bei Einführung des Lag-Operators B (Verschiebungsoperator), welcher die Anweisungen

$$B^{L'} \cdot XE_t = XE_{t-L'} \text{ und } B^{L'} \cdot XR_t = XR_{t-L'} \quad (3.2)$$

beinhaltet, ergibt sich die Gleichung zu:

$$\gamma(B) \cdot XR_t = \beta(B) \cdot XE_t + u_t \quad (3.3)$$

mit

$$\gamma(B) = 1 - \gamma_1 \cdot B - \dots - \gamma_{L'} \cdot B^{L'} = 1 - \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{l'} \cdot B^{l'} \quad (3.4)$$

¹⁾ Vgl. Hackl (2013), S. 290.

²⁾ Vgl. Auer (2007), S. 511 f.

und

$$\beta(B) = \beta_0 - \beta_1 \cdot B - \dots - \beta_L \cdot B^L = \beta_0 - \sum_{l=1}^L \beta_l \cdot B^l \quad (3.5)$$

Bei der Schätzung dieses Modells mit Hilfe von Regressionsverfahren wird angenommen, dass die den Zeitreihen zugrundeliegenden Prozesse stationär¹⁾ sind. Bei Nichtstationarität (z.B. trendförmiger, zyklischer oder saisonaler Verlauf) sind die ursprünglichen Prozesse in stationäre Prozesse zu transformieren. Mit diesem Vorgehen werden Scheinregressionen vermieden²⁾. Dies kann durch Logarithmisierung

$$XE_t = \log(XE_t) \text{ bzw. } XR_t = \log(XR_t) \quad (3.6)$$

oder Differenzenbildung erfolgen. Bei der Differenzenbildung wird ein Differenzenoperator Δ eingefügt³⁾:

$$\Delta XE_t = (1 - B) XE_t = XE_t - XE_{t-1} \quad (3.7)$$

Diese Differenzenbildung wird so lange durchgeführt, bis ein stationärer Prozess vorliegt. Falls der Prozess nach d -maligem Anwenden stationär ist, wird er als integriert mit der Ordnung d bezeichnet⁴⁾:

$$XE_t \sim I(d) \quad (3.8)$$

Liegt Stationarität der Prozesse XE_t und XR_t vor, kann das Modell (3.1) in die Form eines Distributed-lag-Modells transformiert werden:

$$XR_t = \frac{\beta(B)}{\gamma(B)} \cdot XE_t + \frac{1}{\gamma(B)} \cdot u_t \quad (3.9)$$

¹⁾ Allgemein gilt ein Prozess y_t als stationär, wenn die ersten beiden Momente zeitinvariant sind (i) $E(y_t) = \mu < \infty \forall t$ (ii) $[E(y_t - \mu)(y_{t-l} - \mu)^T] = const.$ Es wird von konstanten Erwartungswerten, Varianzen und Kovarianzen ausgegangen. Vgl. Lütkepohl (2005), S. 24. Stationarität kann z.B. mit dem Dickey-Fuller-Test oder der Autokorrelationsfunktion festgestellt werden.

²⁾ Vgl. Assenmacher (2002), S. 202.

³⁾ Vgl. Assenmacher (2002), S. 223.

⁴⁾ Vgl. Assenmacher (2002), S. 223.

Die Wahl des Schätzverfahrens ist für das vorliegende Modell davon abhängig, ob die Störvariablen u_t autokorreliert sind, d.h., ob sie mit den Störvariablen der vorherigen Perioden korrelieren:

- Folgt u_t einem weißen Rauschen ε_t ¹⁾, d.h. $u_t = \varepsilon_t$, dann sind die Störgrößen des ADL-Modells nicht korreliert und es liegt keine Autokorrelation vor. In diesem Fall kann die Ordinary-Least-Squares-Schätzung²⁾ (OLS-Schätzung) zur Bestimmung der Regressanden herangezogen werden.
- Folgt u_t einem AR-Prozess der Ordnung \hat{L} mit weißem Rauschen ε_t , z.B. AR(1) $u_t = \eta u_{t-1} + \varepsilon_t$, dann liegt Autokorrelation vor. Mögliche Schätzverfahren sind die Instrumentvariablen-Schätzung (IV-Schätzung), die Feasible-Generalized-Least-Squares-Schätzung (FGLS-Schätzung) oder ein Verfahren der nicht-linearen Optimierung³⁾.

Das Vorgehen zur Bestimmung der Lag-Ordnungen (d.h. die maximalen Verzögerungen) des zugrundeliegenden Prognosemodells besteht aus einem versuchsweisen Anpassen an vorhandene Werte:

1. Wahl eines genügend großen Wertes für die maximalen Verzögerungen der Ordnungen L bzw. L' des Modells.
2. Schätzung der Koeffizienten aller möglichen Modelle für $l' = 1, \dots, L'$ und $l = 0, \dots, L$.
3. Berechnung des Gütekriteriums für jedes der Modelle. Häufig angewendete Kriterien sind z.B. das Informationskriterium nach Akaike AIC ⁴⁾

$$AIC(ml) = -2 \log ml + 2ap \quad (3.10)$$

¹⁾ Unter einem weißen Rauschen wird ein zufälliger Prozess mit folgenden Eigenschaften verstanden: $E(\varepsilon_t) = 0$ mit $V(\varepsilon) = \sigma^2 \quad \forall t$.

²⁾ Vgl. Hackl (2013), S. 33 ff.

³⁾ Vgl. Hackl (2013), S. 318 ff.

⁴⁾ Vgl. Akaike (1974), S. 716.

oder das Informationskriterium nach Schwarz BIC ¹⁾

$$BIC = -\frac{2ml}{ab} + \frac{ap \log ab}{ab} \quad (3.11)$$

mit dem Wert der Maximum-Likelihood-Funktion ml bei bekannter Verteilung, der Anzahl der zu bestimmenden Parameter ap und der Anzahl der Beobachtungen ab .

4. Es werden die maximalen Verzögerungen gewählt, bei der die Modelle für das ausgewählte Kriterium die besten Ergebnisse aufweisen. Im Falle der Anwendung des AIC - bzw. BIC -Kriteriums wird das Modell mit dem kleinsten Kriteriumswert gewählt.

3.2.2 Berücksichtigung mehrerer Güterarten

Hat die heterogene Qualität der rückfließenden Güter einen relevanten Einfluss auf die Kapazitätsdimensionierung, ist es erforderlich, das Grundmodell um die Berücksichtigung mehrerer Güterarten j ($j = 1, \dots, J$) zu erweitern (z.B. $j = 1$: Neuprodukt in Einzelteilen, $j = 2$: Neuprodukt, $j = 3$: reparaturbedürftiges Produkt, $j = 4$: Gebrauchte Produkte am Ende ihrer Nutzungsdauer). Dabei werden die in Tabelle 3.1 dargestellten Entscheidungssituationen bzgl. der Absatz- und Rücknahmemengen und dem bestehenden Abhängigkeitsverhältnis zwischen Rückfluss- und Nachfragemengen berücksichtigt, die Auswirkungen auf die Einflussnahme (bzw. Modellierung) und Beziehungen zwischen den Absatz-, Nachfrage-, Rückfluss- und Rücknahmemengen haben.

Im Folgenden wird ein Grundmodell des Prognoseproblems im Mehrgüterfall erarbeitet, das alle Entscheidungssituationen abbilden kann (Unterunterabschnitt 3.2.2.1). Zudem werden für jede Planungssituation die spezifischen Änderungen des Modells beschrieben. Dabei wird der Frage nachgegangen, durch welche Einflussfaktoren die zu erklärenden Größen der Güterrückflussmenge XR und ggf. der Nachfragemenge ME beschrieben werden und wie diese in einem Modell abgebildet werden können. Je nach vorliegendem Fall werden neben den exogenen auch verzögerte endogene

¹⁾ Vgl. Hackl (2013), S. 39; Schwarz (1978), S. 461 ff.

Variablen erfasst. In Abhängigkeit davon, ob die Güterrückflussmengen auch die Nachfragemengen beeinflussen (z.B. Wechselwirkungen zwischen Primär- und Sekundärmarkt), sind die Nachfragemengen als endogene Variablen (bestehende Interdependenzen) oder als exogene Variablen (einseitige Abhängigkeiten) im Modell abzubilden. Im zuletzt genannten Fall können die Nachfragemengen mit einem separaten Modell prognostiziert werden. Sollten Entscheidungsmöglichkeiten bezüglich der Absatz- und Rücknahmemengen bestehen, werden diese als exogene Variablen modelliert.

3.2.2.1 Multivariates Grundmodell

Ist die Rückflussmenge einer Güterart j in Periode t (endogene Variable) von den Absatz- und Rückflussmengen der Güterarten in den Vorperioden abhängig und sind die Absatzmengen von den Rückflussmengen unabhängig, können die Absatzmengen als exogene Variable¹⁾ im Prognosemodell für Güterrückflüsse berücksichtigt werden. Aus den vorherigen Überlegungen ergibt sich damit ein Prognosemodell, das sowohl endogene als auch exogene erklärende Variablen enthält. Dieses multivariate Prognoseproblem lässt sich mit Hilfe des SEM erfassen²⁾. Der Rückfluss $\mathbf{XR}_t [J \times 1]$ mit J zu erklärenden Variablen $\mathbf{XR}_{j,t}$ und die Absatzmengen als exogene Variablen $\mathbf{XE}_t [J \times 1]$ gehen in das folgende dynamische Mehrgleichungsmodell ein:

$$\mathbf{XR}_t = \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{l'} * \mathbf{XR}_{t-l'} + \sum_{l=0}^L \beta_l * \mathbf{XE}_{t-l} + \mathbf{u}_t \quad (3.12)$$

⇔

¹⁾ Vgl. Lütkepohl (2005), S. 387.

²⁾ Vgl. Pindyck/Rubinfeld (1998), S. 399 ff. Dieses Modell wird auch als multivariates Transferfunktionsmodell bezeichnet. Vgl. Lütkepohl (2005), S. 387 ff.

$$\begin{aligned}
XR_{1,t} &= \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{1,1,l'} \cdot XR_{1,t-l'} + \dots + \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{1,J,l'} \cdot XR_{J,t-l'} \\
&\quad + \sum_{l=0}^{L'} \beta_{1,1,l} \cdot XE_{1,t-l} + \dots + \sum_{l=0}^{L'} \beta_{1,J,l} \cdot XE_{J,t-l} + u_{1,t} \\
&\quad \cdot \\
&\quad \cdot \\
XR_{J,t} &= \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{J,1,l'} \cdot XR_{1,t-l'} + \dots + \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{J,J,l'} \cdot XR_{J,t-l'} \\
&\quad + \sum_{l=0}^{L'} \beta_{J,1,l} \cdot XE_{1,t-l} + \dots + \sum_{l=0}^{L'} \beta_{J,J,l} \cdot XE_{J,t-l} + u_{J,t}
\end{aligned} \tag{3.13}$$

mit

\mathbf{u} Vektor des Störterms [$J \times 1$]

\mathbf{XE} Vektor der Absatzmengen [$J \times 1$]

\mathbf{XR} Vektor der Rückflussmengen [$J \times 1$]

β Matrix der zu den exogenen Variablen gehörigen Regressanden [$J \times J$]

γ Matrix der zu den endogenen Variablen gehörigen Regressanden [$J \times J$]

Die Anzahl der Gleichungen stimmt mit der Anzahl der endogenen Variablen überein. Bei den Koeffizienten γ bezieht sich der erste Index auf die zu erklärende Rückflussgüterart j der aktuellen Periode auf der linken Seite, der zweite Index auf die Rückflussgüterart j , deren Mengenrealisationen in der Vergangenheit die linke Seite beeinflussen und der dritte Index auf die zeitliche Verschiebung des Einflusses. Insgesamt sind für die endogenen Variablen $J \times J \times L'$ Koeffizienten zu bestimmen; für die exogenen Variablen sind es $J \times J \times (L+1)$.

In der Kurzschreibweise lautet das Modell¹⁾:

$$\gamma(B) * \mathbf{XR}_t = \beta(B) * \mathbf{XE}_t + \mathbf{u}_t \tag{3.14}$$

¹⁾ In Anlehnung an Lütkepohl (2005), S. 391.

mit

$$\gamma(B) = I_J - \gamma_1 \cdot B - \dots - \gamma_{L'} \cdot B^{L'} = I_J - \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{l'} \cdot B^{l'} \quad (3.15)$$

$$\beta(B) = \beta_0 - \beta_1 \cdot B - \dots - \beta_L \cdot B^L = \sum_{l=0}^L \beta_l \cdot B^l \quad (3.16)$$

Bei Unabhängigkeit der jeweiligen periodenbezogenen Rückflussmengen verschiedener Güterarten von den Rückflussmengen der anderen Güterarten verkürzt sich das Gleichungssystem (3.12) zu:

$$\begin{aligned} XR_{1,t} &= \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{1,l'} \cdot XR_{1,t-l'} + \sum_{l=0}^L \beta_{1,1,l} \cdot XE_{1,t-l} + \dots + \sum_{l=0}^L \beta_{1,J,l} \cdot XE_{J,t-l} + u_{1,t} \\ &\vdots \\ &\vdots \\ XR_{J,t} &= \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{J,l'} \cdot XR_{J,t-l'} + \sum_{l=0}^L \beta_{J,1,l} \cdot XE_{1,t-l} + \dots + \sum_{l=0}^L \beta_{J,J,l} \cdot XE_{J,t-l} + u_{J,t} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Diese Reduzierung des Modells bedeutet eine Verminderung der Anzahl der zu bestimmenden Parameter $(J \times L' + J \times J \times (L+1))$ und erleichtert somit die Schätzung.

Ausgehend vom Grundmodell (3.12) kann der Störterm u_t einem Moving-Average-Prozess der Ordnung P folgen. In diesem Fall liegt ein VARMAX-Modell vor. Der Störterm u_t hat folgende Form:

$$u_t = \varepsilon_t + \rho_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \rho_P \varepsilon_{t-P} = \varepsilon_t + \sum_{p=1}^P \rho_p \varepsilon_{t-p} \quad (3.18)$$

mit

$$\varepsilon \quad \text{weißes Rauschen}^1) [J \times 1]$$

¹⁾ Das weiße Rauschen ε_t hat folgende Eigenschaften: (i) Der Erwartungswert ist null: $E(\varepsilon_t) = \mathbf{0} \quad \forall t$ und (ii) die Störgrößen sind nicht in der Zeit korreliert: $E(\varepsilon_t \cdot \varepsilon_{t'}^{Tr}) = \mathbf{0} \quad \forall t \neq t'$. Die Störgrößen der einzelnen Gleichungen können voneinander abhängig sein. Besteht nur eine Abhängigkeit zwischen den Störgrößen der jeweiligen Periode, wird dieser Sachverhalt als kontemporäre Abhängigkeit bezeichnet: $E(\varepsilon_t \cdot \varepsilon_{t-l}^{Tr}) = \Omega$, für $l=0$; $E(\varepsilon_t \cdot \varepsilon_{t-l}^{Tr}) = 0$, sonst (mit Kovarianzmatrix Ω). Im Falle keiner kontemporären Korrelation gilt: $E(\varepsilon_t \cdot \varepsilon_{t-l}^{Tr}) = \sigma^2$, für $l=0$; $E(\varepsilon_t \cdot \varepsilon_{t-l}^{Tr}) = 0$, sonst. Vgl. Stier (2001), S. 66.

ρ Matrix der Regressanden im MA-Term [$J \times J$]

In der Kurzschreibweise ergibt sich das Modell zu:

$$\gamma(B) * XR_t = \beta(B) * XE_t + \rho(B) * \varepsilon_t \quad (3.19)$$

mit den Regressanden (3.15) und (3.16) und

$$\rho(B) = I_J - \rho_1 B - \dots - \rho_p B^p = I_J - \sum_{p=1}^p \rho_p \cdot B^p \quad (3.20)$$

Falls der Störterm u_t ein weißes Rauschen ε_t ist, wird das Modell auch als Vektorautoregressives Modell mit exogenen Variablen (VARX-Modell) bezeichnet. Das Modell verkürzt sich zu¹⁾:

$$\gamma(B) * XR_t = \beta(B) * XE_t + \varepsilon_t \quad (3.21)$$

Die Wahl des Schätzverfahrens ist davon abhängig, ob die zugrundeliegenden Prozesse stationär²⁾ oder nicht-stationär sind und ob bei nicht-stationären Prozessen entweder eine Transformation zu stationären Prozessen oder aufgrund von kointegrierten Prozessen eine Transformation des SEM in ein Fehlerkorrekturmodell³⁾ (VECM) vorgenommen wird (siehe Abbildung 3.2)⁴⁾.

¹⁾ Vgl. Makridakis/Wheelwright/Hyndman (1998), S. 425 f.; Pankratz (1991), S. 345 f.; Rinne/Specht (2002), S. 522 ff.; Stier (2001), S. 67.

²⁾ Allgemein gilt ein Vektorprozess als stationär, wenn die ersten beiden Momente zeitinvariant sind (i) $E(y_{i,t}) = \mu_i < \infty \forall t$, (ii) $[E(y_t - \mu)(y_{t-l} - \mu)^T] = \text{constant}$. Vgl. Lütkepohl (2005), S. 237.

³⁾ Vgl. Granger (1981), S. 121 ff.

⁴⁾ Vgl. Lütkepohl (2005), S. 395.

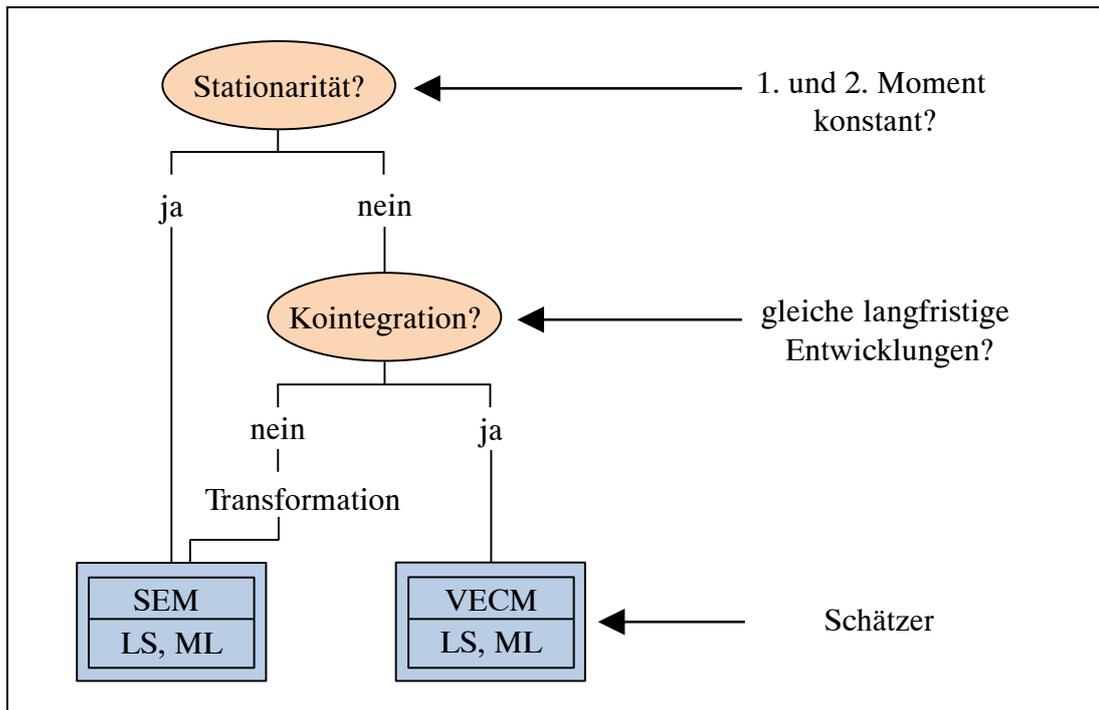


Abbildung 3.2: Wahl eines geeigneten Schätzverfahrens

Die Transformation zu stationären Prozessen (vgl. Unterabschnitt 3.2.1) hat den Vorteil, dass Scheinregressionen vermieden werden. Sind nicht-stationäre Prozesse nicht-kointegriert, sollte eine Transformation vorgenommen werden. Liegen hingegen kointegrierte nicht-stationäre Prozesse vor, lässt sich durch Berücksichtigung der Kointegration die Schätzung der Parameter verbessern und es können Langfristbeziehungen zwischen mehreren nicht-stationären Variablen aufgedeckt und berücksichtigt werden¹⁾.

Mit Kointegration wird der Sachverhalt bezeichnet, dass einige nicht-stationäre Variablen der gleichen Entwicklung folgen, d.h. es liegt ein Gleichgewicht oder eine stabile langfristige Beziehung vor²⁾. Mathematisch heißen zwei Prozesse x_t und y_t kointegriert der Ordnungen d_1 und d_2 ³⁾,

$$x_t, y_t \sim CI(d_1, d_2) \quad (3.22)$$

¹⁾ Vgl. Eckey/Kosfeld/Dreger (2001), S. 239; Rinne/Speccht (2002), S. 539.

²⁾ Vgl. Granger (1981), S. 128 f.; Wolters (2004), S. 74.

³⁾ Vgl. Eckey/Kosfeld/Dreger (2001), S. 239; Rinne/Speccht (2002), S. 540.

wenn sie mit der Ordnung d_1 integriert sind¹⁾

$$x_t \sim I(d_1) \text{ und } y_t \sim I(d_1) \quad (3.23)$$

und wenn eine existente Linearkombination z_t dieser Prozesse mit der Ordnung $d_1 - d_2$ integriert ist:

$$z_t = q_1 \cdot x_t + q_2 \cdot y_t \text{ mit } q_1, q_2 \neq 0 \quad (3.24)$$

$$z_t \sim I(d_1 - d_2) \quad (3.25)$$

Die Kointegration kann bei Prozessen durch Tests wie der Engle-Granger-Methode²⁾ oder die kointegrierte-Regression-Durbin-Watson-Statistik³⁾ (CRDW) identifiziert werden⁴⁾.

Liegt Kointegration in dem SEM vor, hängt die weitere Vorgehensweise davon ab, zwischen welchen Variablen die Kointegration besteht. Unter den Bedingungen, dass Kointegration ausschließlich zwischen den endogenen Variablen (Güterrückflussmengen) besteht und es sich bei den Variablen nur um stationäre oder um integrierte Variablen der Ordnung 1 handelt, wird das Modell in folgende Form gebracht⁵⁾:

$$\begin{aligned} \Delta XR_t = \Pi XR_{t-1} + \Gamma_1 \Delta XR_{t-1} + \dots + \Gamma_{L-1} \Delta XR_{t-L+1} \\ \beta_0 XE_t + \beta_1 XE_{t-1} + \dots + \beta_L XE_{t-L} + u_t \end{aligned} \quad (3.26)$$

Das Modell heißt kointegriert der Ordnung R , wenn die Matrix $\Pi := -(I_{J+1} - \gamma_1 - \dots - \gamma_L)$ den Rang R hat. Die Variable R steht somit für die Anzahl linear unabhängiger und kointegrierter Vektoren. Wenn der Rang der Matrix Π $J+1$ ist, dann ist XR_t ein stationärer Prozess⁶⁾. Weiterhin lässt sich die Matrix Π

¹⁾ Vgl. Assenmacher (2002), S. 280; Eckey/Kosfeld/Dreger (2001), S. 231.

²⁾ Vgl. Engle/Granger (1987), S. 251 ff.

³⁾ Vgl. Sargan/Bhargava (1983), S. 153 ff.

⁴⁾ Vgl. Assenmacher (2002), S. 284 ff.

⁵⁾ Vgl. Lütkepohl (2005), S. 394 f.

⁶⁾ Vgl. Assenmacher (2002), S. 295 f.

$[J \times J]$ als Matrixprodukt der Matrizen ϕ und χ $[(J+1) \times R]$ schreiben ($\Pi = \phi \cdot \chi^T$). Die Matrix $\Gamma_{l'}$ ($l' = 1, \dots, L' - 1$) ist eine $[J \times J]$ -Matrix und es gilt:

$$\Gamma_{l'} := -(\gamma_{l'+1} + \dots + \gamma_{L'}) \quad \forall l' = 1, \dots, L' - 1 \quad (3.27)$$

Aufgrund unterschiedlicher Rückgabemotive der Konsumenten liegt die Annahme nahe, dass gegebenenfalls nicht alle Rückflussarten demselben Trend folgen. Wenn die Güterrückflussmengen direkt durch den Absatz der Produkte bedingt werden (z.B. Ausschussquote oder Nicht-Gefallen) und nicht durch die Nutzung (bzw. Nutzungsdauer) durch den Konsumenten, können die Zeitreihen der genannten Variablen einem gemeinsamen Trend folgen. Das hat zur Folge, dass zwischen den endogenen und exogenen Variablen Kointegration besteht. Das zugehörige Modell hat die folgende Form:

$$\begin{aligned} \Delta XR_t = \Pi^* \begin{bmatrix} XR_{t-1} \\ XE_{t-1} \end{bmatrix} + \Gamma_1 \Delta XR_{t-1} + \dots + \Gamma_{L'-1} \Delta XR_{t-L'+1} \\ + \Upsilon_0 \Delta XE_t + \Upsilon_1 \Delta XE_{t-1} + \dots + \Upsilon_L \Delta XE_{t-L+1} + u_t \end{aligned} \quad (3.28)$$

mit den Koeffizientenmatrizen Υ_l ($\forall l = 0, \dots, L - 1$) für die Fehlerkorrekturterme der exogenen Variablen und es gilt:

$$\Pi^* = \phi \cdot \chi^{+Tr} . \quad (3.29)$$

Bei stationären Vektorprozessen im SEM können die Regressanden jeder Gleichung wie bei einem VAR-Modell durch die Anwendung von System-Schätzverfahren bestimmt werden. Gängige Verfahren sind die System-OLS-, die Generalized-Least Square- (GLS-), die Yule-Walker- und die Maximum-Likelihood-Schätzung (ML-Schätzung)¹⁾. Bei Modellen deren Restterm einem Moving-average-Prozess folgt, wird die ML-Schätzung bevorzugt angewendet²⁾.

¹⁾ Vgl. Hamilton (1994), S. 293 ff.; Lütkepohl (2005), S. 70 ff. und 395 ff.

²⁾ Vgl. Lütkepohl (2005), S. 447 ff.

Bevor die Koeffizienten eines kointegrierten Modells bestimmt werden, ist der Rang der Matrix Π oder Π^* zu ermitteln, z.B. mit Hilfe des Johansen-Verfahrens¹⁾. Die Schätzung der Koeffizienten eines SEM ist bei kointegrierten Variablen analog zu der Vorgehensweise bei VAR-Modellen zu vollziehen²⁾. Bei Kointegration zwischen endogenen und exogenen Variablen wird das bestehende Modell in die gleiche Modellform (VECM) gebracht³⁾. Zur Schätzung der Regressanden sind die OLS- oder die ML-Schätzung geeignete Verfahren⁴⁾. Bei der Bestimmung des Ranges eines VECM mit exogenen Variablen kann dies jedoch zu nicht verlässlichen Lösungen führen⁵⁾. Die maximalen Verzögerungen L und L' (Lag-Ordnungen) werden analog zum ADL-Modell unter der Berücksichtigung der multivariaten Rahmenbedingungen bestimmt.

3.2.2.2 Situationsspezifische Modifikationen

Die gegebenen Entscheidungsmöglichkeiten der CLSC haben Einfluss auf die Güterrückfluss- und Nachfragemengen und somit auf die zu modellierenden Variablen und Auswirkungen auf die Modifikationen des multivariaten Prognosemodells (3.12). Ob die Nachfragemenge ME_t , auch als endogene Variable modelliert wird, hängt vom Abhängigkeitsverhältnis zu den Güterrückflussmengen ab. Bestehen wechselseitige Abhängigkeiten, werden beide als endogene Variablen modelliert. Sind die Nachfragemengen unabhängig von den Rückflussmengen (einseitige Abhängigkeiten), werden diese als exogene Variablen modelliert und außerhalb des Modells bestimmt bzw. prognostiziert. Keine Beschränkungen bezüglich der Rücknahme- und Absatzmengen führen dazu, dass diese als exogene Variablen modelliert werden. Im Folgenden werden für die Fälle 1-4 entsprechend des vorliegenden Abhängigkeitsverhältnisses die situationsspezifischen Modifikationen des Grundmodells aufgezeigt.

¹⁾ Vgl. Assenmacher (2002), S. 295 ff.; Johansen (1988), S. 231 ff.; Johansen (1991), S. 1551 ff.

²⁾ Vgl. Lütkepohl (2005), S. 398 ff.

³⁾ Für weitere Erläuterungen siehe Lütkepohl (2005), S. 401.

⁴⁾ Vgl. z.B. Lütkepohl (2005), S. 269 ff.

⁵⁾ Zu Ansätzen, die diesem Sachverhalt entgegenwirken und zur Erörterung weiterer Probleme vgl. Lütkepohl (2005), S. 401.

Unter der Bedingung, dass alle endogenen Variablen mit der Variable y (mit Regressanden-Matrix γ) und alle exogenen Variablen mit der Variable x (mit Regressanden Matrix β) modelliert werden, ergeben sich die folgenden Modifikationen bei *wechselseitigen Abhängigkeiten*¹⁾ (siehe Tabelle 3.2). Dabei werden alle endogenen Variablen (XR, ME) zu einer Variablen zusammengefasst, da sie erklärende Zeitreihen für jede Rückfluss- und Nachfragemenge der Güterart j sind. Dadurch wird gewährleistet, dass beide Variable simultan prognostiziert werden können. Alle exogenen Variablen werden einzeln modelliert. Alle anderen Bezeichnungen sind durch das Grundmodell erklärt worden. Die Modelle nehmen an, dass alle endogen bzw. alle exogenen Variablen derselben maximalen Verzögerung (endogen: Lag-Ordnung L' bzw. exogen: Ordnung L) folgen.

Im *Fall 1* wird das multivariate Grundmodell (3.12) um die exogene Variable x_t reduziert. Der Output-Vektor y_t umfasst dabei den Eintrag $y_t = (XR_{1,t}, \dots, XR_{J,t}, ME_{1,t}, \dots, ME_{J,t})^T [(2 \cdot J) \times 1]$, wobei $XR_{j,t}$ die Rückflussmenge der Güterart j in der Periode t und $ME_{j,t}$ die Nachfragemenge der Güterart j in der Periode t darstellt²⁾. Folgt der Störterm einem Moving-average-Prozess, handelt es sich um ein Vektorautoregressive-moving-average-Modell (VARMA-Modell). Ist der Störterm hingegen ein weißes Rauschen, wird das Modell als VAR-Modell bezeichnet.

Bei der Bestimmung der Koeffizienten der Modelle ist eine große Anzahl an Beobachtungswerten vorteilhaft, da eine Nicht-Berücksichtigung von Variablen zu einer falschen Deutung führen kann³⁾. Die Anzahl der zu bestimmenden Regressanden reduziert sich jedoch von $L' \times (2 \times J) \times (2 \times J) + P \times (2 \times J) \times (2 \times J)$ beim VARMA-Modell auf $L' \times (2 \cdot J) \times (2 \cdot J)$ beim VAR-Modell und anstelle der Ordnungen L'

¹⁾ Diese Abhängigkeiten werden auch als Rückkopplungen, Feedback oder Feedback effects bezeichnet. Vgl. Makridakis/Wheelwright/Hyndman (1998), S. 423; Pankratz (1991), S. 342 f.

²⁾ Vgl. Hamilton (1994), S. 257 ff.; Lütkepohl (2005), S. 419 ff.; Pankratz (1991), S. 345 f.

³⁾ Vgl. Hackl (2005), S. 371.

und P muss lediglich die Ordnung L' bestimmt werden. Damit lässt sich das VAR-Modell mit weniger Aufwand als das VARMA-Modell schätzen¹⁾.

	wechselseitige Abhängigkeiten	Variablen	
		endogen	exogen
Fall 1	$y_t = \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{l'} * y_{t-l'} + u_t$ mit $y_t = (XR_{1,t}, \dots, XR_{J,t}, ME_{1,t}, \dots, ME_{J,t})^T$	y_t	-
Fall 2	$y_t = \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{l'} * y_{t-l'} + \sum_{l=0}^L \beta_l^1 * x_{t-l}^1 + u_t$ mit $y_t = (XR_{1,t}, \dots, XR_{J,t}, ME_{1,t}, \dots, ME_{J,t})^T$ und $x_t^1 = XE_t$	y_t	x_t^1
Fall 3	$y_t = \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{l'} * y_{t-l'} + \sum_{l=0}^L \beta_l^1 * x_{t-l}^1 + u_t$ mit $y_t = (XR_{1,t}, \dots, XR_{J,t}, ME_{1,t}, \dots, ME_{J,t})^T$ und $x_t^1 = XN_t$	y_t	x_t^1
Fall 4	$y_t = \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{l'} * y_{t-l'} + \sum_{l=0}^L \beta_l^1 * x_{t-l}^1 + \sum_{l=0}^L \beta_l^2 * x_{t-l}^2 + u_t$ mit $y_t = (XR_{1,t}, \dots, XR_{J,t}, ME_{1,t}, \dots, ME_{J,t})^T$, $x_t^1 = XE_t$ und $x_t^2 = XN_t$	y_t	x_t^1, x_t^2

Tabelle 3.2: Situationsspezifische Modifikationen des Grundmodells bei wechselseitigen Abhängigkeiten

Das Modell wird in den weiteren Fällen 2-4 um die Absatzmengen XE_t und/oder die Rücknahmemenge XN_t als exogene Variable $x_t^1 [J \times 1]$ oder als Variablen $x_t^1 [J \times 1]$ und $x_t^2 [J \times 1]$ erweitert²⁾, wenn diese nicht den Nachfrage- bzw. Rückflussmengen

¹⁾ In der Literatur ist eine häufigere Anwendung des VAR-Modells im Vergleich zum VARMA-Modell erkennbar.

²⁾ Aus modellierungstechnischen Gründen können die exogenen Variablen auch zu einem Vektor zusammengefügt werden, so dass das Modell die gleiche Form wie das Grundmodell aufweist. $x_t = [x_{1,t}^1, \dots, x_{J,t}^1, x_{1,t}^2, \dots, x_{J,t}^2]^T [2J \times 1]$ mit den Regressanden der exogenen Variable $\beta [J \times 2J]$.

entsprechen müssen. Rücknahme- und Absatzmenge haben als mögliche Handlungsalternative Einfluss auf das Rückflussbewältigungs- und Produktionsprogramm und müssen daher in die Prognose aufgenommen werden. Rücknahmemengen können durch Aufbereitung zusätzliche Nachfragemengen von Primär- und Sekundärprodukten induzieren und dadurch zusätzliche Rückflussmengen bedingen. Aufbereitete Güterrückflussprodukte, wie z.B. Refurbishing-Produkte, werden meist zu einem günstigeren Preis verkauft, so dass diese ein neues Marktsegment für den Hersteller eröffnen. Bei jeder weiteren zu berücksichtigenden exogenen Variablen erhöht sich die Anzahl der zu bestimmenden Regressanden um die Anzahl $(L+1) \times J \times J$.

Bei *einseitigen Abhängigkeiten* sind die Rückflussmengen XR_t einer Güterart j in Periode t (endogene Variable $y_t [J \times 1]$) von den Nachfragemengen ME_t abhängig, hingegen die Nachfrage nicht von den Güterrückflussmengen. Somit werden die Nachfragemengen in den folgenden Modellen als exogene Variablen modelliert. Die aus Tabelle 3.2 dargestellten Modelle werden um diesen Sachverhalt modifiziert (Tabelle 3.3).

Die drei möglichen exogenen Variablen $x_t^1 [J \times 1]$, $x_t^2 [J \times 1]$ und $x_t^3 [J \times 1]$, die die erklärenden Variablen der Absatz- ($XE_{j,t} [J \times 1]$), Nachfrage- ($ME_{j,t} [J \times 1]$) und der Rücknahmemenge ($XN_{j,t} [J \times 1]$) charakterisieren, gehen in das dynamische Mehrgleichungssystem ein. Mit jeder weiteren exogenen Variablen müssen $(L+1) \times J \times J$ weitere Regressionskoeffizienten im Vorfeld geschätzt werden.

Die Schätzung der Modellparameter vollzieht sich analog zum Vorgehen des Grundmodells. Bei nachgewiesener Stationarität können die Modelle in ursprünglicher Form mit den in Unterunterabschnitt 3.2.2.1 genannten Verfahren je nach Voraussetzungen geschätzt werden. Bei Nicht-Stationarität und nicht vorhandener Kointegration der Variablen sollte das nicht-stationäre Modell in ein stationäres Modell transformiert werden. Nicht-stationäre Modelle mit nachgewiesener Kointegration sollten in ein VECM überführt werden. Die Schätzung der Koeffizienten sowie der Verzögerungen eines VECM bei kointegrierten Variablen wird analog zu zuvor erläuteter Vorgehensweise bei SEM vollzogen.

	einseitige Abhängigkeiten	Variablen	
		endogen	exogen
Fall 1	$y_t = \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{l'} * y_{t-l'} + \sum_{l=0}^L \beta_l * x_{t-l} + u_t$ <p>mit $y_t = XR_t$ und $x_t^1 = ME_t$</p>	y_t	x_t^1
Fall 2	$y_t = \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{l'} * y_{t-l'} + \sum_{l=0}^L \beta_l^1 * x_{t-l}^1 + \sum_{l=0}^L \beta_l^2 * x_{t-l}^2 + u_t$ <p>mit $y_t = XR_t$, $x_t^1 = ME_t$ und $x_t^2 = XE_t$</p>	y_t	x_t^1, x_t^2
Fall 3	$y_t = \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{l'} * y_{t-l'} + \sum_{l=0}^L \beta_l^1 * x_{t-l}^1 + \sum_{l=0}^L \beta_l^2 * x_{t-l}^2 + u_t$ <p>mit $y_t = XR_t$, $x_t^1 = XE_t$ und $x_t^2 = XN_t$</p>	y_t	x_t^1, x_t^2
Fall 4	$y_t = \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{l'} * y_{t-l'} + \sum_{l=0}^L \beta_l^1 * x_{t-l}^1$ $+ \sum_{l=0}^L \beta_l^2 * x_{t-l}^2 + \sum_{l=0}^L \beta_l^3 * x_{t-l}^3 + u_t$ <p>mit $y_t = XR_t$, $x_t^1 = ME_t$, $x_t^2 = XE_t$ und $x_t^3 = XN_t$</p>	y_t	$x_t^1, x_t^2,$ x_t^3

Tabelle 3.3: Situationsspezifische Modifikationen des Grundmodells bei einseitigen Abhängigkeiten

3.3 Prognose

3.3.1 Endogene Größen

Ausgehend vom multivariaten Grundmodell¹⁾

$$XR_t = \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{l'} * XR_{t-l'} + \sum_{l=0}^L \beta_l * XE_{t-l} + u_t \quad (3.12)$$

wird im Folgenden das Prinzip der Prognosedurchführung bei einer vollständigen und unvollständigen Informationsbasis erläutert. Die Spezifikation des Prognosemodells liefert als Ergebnis die Lag-Ordnungen L' und L sowie die Regressanden γ und β . Diese werden als Parameter im Planungsmodell zur Kapazitätsdimensionierung verwendet, um die funktionalen Abhängigkeiten zwischen den Güterrückfluss- und Absatzmengen zu beschreiben. Erfolgt die Spezifikation anhand historischer Zeitreihen, wird die Zeitstabilitätshypothese zugrunde gelegt.

Für die *Prognose* der Güterrückflussmengen (endogene Variable) in Periode $t+t'$ gilt²⁾:

$$XR_{t+t'} = \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{l'} * XR_{t+t'-l'} + \sum_{l=0}^L \beta_l * XE_{t+t'-l} + u_{t+t'} \quad (3.30)$$

mit den prognostizierten Rückflussmengen $XR_{t+t'}$ für $t' > 0$. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass der Störterm ein weißes Rauschen ist. Da der Erwartungswert des weißen Rauschens „0“ beträgt, wird das Modell verkürzt:

$$XR_{t+t'} = \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{l'} * XR_{t+t'-l'} + \sum_{l=0}^L \beta_l * XE_{t+t'-l} \quad (3.31)$$

Hat der Entscheider die Möglichkeit über die Absatzmengen zu bestimmen, werden die exogenen Variablen XE_t nicht vom Prognosemodell bestimmt, sondern müssen als prognostizierte oder geplante Werte von außerhalb des Modells geliefert werden.

¹⁾ Die Prognose mit Hilfe des univariaten Grundmodells im Eindimensionalen erfolgt analog.

²⁾ Für weitere Erläuterungen zur Prognose mit SEM vgl. Lütkepohl (2005), S. 401 ff.

Die Absatzmengen werden durch das ökonomische Ziel im Planungsmodell zur Kapazitätsdimensionierung gekoppelt.

Im Rahmen der rollierenden Planung verbessert sich der Informationsstand der CLSC im Zeitablauf des Planungshorizontes. Realisierte Daten über unsichere Parameter und neue subjektive Erfahrungen bzw. Erkenntnisse stehen dem Entscheider zur Verfügung. Diese können im Rahmen der Spezifikation des Prognoseproblems zu einer Verbesserung der Modellschätzung führen. In der Prognosedurchführung werden abhängig vom Planungszeitpunkt und den funktionalen Beziehungen realisierte, geplante und auch prognostizierte Absatz- und Rückflussmengen einbezogen (siehe Abbildung 3.3).

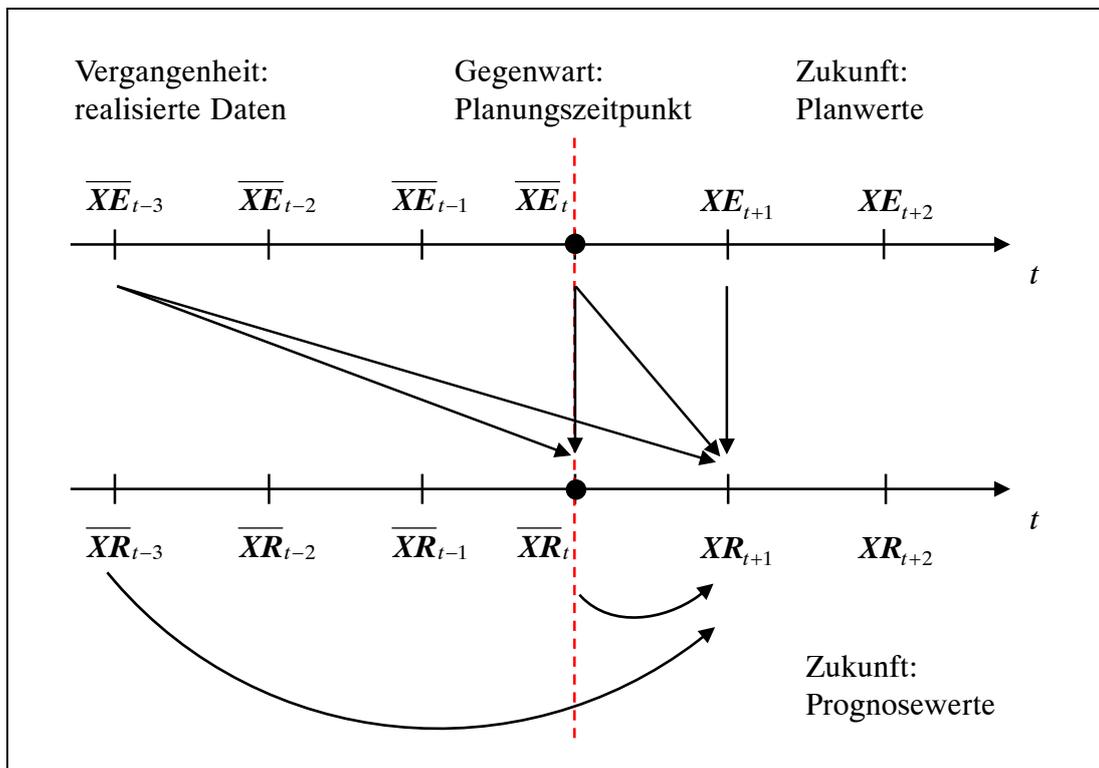


Abbildung 3.3: Struktur des Prognosemodells

In jedem Planungsschritt $1 < PS \leq \widehat{PS}$ wird der Prognosewert XR_{t+1} wie folgt berechnet:

$$XR_{t+1} = \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{l'} * \overline{XR}_{t+1-l'} + \sum_{l=1}^L \beta_l * \overline{XE}_{t+1-l} + \beta_0 * XE_{t+1} \quad (3.32)$$

mit den nach dem Planungsschritt $PS-1$ realisierten Rückflussmengen \overline{XR} und Absatzmengen \overline{XE} sowie den geplanten Absatzmengen XE_{t+1} .

Analog ergeben sich die Prognosewerte der Rückflussmengen im Zeitpunkt $t+t'$ für $t' > 1$:

$$\begin{aligned}
 XR_{t+t'} = & \left\{ \underbrace{\sum_{l'=1}^{t'-1} \gamma_{l'} * XR_{t+t'-l'} + \sum_{l'=t'}^{L'} \gamma_{l'} * \overline{XR}_{t+t'-l'}}_{1 < t' \leq L'} \vee \underbrace{\sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{l'} * XR_{t+t'-l'}}_{t' > L'} \right\} \\
 & \underbrace{\qquad\qquad\qquad}_{\text{endogen}} \qquad\qquad\qquad \forall t+t' \leq T \quad (3.33) \\
 + & \left\{ \underbrace{\sum_{l=0}^{t'-1} \beta_l * XE_{t+t'-l} + \sum_{l=t'}^L \beta_l * \overline{XE}_{t+t'-l}}_{1 < t' \leq L} \vee \underbrace{\sum_{l=0}^L \beta_l * XE_{t+t'-l}}_{t' > L} \right\} \\
 & \underbrace{\qquad\qquad\qquad}_{\text{exogen}}
 \end{aligned}$$

Abhängig vom zeitlichen Abstand des Prognosezeitpunktes $t+t'$ zum Planungszeitpunkt t werden im Erklärungsteil der endogenen Variablen entweder realisierte und prognostizierte Rückflussmengen (für $1 < t' \leq L'$) oder ausschließlich prognostizierte Rückflussmengen (für $t' > L'$) einbezogen. Die Lag-Indizes l' und l charakterisieren, welche zeitlichen Kopplungen relevant für die Prognose sind. Im Erklärungsteil der exogenen Variablen gehen entweder realisierte und geplante Absatzmengen (für $1 < t' \leq L$) oder ausschließlich geplante Absatzmengen (für $t' > L$) ein.

Abhängig von der vorliegenden Planungssituation (I-IV) und der Abhängigkeit der Rückfluss- und Nachfragemengen (einseitig oder wechselseitig) wird die genannte Prognosedurchführung (3.32 bzw. 3.33) angepasst. Durch die in den vorherigen Kapiteln erschlossenen Kenntnisse ergeben sich bei einseitigen Abhängigkeiten zwei getrennte Prognoseprobleme, wobei die Nachfragemengen als exogene Variable in die Prognose der Rückflussmengen eingehen können. Bei wechselseitigen Abhängigkeiten hingegen bilden beide Parameter ein gemeinsames Prognosemodell, das abhängig von der Planungssituation noch weitere Einflussfaktoren beinhalten kann. Unabhängig davon, ob die Nachfragemengen ME_t als endogene oder exogene Variablen modelliert werden, haben realisierte \overline{ME} und prognostizierte Nachfragemengen ME oder nur prognostizierte Nachfragemengen ME Einfluss auf die endoge-

nen Variablen. Der einzige Unterschied besteht darin, dass die Prognosewerte entweder endogen bestimmt werden oder außerhalb des Planungsmodells bestimmt werden und als Parameter eingehen. Die Rücknahmemengen XN werden in den relevanten Planungssituationen als exogene Variable modelliert. In der Prognosedurchführung haben (wie im Falle der Absatzmengen) realisierte \overline{XN} und geplante Rücknahmemengen XN oder nur geplante Rücknahmemengen XN Einfluss auf die endogenen Variablen.

Bei einem Entscheidungsfeld *unter Unsicherheit* und unter der Verwendung der stochastischen Optimierung existiert das vorliegende Prognoseproblem (3.31) für jedes vorliegende Szenario $s = 1, \dots, S$ (siehe Abbildung 3.4).

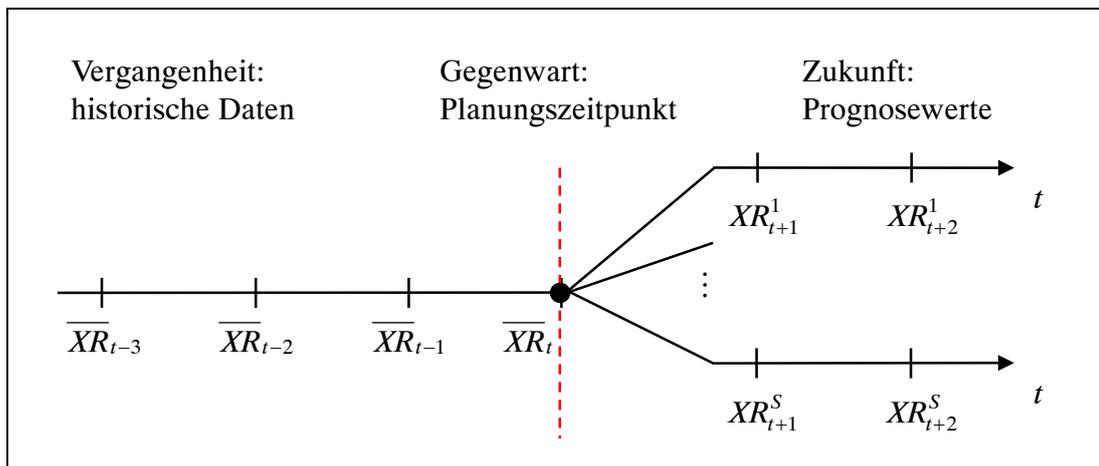


Abbildung 3.4: Prognose unter Unsicherheit

Damit gilt für die Rückflussprognose im Zeitpunkt $t + t'$

$$XR_{t+t'}^s = \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{l'} * XR_{t+t'-l'}^s + \sum_{l=0}^L \beta_l * XE_{t+t'-l}^s \quad (3.31')$$

mit den szenarioabhängigen prognostizierten Rückflussmengen XR^s als endogene und den geplanten szenarioabhängigen Absatzmengen XE^s .

Im Rahmen der Szenariengenerierung, die die zukünftige Entwicklung der unsicheren Parameter XR_t^s und ME_t^s beschreiben, kommen grundsätzlich zwei Verfahren zum Einsatz: die Generierung von Datenströmen auf Grundlage geeigneter Modelle (ökonometrische Modelle und Zeitreihen, Diffusionsprozesse und andere Methoden

wie z.B. neuronale Netze) oder die Diskretisierung von Verteilungen anhand der Approximation von statistischen Charakteristika (statistische Approximation z.B. Moment-matching oder das Sampling (z.B. Random Sampling))¹⁾.

Im Prognoseproblem unter Unsicherheit können zwei Komponenten Berücksichtigung finden: *Systematische Unsicherheiten* werden z.B. in Form von Expertenerwartungen über zukünftige Entwicklungen bzgl. der Güterrückflüsse und/oder Absatzhöchstmengen miteinbezogen. Sowohl bei den ökonometrischen Modellen als auch bei den parametrischen Wachstumsfunktionen können die systematischen Unsicherheiten mit Hilfe der Variation der Regressanden bzw. Parameter abgebildet werden. *Unsystematische Unsicherheiten* spiegeln zufällige Schwankungen wider, die anhand der Modellierung von Störtermen u_t^s Beachtung finden. Diese beschreiben die Abweichungen vom idealtypischen Verlauf, der sich durch die Beschreibung der systematischen Unsicherheiten ergibt. Aufgrund von Interpolationsfehlern und der Kovarianzmatrix der Störterme bei den ökonometrischen Modellen lassen sich (z.B. bei der Monte-Carlo-Simulation) Störterme für jeden Zeitpunkt berechnen.

Bei der Interpolation gibt die Berechnung der Varianz σ^2 der Modellanpassung Auskunft über die Eignung des Prognosemodells. Auf Grundlage der Standardabweichung lässt sich der hinreichende Stichprobenumfang SU mit einer Genauigkeit e und einem gewählten Quantil der Standardnormalverteilung θ anhand folgender Funktion berechnen:

$$SU \geq \frac{\theta^2 \cdot \sigma^2}{e^2} \quad (3.34)$$

Durch die Anwendung einer Szenarioreduktion oder -aggregation kann die Anzahl der Szenarien beschränkt werden.

¹⁾ Vgl. Di Domenico et al. (2007), S. 2208.

3.3.2 Exogene Größen

Da die Kapazitätsdimensionierung ein Teilproblem der taktischen Planung darstellt, sind längerfristige Entwicklungen für die Planung relevant. In den multivariaten Modellen und bei wechselseitigen Abhängigkeiten werden die Nachfragemengen ME_t durch das Modell erklärt (endogene Variable). Aufgrund der Zeitstabilitätshypothese und der Struktur des Prognosemodells werden bisherige Entwicklungen weiter fortgeschrieben und längerfristige Entwicklungen unter Umständen nicht mit einbezogen. Sind die Nachfragemengen zudem von den Güterrückflussmengen unabhängig, wird diese zu einer exogenen Variable, die außerhalb des Systems prognostiziert wird. Somit wird bei der Prognose der Rückflussmengen die Prognose der exogenen Variablen vorausgesetzt. Im Folgenden werden Modelle vorgestellt, die die Nachfragemengen prognostizieren können.

Neben den in den vorherigen Abschnitten erläuterten Prognosemodellen, die auf der Theorie der autoregressiven Prozesse beruhen, liegen noch weitere geeignete Modelle vor, die längerfristige Entwicklungen von Absatzverläufen prognostizieren können. Ein Modell, das die Absatz- oder Umsatzentwicklung während der Lebensdauer eines Produktes beschreibt, ist der Produktlebenszyklus mit den Phasen Einführung, Wachstum, Reife, Sättigung und Degeneration. Zur Prognose des Produktlebenszyklus wird in der Literatur insbesondere auf *parametrische Wachstumsfunktionen* verwiesen¹⁾. Diese Modelle sind mit den Sättigungsmodellen verwandt (siehe Abbildung 3.5).

¹⁾ Vgl. Fischer (2001), S. 27 ff., der darauf hinweist, dass die alternativ vorgeschlagenen Diffusionsmodelle auf Marktlebenszyklen fokussieren.

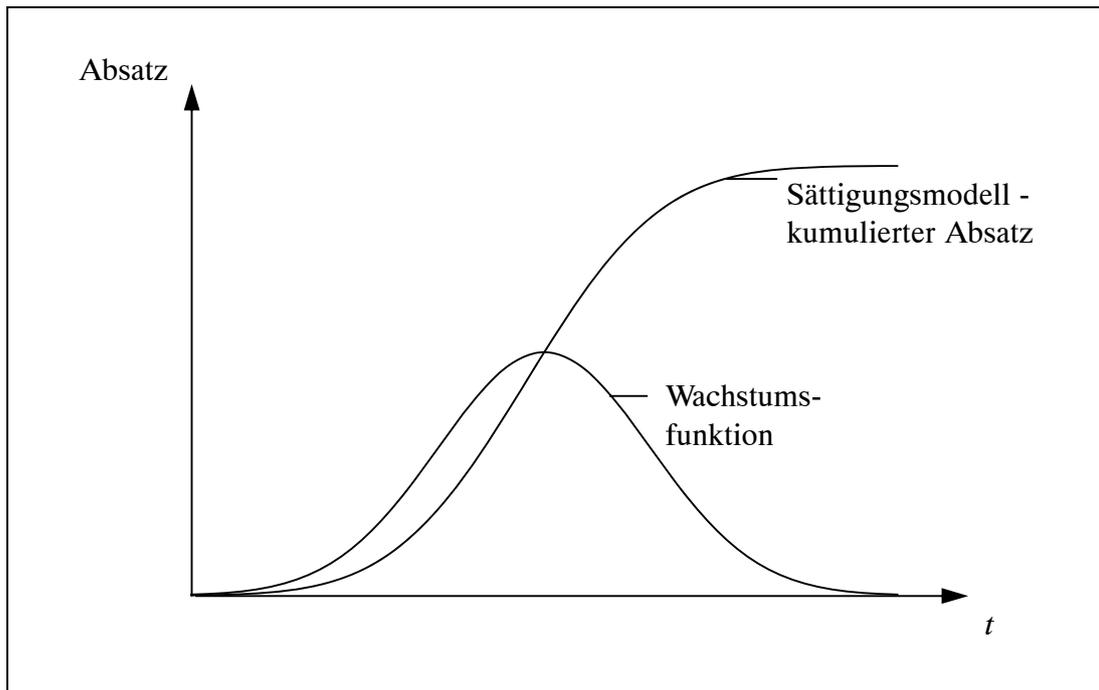


Abbildung 3.5: Wachstums- und Sättigungsmodell¹⁾

Die Wachstumskurve wird durch die Lage ihres Wendepunktes charakterisiert. Dabei ist der Kurvenverlauf um den Wendepunkt von großem Interesse. Abhängig von der Funktionsschiefe (Eintritt der Sättigungsphase im Produktlebenszyklus) folgen die Grundmodelle der Sättigungsmodelle (bzw. Diffusionsmodelle) einen symmetrischen oder asymmetrischen Verlauf. Beispiele für symmetrische Grundmodelle sind das Logistische oder das Exponentielle Modell. Modelle mit asymmetrischem Verlauf um den Wendepunkt sind das Bass- und das Gompertz-Modell. Erweiterungen bzw. Modifikationen dieser Modelle ergeben sich durch die Berücksichtigung weiterer Einflussfaktoren (z.B. exogene Einflussfaktoren), durch Informationszuwachsen im Zeitablauf, durch eine Flexibilisierung des Modells und durch die Modellierung von Erstkäufen²⁾.

Der Prognosewert $ME_{j,t+t'}$ der zukünftigen Nachfragemengen der Güterart j wird dabei durch die Wachstumskurve $LC(\cdot)$ bestimmt, so dass gilt:

¹⁾ Angelehnt an Mertens (2012), S. 184.

²⁾ Eine genaue Übersicht über verschiedene Arten von Sättigungsmodellen vgl. Mertens (2012), S. 183 ff.

$$ME_{j,t+t'} = LC_j(t+t') \quad (3.35)$$

Eine weitere Methode zur Prognose des zukünftigen Absatzes bzw. der zukünftigen Nachfrage ist das Vorgehen der Interpolation. Dabei kann auf der Grundlage der Vergangenheitsdaten ähnlicher Produkte eine Wachstumsfunktion berechnet werden, die sich den Daten optimal anpasst. Die im Verlaufe der Planumsetzung zusätzlich verfügbar werdenden Ist-Werte der aktuellen Güterarten können für ein Update der Wachstumsfunktionen herangezogen werden, so dass sie sich dem tatsächlichen Verlauf anpasst. Neben den *polynomialen Wachstumsfunktionen*¹⁾ weist das *Kluyver-Modell*²⁾

$$LC(t) = a_1 \cdot t^{a_2} \cdot e^{a_3 \cdot t + a_4 \cdot t^2 + a_5 \cdot t^3} \quad (3.36)$$

einen hohen Allgemeinheitsgrad auf. Es kann als Referenzmodell herangezogen werden, aus dem durch eine Parameterwahl spezielle Wachstumsmodelle, wie das Lifer-Modell oder das Brockhoff-Modell, resultieren³⁾. Eine Schätzung des Kluyver-Modells kann nach einer Log-Transformation mit Hilfe von Least-Squares-Methoden erfolgen. Aufgrund der Vielzahl zu schätzender Parameter ist jedoch die Stabilität der Schätzung gefährdet (Kollinearität). Um dies zu vermeiden, bietet es sich an, vorab die empirischen Daten im Hinblick auf die Eignung spezieller Wachstumsmodelle zu testen (z.B. mit Hilfe des Likelihood-Ratio-Tests)⁴⁾. So ist dann etwa das *Brockhoff-Modell*⁵⁾ ($a_4 = 0, a_5 = 0$) für den Einproduktfall

$$LC(t) = a_1 \cdot t^{a_2} \cdot e^{-a_3 \cdot t} \quad (3.37)$$

nach einer Log-Transformation relativ einfach mit linearen Least-Squares-Methoden zu schätzen. Der Verlauf der Nachfrage wird bei der Brockhoff-Funktion durch die Variablen a_1 , a_2 und a_3 bestimmt. Über den Parameter a_1 wird die Höhe der Kurve

1) Vgl. Fischer (2001), S. 56 ff.

2) Vgl. de Kluyver (1977).

3) Vgl. Fischer (2001), S. 63.

4) Vgl. Fischer (2001), S. 63.

5) Vgl. Brockhoff (1966), S. 113.

variiert, der Parameter a_2 beschreibt die Schiefe der Funktion und Parameter a_3 die Stauchung der Funktion.

Eine weitere geeignete Methode zur Extrapolation des Produktlebenszyklus einer Güterart stellen die bereits ausführlich diskutierten autoregressiven Modelle (z.B. ARIMA, ADL, DL, usw.) dar. Die Parameterschätzung erfolgt durch Interpolation auf Grundlage ähnlicher Produkte. Hier ist ein Beispiel eines $AR(L')$ -Prozesses abgebildet, so dass die zukünftige Nachfrage durch folgende Funktion beschrieben werden kann (mit Absolutterm ζ):

$$ME_{j,t} = \zeta + \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{l'} * ME_{j,t-l'} + u_{j,t} \quad \forall j, t-l' > 0 \quad (3.38)$$

Die Wahl eines geeigneten Verfahrens zur Abbildung längerfristiger Entwicklungen des Absatzpotentials hängt von den zugrundeliegenden Informationen ab. Während bei den Diffusionsmodellen Annahmen bzgl. des Käuferverhaltens vorliegen müssen, ist die Grundidee der Schätzung von parametrischen Wachstumsmodellen die Interpolation einer Funktion an empirischen Daten. Die einzig erklärende Variable ist in diesem Fall die Zeit. Bei der Anwendung von autoregressiven Modellen zur Interpolation des Produktlebenszyklus liegt die Annahme zugrunde, dass sich der Nachfrageverlauf durch endogene oder exogene Variablen über zeitliche Rückkopplungen erklären lässt.

3.4 Besonderheiten der Integration des Prognose- in das Planungsmodell

3.4.1 Handhabung unrealistischer Prognosewerte

Aufgrund der Berücksichtigung von Informationszuwächsen im Planungsablauf muss die optimale Spezifikation des Prognosemodells sichergestellt werden, d.h., dass die Parameter des Prognosemodells so gewählt werden, dass das Modell sich optimal an gegebene Werte, gemäß des Schätzverfahrens, anpasst. Aus diesem Grund ist eine laufende Überprüfung der gewählten Lag-Ordnungen und Schätzung der Regressionskoeffizienten des ökonometrischen Prognosemodells notwendig. Die Prognosegüte und damit auch die Planungsgenauigkeit sind von der Qualität der bei

der Planung zugrunde gelegten Informationsbasis für die endogenen und exogenen Variablen abhängig. Bei der Festlegung der Informationsbasis der produktspezifischen Zeitreihen wie Nachfrage- ME_t , Absatz- XE_t , Rückfluss- XR_t und Rücknahmemengen XN_t ist der Bekanntheitsgrad des Produktes für die Unternehmung oder Branche ein entscheidender Faktor.

Bei einem Neuprodukt wird die Schätzung dadurch erschwert, dass noch keine realisierten Zeitreihen bestehen. In diesem Fall kann der Planer bei der Schätzung entweder auf ähnliche Produkte, deren Zeitreihen bekannt sind, zurückgreifen oder versuchen, die Parameter aufgrund seiner Expertise zu schätzen. Eine geeignete Vorgehensweise bei der Initialprognose ist die Nutzung der Zeitreihen des Vorproduktes. Diese können durch eine abweichende Expertenmeinung modifiziert werden. Diejenigen Zeitreihen, die zur Aktualisierung der Regressionskoeffizienten des Prognosemodells genutzt werden, werden in jedem Planungslauf um die Anzahl der für das Neuprodukt realisierten Werte aktualisiert.

Treten starke Abweichungen der realisierten Zeitreihen des Neuproduktes von der Initialprognose der Nachfrage-, Absatz-, Rückfluss- und Rücknahmemengen auf, kann es durch die Aktualisierung zu Strukturbrüchen kommen. Somit ist die anfängliche Prognosequalität niedrig. Dieser Effekt wird durch die Aktualisierung der Planungsgrundlage (sukzessives Austauschen der Initialprognosewerte) mit weiter fortschreitendem Planungshorizont abgeschwächt.

Strukturbrüche können mit Prognosewerten einhergehen, die in der Realität nicht eintreten können (z.B. negative Rückflussmengen). Die Eintrittswahrscheinlichkeit dieses Falles ist umso höher, je niedriger die zu erwartenden Mengen sind. In der Planung werden deshalb prognostizierte Rückflussmengen als reellwertige Größen $XR_t \in \mathbb{R}$ berücksichtigt, wobei negative Prognosewerte mit dem Wert 0, also dem Nicht-Eintreten von Güterrückflüssen, berücksichtigt werden. Somit ist eine Fallunterscheidung bzgl. der Rücknahmemengen zu treffen. Prognostizierte Rückflussmengen mit positiven Vorzeichen bilden die Obergrenze für die Rücknahmemengen, andernfalls ist die Rücknahmemenge 0:

$$XN_t \begin{cases} \leq XR_t, & \text{für } XR_t \geq 0 \\ = 0, & \text{für } XR_t \leq 0 \end{cases} \quad \forall t \quad (3.39)$$

Diese Fallunterscheidung stellt einen nicht-linearen Zusammenhang im Planungsmodell dar, der linearisiert werden kann. Die Linearisierung ist jedoch davon abhängig, welche Planungssituation vorliegt.

In den *Planungssituation I* und *II* bestehen keine Entscheidungsmöglichkeiten bzgl. der Rücknahme. Der Entscheider muss alle Güterrückflussmengen zurücknehmen:

$$XN_t = XR_t \quad \forall t \quad (2.4')$$

Zur Linearisierung der oben beschriebenen Nebenbedingungen (3.39) werden eine neue Variable $\delta_{j,t} \in \{0;1\}$ (mit Güterarten $j = 1, \dots, J$ und Perioden $t = 1, \dots, T$) und ein Parameter M (sehr große Zahl) eingeführt. In dieser Situation werden drei zusätzliche Nebenbedingungen modelliert, die ins Planungsmodell eingefügt werden. Die Gleichungen (3.40) und (3.41) erzwingen die Gleichheit der Rückfluss- und Rücknahmemenge, wenn die Rückflussmenge positiv ist. Es gilt auch, dass in dem Fall von negativen prognostizierten Rückflussmengen die Variable δ gleich 0 gesetzt wird. In diesem Fall ist die Rücknahmemenge auf jeden Fall größer als die Rückflussmenge, weil sie als reell-positive Zahl definiert ist ($XN_t \in \mathbb{R}_0^+$). Durch die dritte Gleichung wird, wie gefordert, eine Rücknahmemenge von 0 realisiert. Bei positiven prognostizierten Rückflussmengen kann die Binärvariable δ aufgrund der zweiten Gleichung nicht den Wert 0 annehmen. Bei positiven Rückflussmengen gilt somit: $XN_t = XR_t$. Damit ist die letzte Gleichung (3.42) auch erfüllt, da die Rücknahmemenge auf jeden Fall kleiner ist als eine vorher festgelegte große Zahl.

$$XN_t \leq XR_t + (1 - \delta_t) \cdot M \quad \forall t \quad (3.40)$$

$$XN_t \geq XR_t \quad \forall t \quad (3.41)$$

$$XN_t \leq \delta_t \cdot M \quad \forall t \quad (3.42)$$

In den *Planungssituationen III* und *IV* gilt, dass der Entscheider die Höhe der Rücknahmemengen der Güterrückflüsse bestimmen kann:

$$XN_t \leq XR_t \quad \forall t \quad (2.4)$$

Zur Linearisierung des Terms (3.39) werden die Nebenbedingungen (3.40) und (3.42) beibehalten. Aufgrund der zusätzlichen Entscheidungsmöglichkeiten entfällt Formel (3.41). Bei positiven prognostizierten Rückflussmengen erzwingen die Gleichungen (3.40) und (3.42) bei geplanten positiven Rücknahmen (ökonomisch vorteilhaft zur Verarbeitung) eine Festsetzung von $\delta = 1$. Somit gewährt die zweite Gleichung einen Rücknahmewert von größer als 0. Bei negativen prognostizierten Rückflussmengen wird bei der ersten Formel (3.40) eine Festsetzung von $\delta = 0$ erzwungen, da die Rücknahmen positiv sind ($XN_t \in \mathbb{R}_0^+$) und durch die Addition eines hinreichend großen Wertes M zu einem negativen Rückflusswert die Einhaltung eines positiven Rücknahmewertes gewährleistet wird. Bei $\delta = 0$ wird die Rücknahmemenge aufgrund der zweiten Gleichung gleich 0 gesetzt. Dort wird in diesem Fall die Obergrenze mit 0 festgelegt. Wenn die Rücknahme für den Entscheider ökonomisch nicht vorteilhaft ist, wird die Rücknahmemenge den Wert 0 betragen. Damit kann die Variable δ bei positiven prognostizierten Rückflussmengen den Wert 0 oder 1 annehmen. Da nicht bekannt ist, welche Auswirkungen diese „Unentschlossenheit“ bei positiven prognostizierten Rückflussmengen auf die Lösungszeit hat, wird folgende Gleichung hinzugefügt:

$$XR_t \leq \delta_t \cdot M \quad \forall t \quad (3.43)$$

Mit dieser Gleichung wird sichergestellt, dass die Variable δ bei positiven prognostizierten Güterrückflussmengen den Wert von 1 annimmt. Durch diese zusätzliche Gleichung sind somit alle Entscheidungen bzgl. der Variable δ eindeutig. Das Hinzufügen der Gleichung (3.45) auch bei Situation I und II bringt keine Veränderung bei den aufgezeigten Entscheidungswegen. Bei negativen prognostizierten Rückflussmengen wird auch bei ökonomisch nicht vorteilhaften Rückflussmengen $\delta = 0$ erzwungen.

3.4.2 Handhabung nicht stationärer Zeitreihen

Haben die im Grundmodell (3.12) beschriebenen Zeitreihen aufgrund ihrer Nicht-Stationarität eine Ordnung, die größer als 0 ist, müssen die Zeitreihen vor Schätzung des Modells differenziert werden. Das zu schätzende multivariate Modell hat nach der Differenzierung die Form

$$\Delta^{d_1} \mathbf{XR}_t = \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{l'} * \Delta^{d_1} \mathbf{XR}_{t-l'} + \sum_{l=0}^L \beta_l * \Delta^{d_2} \mathbf{XE}_{t-l} + \mathbf{u}_t \quad (3.12')$$

mit den differenzierten Rückflussmengen $\Delta^{d_1} \mathbf{XR}$ der Ordnungen $d_1 = \{d_{1,1}, \dots, d_{1,J}\}$ und differenzierten Absatzmengen $\Delta^{d_2} \mathbf{XE}$ der Ordnungen $d_2 = \{d_{2,1}, \dots, d_{2,J}\}$. Jede Zeitreihe der Rückfluss- bzw. Absatzmengen der Güterart j kann durch einen andere Ordnung charakterisiert sein. Die geschätzten Regressionsparameter des Modells (3.12') beschreiben demnach funktionale Abhängigkeiten zwischen den differenzierten Zeitreihen der endogenen und exogenen Variablen.

Werden die geschätzten Regressionsparameter als Inputparameter für das integrierte Prognoseproblem verwendet, müssen die im Planungsmodell modellierten Variablen der Rückfluss- und Absatzmengen in differenzierter Form im Prognosemodell Berücksichtigung finden. Somit wird das Modell (3.30) für die t' -Schritt-Prognose wie folgt angepasst:

$$\Delta^{d_1} \mathbf{XR}_{t+t'} = \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{l'} * \Delta^{d_1} \mathbf{XR}_{t+t'-l'} + \sum_{l=0}^L \beta_l * \Delta^{d_2} \mathbf{XE}_{t+t'-l} + \mathbf{u}_{t+t'} \quad (3.30')$$

Für die differenzierten Zeitreihen gelten spezielle Definitionen, die im Planungsmodell hinzugefügt werden. Abhängig von der Ordnung gilt für die Rückflussmengen:

- Ordnung 0:

$$\Delta^0 \mathbf{XR}_{j,t} = \mathbf{XR}_{j,t}$$

- Ordnung 1:

$$\Delta^1 \mathbf{XR}_{j,t} = (1 - B) \mathbf{XR}_{j,t} = \mathbf{XR}_{j,t} - \mathbf{XR}_{j,t-1}$$

- Ordnung 2:

$$\Delta^2 XR_{j,t} = \Delta^1 XR_{j,t} - \Delta^1 XR_{j,t-1} = XR_{j,t} - 2XR_{j,t-1} + XR_{j,t-2}$$

Für die Absatzmengen gilt analog:

- Ordnung 0:

$$\Delta^0 XE_{j,t} = XE_{j,t}$$

- Ordnung 1:

$$\Delta^1 XE_{j,t} = (1-B) XE_{j,t} = XE_{j,t} - XE_{j,t-1}$$

- Ordnung 2:

$$\Delta^2 XE_{j,t} = \Delta^1 XE_{j,t} - \Delta^1 XE_{j,t-1} = XE_{j,t} - 2XE_{j,t-1} + XE_{j,t-2}$$

Für die erweiterten Prognoseprobleme, in denen die Absatzhöchstmengen ME_t und die Rücknahmemengen XN_t als weitere Einflussfaktoren der endogenen Variablen modelliert werden, müssen die genannten Aspekte ebenfalls berücksichtigt werden.

Beim klassischen Lebenszyklus, der eine glockenähnliche Form anstrebt, kann davon ausgegangen werden, dass die Zeitreihen der Absatz-, Nachfrage-, Rückfluss- und Rücknahmemengen höchstens der zweiten Ordnung integriert sind. Andere Ordnungen sind aufgrund unterschiedlicher Marktstrategien (z.B. früherer oder späterer Einführungszeitpunkt des Folgeproduktes) nicht auszuschließen.

4 Numerische Analyse

4.1 Zielsetzung

Die numerische Analyse bezieht sich auf eine rollierende Dimensionierung der für den Hin- und Rückfluss eines neuen Produktes im gesamten Produktlebenszyklus benötigten Kapazität. Die rollierende Planung baut auf (hypothetischen, aber nicht unrealistischen) Daten der Nachfrage- und Rückflussmengen eines ähnlichen Vorgängerproduktes und den sukzessive bekanntwerdenden Daten der realisierten Nachfrage- und Rückflussmengen eines Neuproduktes auf. Ziel ist es, die Funktionsfähigkeit des Planungsansatzes in unterschiedlichen Planungssituationen und bei Vorliegen einer unvollkommenen Informationsbasis bzgl. der Nachfrage- und Rückflussmengen zu untersuchen. Die unterschiedlichen Planungssituationen determinieren das Entscheidungsfeld des Planers und das bei der Planung einzusetzende Prognosemodell. Zentrale Voraussetzungen sind dabei eine Prognose des gesamten Produktlebens- und -rückflusszyklus sowie die adäquate Berücksichtigung der aus der Prognose hervorgehenden unsicheren Aussagen über zukünftige Güterflussmengen im Planungsmodell. Insbesondere wird analysiert, in welchem Ausmaß sich (1) die Prognosequalität und (2) der Einsatz von flexiblen Ressourcen auf die mit der Planumsetzung realisierten Beobachtungsgegenstände auswirken. Beobachtungsgrößen sind die Berechnungszeiten, der realisierte Kapitalwert, die Ergebnisrobustheit und die Planungsrobustheit in Abhängigkeit von den Charakteristika der CLSC und der Informationsbasis:

Ausgangsbasis der Modellbeschreibung sind die unterschiedlichen Planungssituationen der CLSC, die sich durch die unterschiedlichen Handlungsmöglichkeiten bzgl. der Nachfrageerfüllung und Güterrücknahme der CLSC ergeben. Im Folgenden werden die zwei gegensätzlichsten Situationen untersucht: Situation I (keine Handlungsmöglichkeiten bzgl. der Rücknahme- und Absatzmengen) und Situation IV (freie Entscheidung bzgl. der Rücknahme- und Absatzmengen). Situation II und III ergeben sich als Spezialfälle der Situation IV, in denen nur eine Handlungsmöglichkeit gegeben ist.

Situation I	Situation IV
$XN_t = XR_t$	$XN_t \leq XR_t$
$XE_t = ME_t$	$XE_t \leq ME_t$

Tabelle 4.1: Zugrunde gelegte Planungssituationen

Die Planung baut auf einer Minimalstruktur auf, welche die wesentlichen Eigenschaften einer CLSC aufweist. Diese umfasst alle autonom und abhängig disponierbaren Güterflüsse, mehrere Güterrückflussarten und mehrere Transformationsmöglichkeiten. Zudem sind alle Mengen-, Kosten- und Kapazitätswirkungen der Transformationen sowie die wertmäßigen Wirkungen der Güterarten auf der operativen Ebene bekannt. Für die Planung der Nachfrage und Rückflussmenge sind hypothetische Daten der Absatz-, Nachfrage-, Rückfluss- und Rücknahmemengen des Vorproduktes gegeben. Diese Informationen sind Grundlage zur Bestimmung der integrierten Prognosemodelle. Die vorliegenden Planungssituationen determinieren unterschiedliche Annahmen für die Prognosemodelle. Da sich die Nachfrage des Neuproduktes aufgrund von verändernden Umweltsituationen von dem des Vorproduktes unterscheiden kann, werden für die Nachfragerealisation unterschiedliche Nachfragekonstellationen getestet, um die Auswirkungen der Prognosequalität auf die Beobachtungsgrößen zu analysieren. (1) Prognosefehler ergeben sich durch Fehleinschätzungen des Experten bzgl. der zukünftigen Nachfrage. Um die Auswirkungen von systematischen Unsicherheiten (Niveauveränderungen) numerisch zu analysieren, wird die Relation zwischen tatsächlicher Nachfrage und Experteneinschätzung systematisch variiert. Unsystematischen Unsicherheiten werden durch die Modellierungen von zufälligen Störtermen Rechnung getragen. Eine zuverlässige Prognose liegt dann vor, wenn die Experten die Niveauverschiebung der zukünftigen Nachfrage richtig einschätzen. Bei der Planung wird die unsichere Nachfrage (unvollkommene Information) anhand von Szenarien (Expertenmeinung) berücksichtigt.

(2) Zudem wird auf taktischer Ebene die Möglichkeit gegeben, in Potentialfaktoren mit unterschiedlicher Flexibilität zu investieren, um deren Einsatz bei einer unvollständigen Informationsbasis zu analysieren. Abhängig von ihrer Eignung unterschei-

den sie sich in der Kostenstruktur für die Kapazitätsanpassungsmaßnahmen (Expansion und Kontraktion). Unterschiedliche Flexibilitätsgrade der einzusetzenden Potentialfaktoren werden in verschiedenen Szenarien mit unterschiedlichen variablen Auszahlungen für die Kapazitätsanpassung je nach eingesetztem Potentialfaktor systematisch variiert.

In Bezug auf die zwei zu untersuchenden Planungssituationen, die durch die Entscheidungsmöglichkeiten charakterisiert sind, werden folgende Vermutungen hinsichtlich der Beobachtungsgrößen aufgestellt und begründet. Diese Vermutungen beziehen sich auf die zu untersuchenden Beobachtungsgegenstände *Berechnungszeiten*, *realisierter Kapitalwert*, *Ergebnisrobustheit* und *Planungsrobustheit*. Es werden Unterschiede zwischen den beiden Planungssituationen herausgearbeitet, indem das Ausmaß der Beobachtungen in Relation zu den Veränderungen der einzelnen Nachfrage-, Auszahlungs- und Flexibilitätskonstellationen analysiert wird. Anschließend wird im Abschnitt 4.4 überprüft, ob sich die Vermutungen in den Planungsergebnissen widerspiegeln. Eine inferenzstatistische Untersuchung ist in diesem Kontext unzureichend, denn das Ziel der Analyse ist es, erste Aussagen über das allgemeine Modellverhalten zu generieren.

Die nun folgenden Vermutungen sind durch die zugrunde liegenden Planungssituationen und den damit determinierten Handlungsmöglichkeiten der Unternehmung sowie der vorliegenden Informationsbasis begründet. Es werden generelle Vermutungen über die Beobachtungen in Bezug auf die beiden Situationen aufgestellt. Anschließend werden Ahnungen hinsichtlich der Wirkung der systematisch variierenden Testparameter auf die Indikatoren aufgestellt. Bzgl. der *durchschnittlichen Berechnungszeiten* werden folgende Vermutungen formuliert.

- *Vermutung 1.1:*

Die durchschnittlichen Berechnungszeiten sind in Planungssituation I geringer als in Situation IV. Aufgrund von weniger Freiheitsgraden in Bezug auf die Absatz- und Rücknahmemengen (vollständige Nachfragebedienung und Güterrückflusszurücknahme) ist der Umfang an Entscheidungsvariablen des mathematischen Planungsmodells und der Variablen und Parameter des Prognosemodells in Planungssituation I kleiner als in Situation IV. Das Lösungsverfahren muss weniger

mögliche Entscheidungskombinationen überprüfen, so dass die Berechnung einer optimalen Lösung weniger Zeit in Anspruch nimmt.

- *Vermutung 1.2:*

Die Möglichkeit in flexible Ressourcen zu investieren hat keinen positiven Effekt auf die Berechnungszeit. Mit steigendem Flexibilitätsgrad der Ressourcen erhöht sich die durchschnittliche Berechnungszeit, da die Anzahl möglicher Entscheidungskombinationen ansteigt.

Es werden folgende Vermutungen für beide Planungssituationen bzgl. des *realisierten Kapitalwerts* aufgestellt:

- *Vermutung 2.1:*

Der *durchschnittlich realisierte Kapitalwert* ist in Planungssituation IV bei zuverlässiger Prognose höher als in Planungssituation I. In Planungssituation IV bestehen höhere Freiheitsgrade in Bezug auf die Absatz- bzw. Rücknahmemengen. Insbesondere können häufige Zahlungen zur Nachfragebedienung und Rückflussannahme vermieden werden, die durch unsystematische Unsicherheiten verursacht werden.

- *Vermutung 2.2:*

Der durchschnittlich realisierte Kapitalwert ist umso höher, je zuverlässiger die Prognose ist. Überschätzungen des Kapazitätsbedarfes gehen mit höheren (Des-) Investitionsauszahlungen einher, die zusätzlich aufgebaute Kapazität wird jedoch nicht ausgelastet und deshalb in späteren Perioden wieder abgebaut. Unterschätzungen des Kapazitätsbedarfes haben niedrigere (Des-) Investitionsauszahlungen zur Folge. Die unzureichende Kapazität reduziert jedoch die laufenden Zahlungsüberschüsse und die Möglichkeiten einer günstigeren Materialbeschaffung aus dem Güterrückfluss, weil die Nachfrage und der Rückfluss nicht vollständig genutzt werden können.

- *Vermutung 2.3:*

Der realisierte Kapitalwert ist größer, wenn Potentialfaktoren mit einem großen Einsatzspektrum eingesetzt werden. Die Unternehmungen können sich aufgrund des breiten Einsatzspektrums der flexiblen Ressourcen besser als mit dem Einsatz von starren Ressourcen an verändernde Umweltsituationen anpassen.

Die *Ergebnisrobustheit*, gemessen am Variationskoeffizienten des realisierten Kapitalwerts, beschreibt die Auswirkungen von unsystematischen Unsicherheiten auf den Kapitalwert. Dieser Beobachtungswert wird detailliert betrachtet:

- *Vermutung 3.1:*

Die Ergebnisrobustheit ist in Situation IV höher als in Situation I. Zufällige Schwankungen der Nachfrage können bei nicht ausreichender Kapazität in Planungssituation I zu höheren Auszahlungen führen, da die Unternehmung ad-hoc Produkte zu einem höheren Preis am Beschaffungsmarkt erstehen und/oder die Kapazitätspläne anpassen muss, um die Nachfrage zu bedienen.

- *Vermutung 3.2:*

Die Ergebnisrobustheit ist bei Fehleinschätzung des Kapazitätsbedarfes niedriger als im Vergleich zu einer zuverlässigen Prognose, weil zusätzliche, eigentlich nicht erforderliche (Des-) Investitionen getätigt werden müssen. Wenn der ökonomische Erfolg maximiert werden soll, erfordern große Abweichungen zwischen tatsächlichem und erwartetem Kapazitätsbedarf stärkere Anpassungen. Die Robustheitsabschwächung ist bei der Überschätzung geringer als bei der Unterschätzung ausgeprägt, da zufällige Schwankungen des Kapazitätsbedarfes bei Überschätzung besser kompensiert werden. Insbesondere führt dies in Planungssituation I zu weniger häufigen Auszahlungen (Auszahlungen für ad-hoc-Käufe).

- *Vermutung 3.3:*

Die Ergebnisrobustheit der Unternehmungen ist größer, wenn Ressourcen mit einem breiten Einsatzspektrum eingesetzt werden. Flexible Ressourcen können zufällige Schwankungen besser kompensieren.

In Bezug auf die Planungsrobustheit werden folgende Vermutungen formuliert:

- *Vermutung 4.1:*

Bei einer zuverlässigen Prognose ist die *Planungsrobustheit* höher, wenn die Unternehmung Entscheidungsmöglichkeiten bzgl. der Nachfragebedienug und Rücknahme der Rückflüsse hat. Aufgrund höherer Freiheitsgrade können in Planungssituation IV Zahlungen der Kapazitätsanpassung zur vollständigen Nachfragebedienug vermieden werden. Dadurch werden insbesondere in Planungssituation IV die Expansionspläne weniger angepasst als in Planungssituation I.

- *Vermutung 4.2:*

Die Planungsrobustheit ist umso höher, je besser die Prognosequalität der Nachfrage ist. Große Abweichungen führen zu stärkeren Anpassungen der Kapazitätspläne, damit Erlöse bei Unterschätzung nicht entgehen bzw. zu hohe Investitionen bei Überschätzung getätigt werden. Die Planungsrobustheit ist bei den Expansionsentscheidungen größer als bei den Kontraktionsentscheidungen.

- *Vermutung 4.3:*

Bei zufälligen Nachfrageschwankungen ist die Planungsrobustheit beim Einsatz von flexiblen Ressourcen höher als bei starren Ressourcen. Unerwartete Änderungen der Absatzhöchst- und Rückflussmengen gehen nur mit kleinen Veränderungen der zahlungsintensiven Expansionsmaßnahmen einher, da einerseits bei Unterschätzung geringe zahlungsintensive Rückflussmengen aufgrund niedriger Planabsatzmengen erwartet werden und andererseits bei Überschätzung mehr Kapazität aufgebaut wurde als benötigt wird. Unerwartete Rückflussmengen bei Unterschätzung und überhöhte Kapazität bei Überschätzung werden durch Kontraktionsmaßnahmen ausbalanciert, wenn diese zahlungsgünstiger sind.

- *Vermutung 4.4:*

Erhöhungen der Zahlungen für Kapazitätsanpassungen bei flexibleren Ressourcen haben einen starken Einfluss auf die Planungsrobustheit. Die erhöhten Zahlungen führen zu einer geringeren Anschaffung von flexiblen Ressourcen. Es werden die Anschaffungszahlungen, dem möglichen Absatz gegenübergestellt. Ab einem bestimmten Verhältnis zwischen möglichem Absatz und notwendigen Anschaffungszahlungen kompensieren die Potentiale der flexiblen Ressourcen die Auszahlungen nicht mehr.

4.2 Testaufbau

4.2.1 Datenbasis

4.2.1.1 Güterfluss

In einem Horizont von 40 Perioden soll die Kapazität eines Gütertransformationssystems mit den Prozessen Produktion (M, $i=1$), Reparatur (R, $i=2$) und Aufarbeitung (T, $i=3$) geplant werden. Der Güterfluss weist die in Abbildung 4.1 dargestellte Struktur auf.

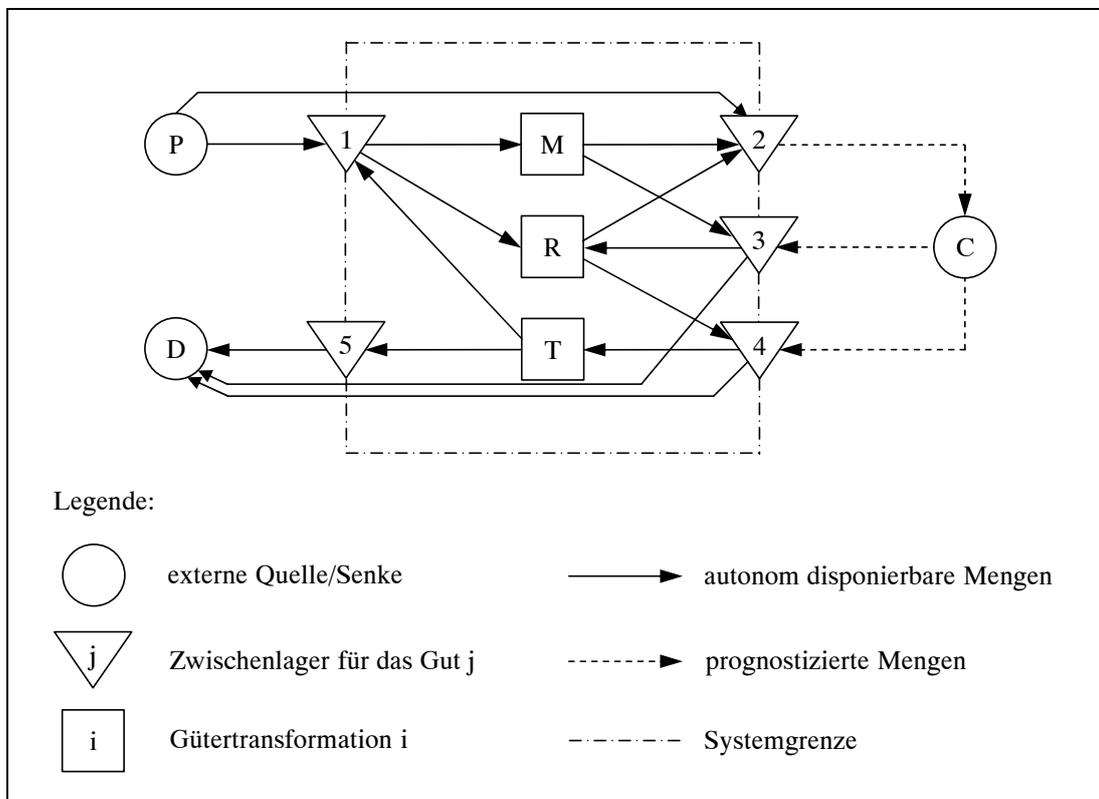


Abbildung 4.1: Struktur des Güterflusses der analysierten CLSC

Die benötigten Produktkomponenten ($j=1$) werden dem Beschaffungsmarkt (P) entnommen oder durch Aufarbeitung (T) von Gebrauchsgütern am Ende ihrer Nutzungsdauer ($j=4$) zurückgewonnen. Sie können zur Produktion (M) von Neuprodukten ($j=2$) oder zur Reparatur (R) von reparaturbedürftigen Produkten ($j=3$) zum Einsatz gelangen. Aus der Produktion gehen Neuprodukte ($j=2$) oder reparaturbedürftige Produkte ($j=3$) hervor. Zudem können Neuprodukte auch vom

Beschaffungsmarkt bezogen werden. Reparaturbedürftige Produkte werden in erwarteten konstanten Anteilen zu Neuprodukten oder zu Gebrauchtsprodukten am Ende ihrer Nutzungsdauer transformiert. Durch den Konsum von Neuprodukten (C) ergeben sich zwei Rückflüsse: Reparaturbedürftige Produkte und Gebrauchtsprodukte am Ende ihrer Nutzungsdauer, deren zukünftig zu erwartender Umfang mit Hilfe von Prognosen ermittelt wird, abhängig von der vorliegenden Planungssituation. Aus der Aufarbeitung der Gebrauchtsprodukte gehen wiederverwendbare ($j=1$) oder zu entsorgende Produktkomponenten ($j=5$) hervor. Die zuletzt genannten Komponenten werden auf dem Entsorgungsmarkt (D) abgesetzt. Reparaturbedürftige Produkte und Gebrauchtsprodukte am Ende ihrer Lebensdauer können auch direkt entsorgt werden.

Die durch die einzelnen Transformationen i bewirkten Mengenänderungen $U[J \times I]$ an den Güterarten j werden durch die in Tabelle 4.2 angegebenen Werte erfasst.

$i \backslash j$	1	2	3	4	5
M ($i=1$)	-1,00	+0,98	+0,02	0,00	0,00
R ($i=2$)	-0,10	+0,95	-1,00	+0,05	0,00
T ($i=3$)	+0,90	0,00	0,00	-1,00	+0,10

Tabelle 4.2: Mengenwirkungen der Transformationen

Die Kosten bzw. Preise der Güterarten sind in der Tabelle 4.3 zusammengefasst. Es wird angenommen, dass die Komponenten zum selben Preis am Beschaffungsmarkt erworben werden können. Das Endprodukt ($j=2$) kann mit einem Aufschlag von 20% auf den Absatzpreis am Beschaffungsmarkt erworben werden. Die Unternehmung würde die Endprodukte zu diesem Preis nur erwerben, wenn sie durch vertragliche Verpflichtungen zur Erfüllung der Nachfrage verpflichtet ist und der Kapazitätsbedarf unterschätzt würde. Dies ist eine Entscheidungsmöglichkeit in Situation I; in Situation IV würde die Nachfrage nicht bedient werden. Entsorgungspreise werden als negative Absatzpreise modelliert. Die Lagerhaltungskosten der Endprodukte ($j=2$) betragen pro Periode 0,25% des Absatzpreises (bzw. Entsorgungskosten). Die Lagerhaltungskosten der reparaturbedürftigen Produkte ($j=3$) haben aufgrund ihres Potentials zur Aufbereitung dieselben Lagerhaltungskosten wie die Einzelkom-

ponenten ($j = 1$) (0,15% des Absatzpreises). Die Gebrauchtprodukte am Ende ihrer Nutzungsdauer ($j = 4$) und die zu entsorgenden Produkte ($j = 5$) haben angesichts ihrer geringen Wiederverwendungsrate Lagerhaltungskosten von 0,025% des Absatzpreises.

Wertkategorie \ j	1	2	3	4	5
Absatzpreis PE	55	100	-10	-10	-10
Beschaffungspreis PI	55	120	-	-	-
Lagerhaltungskosten PL	0,15	0,25	0,15	0,025	0,025
Redistributionskosten PR	-	-	10	10	-

Tabelle 4.3: Wertmäßige Wirkungen der Güterarten j pro Stück

Der Einsatz weiterer Inputgüter, die nicht durch die explizit abgebildeten Güter j beschrieben sind, wird pauschal durch die Ausführungskosten der Prozesse erfasst. Für die Festsetzung der Ausführungskosten gelten unter der Bedingung, dass

- die Wirkungen taktischer Kapazitätsentscheidungen im Mittelpunkt der Betrachtung stehen und nicht von den Wirkungen operativer Anpassungsmaßnahmen dominiert werden, sowie
- die Kosten der kurzfristigen Entscheidungen so festgesetzt werden, dass kein Prozess unbedingt ökonomisch nachteilig ist,

die folgenden Annahmen:

- Die Ausführungskosten der Prozesse sind so hoch, dass unter der Berücksichtigung des erwarteten Umsatzes und der Kosten für die explizit erfassten Güter noch eine Gewinnspanne realisiert werden kann.
- Kurzfristig gesehen ist kein Prozess vorteilhafter als die anderen Prozesse, d.h., die minimale Gewinnspanne ist bei allen Prozessen gleich.

Zur Kostenfestlegung wird die einmalige Durchführung jedes Prozesses i unter Berücksichtigung der Mengenwirkungen isoliert betrachtet (Tabelle 4.4), und es wird von den Marktpreisen ausgegangen, d.h. die benötigten Produktkomponenten ($j = 1$) werden zu Beschaffungspreisen PI und die einzusetzenden Rückflussmengen werden zu Redistributionskosten PR angesetzt. Die Ausführungskosten sind nicht grö-

ber als die Differenz zwischen Umsatz und Kosten der explizit erfassten Güter und einer festgesetzten minimalen Gewinnspanne.

	Montage ($i = 1$)	Reparatur ($i = 2$)	Aufbereitung ($i = 3$)
Input (nach Güterart)			
$j = 1$	$./ . 1 \cdot 55$	$./ . 0,1 \cdot 55$	
$j = 2$			
$j = 3$		$./ . 1 \cdot 10$	
$j = 4$			$./ . 1 \cdot 10$
$j = 5$			
Kosten pro Kapazitätseinheit			
$k = 1$	$./ . 1 \cdot 21$	$./ . 0,1 \cdot 21$	$./ . 0,2 \cdot 21$
$k = 2$	$./ . 0,2 \cdot 21$	$./ . 0,8 \cdot 21$	$./ . 0,1 \cdot 21$
$k = 3$	0	$./ . 0,1 \cdot 21$	$./ . 0,4 \cdot 21$
Output (nach Güterart)			
$j = 1$			
$j = 2$	$+ 0,98 \cdot 100$	$+ 0,95 \cdot 100$	$+ 0,90 \cdot 55$
$j = 3$	$./ . 0,02 \cdot 10$		
$j = 4$		$./ . 0,05 \cdot 10$	
$j = 5$			$./ . 0,1 \cdot 10$
Σ	17,6	58	23,8
festgesetzte Gewinnspanne	$./ . 10$	$./ . 10$	$./ . 10$
Ausführungskosten <i>PT</i>	7,6	48	13,8

Tabelle 4.4: Kalkulation der Ausführungskosten

Bei der Berücksichtigung der Kosten pro genutzte Kapazitätseinheit wird von Potentialfaktoren mit hoher Flexibilität ausgegangen. Ein Kostensatz von 21 pro Einheit wird angenommen. Die fixen Wertwirkungen des Kapazitätsaufbaus lassen sich nicht willkürfrei den einzelnen Prozessen zuordnen und werden deshalb nicht mit in die

Kalkulation einbezogen. Vortests haben gezeigt, dass sie (bei durchschnittlich zwei Aufbauentscheidungen) weniger als 1% des Kapitalwertes betragen.

Für die Inanspruchnahme der Kapazität gelten folgende Annahmen:

- Der Reparaturprozess hat eine niedrigere Kapazitätsnachfrage als der Produktionsprozess.¹⁾
- Der Aufbereitungsprozess der Gebrauchtgüter am Ende ihrer Lebenszeit benötigt am wenigsten Kapazität, da Einzelkomponenten gewonnen werden und der Rest entsorgt wird.

Die Kapazitätsnachfrage $\kappa[K \times I]$ der einzelnen Prozesse i wird in folgender Matrix zusammengefasst:

$k \backslash i$	1	2	3
1	1	0,1	0,1
2	0,2	0,8	0,2
3	0	0,1	0,4

Tabelle 4.5: Kapazitätsbedarf der Prozesse nach Kapazitätsarten

4.2.1.2 Potentialfaktoren

Um die Vermutungen bzgl. der Wirkungen des Einsatzes von flexiblen Ressourcen zu überprüfen, werden unterschiedliche Konstellationen, die durch verschiedene Flexibilitäts- und Unsicherheitsstufen geprägt sind, untersucht. Die Flexibilitätsstufen der drei Potentialfaktoren ($h = 1, \dots, 3$) spiegeln die Eignung der Ressource zur Erfüllung der Kapazitätsnachfrage der drei Arten ($k = 1, \dots, 3$) wider: *voll flexibel* (Flex1, 3 von 3 Kapazitätsarten), *mittel flexibel* (Flex2, 2 von 3 Kapazitätsarten) und *inflexibel* (Flex3, 1 von 3 Kapazitätsarten). Die Eignungen sind so verteilt, dass auf einer Flexibilitätsstufe jede Kapazitätsart von der gleichen Anzahl an Potentialfaktoren ab-

¹⁾ Vgl. Bulmus/Zhu/Teunter (2013), S. 359.

gedeckt ist. Die Eignungsmatrizen $CA[K \times H]$ der drei Flexibilitätsstufen werden in Tabelle 4.6 dargestellt.

Flex1				Flex2				Flex3			
$h \backslash k$	1	2	3	$h \backslash k$	1	2	3	$h \backslash k$	1	2	3
1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0
2	1	1	1	2	1	0	1	2	0	1	0
3	1	1	1	3	0	1	1	3	0	0	1

Tabelle 4.6: Eignungsmatrizen der unterschiedlichen Flexibilitätsstufen 1, 2 und 3

Es wird angenommen, dass die variablen Kapazitätsauszahlungen für Potentialfaktoren mit höherer Flexibilität nicht niedriger sind als für Potentialfaktoren mit einem geringeren Einsatzspektrum. Fixe Auszahlungen (z.B. für Umstellung und Installation) sind hingegen flexibilitätsunabhängig. Es werden unterschiedliche variable Auszahlungen der Expansions- ($ie[1 \times H]$) und Kontraktionsmaßnahmen ($ik[1 \times H]$) für die Potentialfaktoren untersucht.

	Konstellation 1 (KK1)			Konstellation 2 (KK2)		
Flexibilitätsstufe	Flex3	Flex2	Flex1	Flex3	Flex2	Flex1
Expansion	7	7	7	7	8,75	10,5
Kontraktion	1	1	1	1	1,25	1,5

	Konstellation 3 (KK3)			Konstellation 4 (KK4)		
Flexibilitätsstufe	Flex3	Flex2	Flex1	Flex3	Flex2	Flex1
Expansion	7	10,5	14	7	12,25	17,5
Kontraktion	1	1,5	2	1	1,75	2,5

	Konstellation 5 (KK5)		
Flexibilitätsstufe	Flex3	Flex2	Flex1
Expansion	7	14	21
Kontraktion	1	2	3

Tabelle 4.7: Variable Kapazitätsexpansions- und kontraktionszahlungen

	F3	F2	F1
fixe Kapazitätsexpansionszahlungen IE_h	300	300	300
fixe Kapazitätskontraktionszahlungen IK_h	100	100	100

Tabelle 4.8: Fixe Kapazitätsexpansions- und kontraktionszahlungen

Die Anpassungsentscheidungen der Kapazitätsexpansion und -kontraktion gehen mit Verzögerungen einher ($qe_{h,l}, qk_{h,l}$) und sind bei jeder Ressource h nach drei bzw. zwei Perioden (Verzögerung \hat{l}) vollständig umgesetzt (Tabelle 4.9).

$\hat{l} \backslash h$	Kapazitätsexpansion			Kapazitätskontraktion		
	1	2	3	1	2	3
1	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
3	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0

Tabelle 4.9: Realisationsverzögerung von Kapazitätsanpassungsentscheidungen

Der Barwertermittlung liegt ein Kalkulationszinsfuß f von 0,25% pro Periode zugrunde. Für die Restwerte der Kapazitäten zu den einzelnen Zeitpunkten im Planungshorizont werden die variablen Anschaffungspreise angenommen, die exponentiell abgeschrieben werden ($lk_{h,1} = ie_h$). Sie verlieren in jeder Periode 10% des Wertes der Vorperiode. Es gelte folgende Funktion für alle Potentialfaktoren ($h = 1, \dots, 3$):

$$lk_{h,t} = \max(0; 0,9 \cdot lk_{h,t-1}) \quad \forall h, t-1 > 0 \quad (4.1)$$

Neben der Modellierung der wirtschaftlichen Abnutzung der Ressourcen wird durch die Annahme $lk_{h,t} \leq ie_h \quad \forall t$ auch impliziert, dass kein ökonomischer Vorteil durch die Kontraktion der Kapazität erwirtschaftet werden kann¹⁾.

¹⁾ Vgl. Serrato/Ryan/Gaytán (2007), S. 4296.

4.2.1.3 Generierung der Zeitreihen des Vorproduktes

Das vorliegende Planungsproblem geht von der Annahme aus, dass die Absatz-, Nachfrage-, Rückfluss- und Rücknahmemengen des kompletten Lebenszyklus des Vorproduktes für einen Zeitraum von 40 Perioden gegeben sind (siehe Abbildung 4.2). Die Vorgehensweise zur Generierung dieser Zeitreihen wird im Folgenden erläutert.

In *Planungssituation I* stimmen Nachfrage- und Absatzmenge sowie Rückfluss- und Rücknahmemenge überein. Aufgrund der Entscheidungsmöglichkeiten in Planungssituation IV müssen folgende Überlegungen durchgeführt werden: Es bestehen zwei unterschiedliche Rückflussgüterarten ($j = 3$: reparaturbedürftige Produkte, $j = 4$: Gebrauchte Produkte am Ende ihrer Nutzungsdauer), für die die Rückfluss- ($XR_{3,t}, XR_{4,t}$) und Rücknahmemengen ($XN_{3,t}, XN_{4,t}$) bekannt sind. Für das Vorprodukt ($j = 2$) sind die Nachfrage $ME_{2,t}$ und die realisierten Absatzmengen $XE_{2,t}$ gegeben. Die Nachfrage des Vorproduktes folgt einer Brockhoff-Funktion, deren Verlauf von den Variablen a_1 , a_2 und a_3 abhängig ist. Über den Parameter a_1 wird die Höhe der Kurve variiert; der Parameter a_2 beschreibt die Schiefe der Funktion und Parameter a_3 die Stauchung der Funktion. Die Brockhoff-Funktion zur Generierung der Nachfrage des Vorproduktes wurde um einen zufälligen Fehlerterm erweitert, dessen Stärke durch den Parameter $\hat{\delta} = 0,04$ charakterisiert wird. Das bedeutet, dass der Fehler um maximal 4% schwankt. Dabei handelt es sich um generierte saisonale Schwankungen, die durch eine Sinuskurve abgebildet werden und deren Frequenz von einer Zufallszahl $\hat{\eta}$ zwischen 0 und 1 abhängt.

$$LC(t) = a_1 \cdot t^{a_2} \cdot e^{-a_3 \cdot t} \cdot \left(1 + \hat{\delta} \cdot \sin(\hat{\eta} \cdot t \cdot 2 \cdot \pi)\right) \quad (4.2)$$

Die Funktion (4.2) kann den idealtypischen Verlauf des Absatzes¹⁾ in einem Produktlebenszyklus, der durch die Phasen Einführung, Wachstum, Reife und Abschwung charakterisiert ist, beschreiben, wenn die Parameter dementsprechend gesetzt sind. Eine mögliche Kombination des idealtypischen Verlaufs wurde für das Vorprodukt

¹⁾ Vgl. Patton (1959), S. 11.

gewählt. Die Parameter für die Nachfragemenge des Vorproduktes sind in Tabelle 4.10 abgebildet.

Szenario	a_1	a_2	a_3	δ
$ME_{2,t}$	3,20	3,8	0,29	0,04

Tabelle 4.10: Parameterkombinationen der Nachfrage des Vorproduktes

Die anderen Zeitreihen des Vorproduktes ergeben sich aus Annahmen bezüglich der Relationen zwischen den Zeitreihen. Da Planungssituationen zugrunde gelegt wurden, in denen nur einseitige Abhängigkeiten bestehen, d.h., die Absatzmengen und die Rücknahmemengen sind unabhängig von den Rückflussmengen, werden diese als erstes generiert. Die Absatz- und Rücknahmeentscheidungen werden von der Unternehmung aus ökonomischen Gründen getroffen. Die Absatzmengen sollen in dem Intervall zwischen 85 und 95% der Nachfrageobergrenzen liegen. Der Fehlerterm ist eine (gleichverteilte) Zufallszahl zwischen 0 und 10% der Nachfrage (weißes Rauschen):

$$XE_{2,t} = 0,85 \cdot ME_{2,t} + 0,1 \cdot \hat{\eta}_t \cdot ME_{2,t} \quad (4.3)$$

Für die Rücknahmemengen wird angenommen, dass diese auch demselben Verlauf folgen, aber mit einem geringeren Umfang (jeweils zwischen 8 und 10% der Absatzmenge) und mit einer zeitlichen Verschiebung des Hochpunktes (Lag-Ordnung 1 bzw. 4).

$$XN_{3,t} = 0,08 \cdot XE_{2,t-1} + 0,02 \cdot \hat{\eta}_t \cdot XE_{2,t-1} \quad (4.4)$$

$$XN_{3,t} = 0,08 \cdot XE_{2,t-4} + 0,02 \cdot \hat{\eta}_t \cdot XE_{2,t-4} \quad (4.5)$$

In *Planungssituation I* und *IV* sind die Güterrückflussmengen von mehreren Einflussfaktoren, wie den Absatz- und Rücknahmemengen, abhängig. Somit besteht ein direkter Einfluss der Absatzmenge auf den Güterrückfluss. Für die Güterart $j = 3$ gelten folgende Überlegungen. Es wird angenommen, dass reparaturbedürftige Güter zeitnah nach dem Absatz zurückfließen. Deswegen verringern sich die Regressionskoeffizienten mit der steigender Reichweite von der aktuellen Periode (0,1/0,05/0,02). Ein 5%- bzw. 3%-Anteil für nicht zurückgenommene Produkte (Dif-

ferenz zwischen Güterrückfluss und Rücknahmemenge $XR - XN$) der letzten beiden Perioden fließen erneut zurück:

$$\begin{aligned} XR_{3,t} = & 0,06 \cdot XE_{2,t} + 0,02 \cdot XE_{2,t-1} + 0,02 \cdot XE_{2,t-2} \\ & + 0,05 \cdot XR_{3,t-1} - 0,05 \cdot XN_{3,t-1} + 0,03 \cdot XR_{3,t-2} - 0,03 \cdot XN_{3,t-2} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Bei Güterart $j = 4$ fließen die Produkte mit größtem Anteil nach 3 Perioden zurück. Zusätzlich kommt ein Anteil der nicht zurückgenommenen Rückflussmenge der Güterart $j = 3$ der letzten 3 Perioden als Gebrauchtpunkt am Ende seiner Nutzungsdauer zurück:

$$\begin{aligned} XR_{4,t} = & 0,01 \cdot XE_{2,t-1} + 0,06 \cdot XE_{2,t-2} + 0,1 \cdot XE_{2,t-3} \\ & + 0,01 \cdot XR_{3,t-1} + 0,02 \cdot XR_{3,t-2} + 0,05 \cdot XR_{3,t-3} \\ & - 0,01 \cdot XN_{3,t-1} - 0,02 \cdot XN_{3,t-2} - 0,05 \cdot XN_{3,t-3} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Die Zusammenführung lautet

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} XR_{3,t} \\ XR_{4,t} \end{pmatrix} = & \begin{pmatrix} +0,05 & 0 \\ 0,01 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} XR_{3,t-1} \\ XR_{4,t-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0,03 & 0 \\ 0,02 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} XR_{3,t-2} \\ XR_{4,t-2} \end{pmatrix} \\ & + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ +0,05 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} XR_{3,t-3} \\ XR_{4,t-3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} XR_{3,t-4} \\ XR_{4,t-4} \end{pmatrix} \\ & + \begin{pmatrix} +0,06 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot XE_{2,t} + \begin{pmatrix} +0,02 \\ +0,01 \end{pmatrix} \cdot XE_{2,t-1} + \begin{pmatrix} +0,02 \\ +0,06 \end{pmatrix} XE_{2,t-2} + \begin{pmatrix} 0 \\ +0,1 \end{pmatrix} \cdot XE_{2,t-3} \\ & + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} XN_{3,t} \\ XN_{4,t} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -0,05 & 0 \\ -0,01 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} XN_{3,t-1} \\ XN_{4,t-1} \end{pmatrix} \\ & + \begin{pmatrix} -0,03 & 0 \\ -0,02 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} XN_{3,t-2} \\ XN_{4,t-2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -0,05 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} XN_{3,t-3} \\ XN_{4,t-3} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Die Zeitreihen werden auf der Grundlage von Startwerten generiert. Diese werden als 15% der Absatzmenge pro Periode festgesetzt. Da die Rücknahmemengen unabhängig von den Güterrückflüssen generiert wurden, muss zusätzlich geprüft werden, ob die Rücknahmemengen unter den Rückflussmengen liegen. Wenn dies nicht der Fall ist, werden die Werte nach unten korrigiert, denn die Rücknahmemenge der Güterarten können die Rückflussmengen pro Periode nicht überschreiten. Die Berech-

nungen zeigen, dass keine Veränderungen notwendig sind. Die generierten Zeitreihen sind in Abbildung 4.2 dargestellt (für Werte der Zeitreihen siehe Anhang).

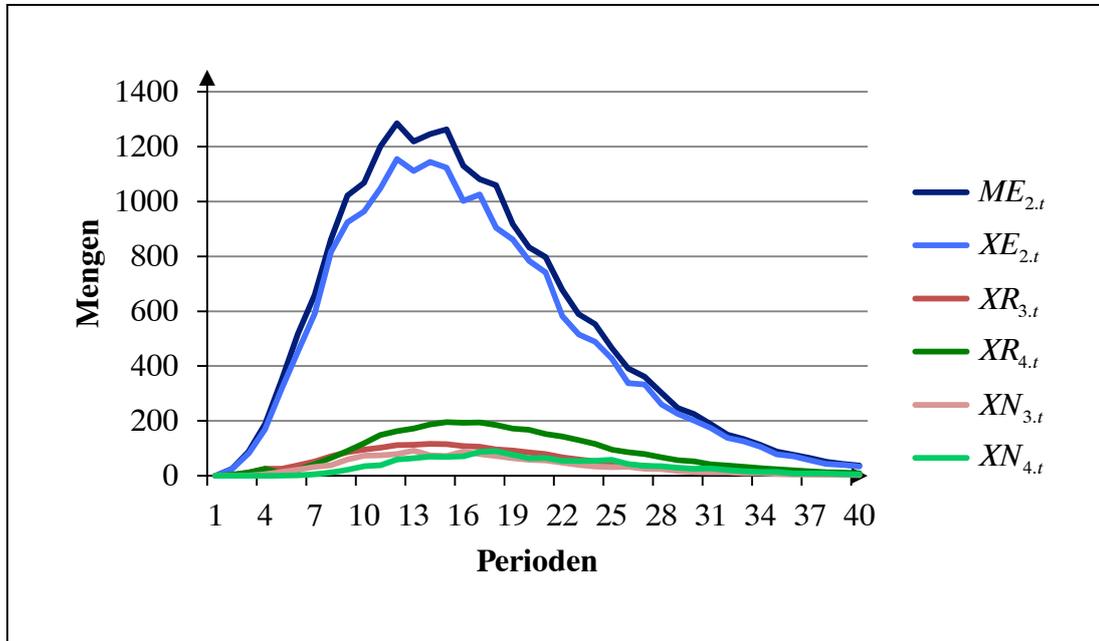


Abbildung 4.2: Absatz-, Nachfrage-, Rückfluss- und Rücknahmemengen des Vorproduktes

4.2.2 Szenariengenerierung

Der Informationsstand im Rahmen der stochastischen Optimierung ergibt sich aus der Menge der vorgegebenen Szenarien $s = 1, \dots, S$ und deren zugehörigen Eintrittswahrscheinlichkeiten. Es wird von einer unvollkommenen Informationsbasis bzgl. der Nachfragemengen ausgegangen. Die Unsicherheit wird anhand der Szenarienmodellierung berücksichtigt. Die Szenariengenerierung erfolgt durch Extrapolation zukünftiger Entwicklungen auf Grundlage der gegebenen Daten. Zur Simulation der Nachfrageszenarien wird die Brockhoff-Funktion angewendet. Die einzelnen Szenarien ergeben sich aus der Berücksichtigung von systematischen und unsystematischen Unsicherheiten.

Systematische Unsicherheiten werden in Form von Expertenerwartungen über zukünftige Nachfrageentwicklungen (Absatzhöchstmengen) berücksichtigt. Für das Neuprodukt werden die Nachfrageszenarien durch Variation des Mengenniveaus (Parameter a_1 der Brockhoff-Funktion $LC(t)$ (Formel 4.2)) und bei gleichbleibender Stärke des Störungseinflusses (Parameter $\hat{\delta}$) gebildet. Das Niveau der Nachfra-

gemenge wird so variiert, dass das Niveau kleiner, gleich oder größer als das Niveau des Vorproduktes ist.

Um den *Vermutungen* bzgl. der Auswirkungen der Prognosequalität (Kapazitätsüber- und -unterschätzung) nachzugehen werden die in Tabelle 4.11 zu untersuchenden Konstellationen der prognostizierten und realisierten Absatzhöchstmengen getestet. Diese beschreiben die Relationen zwischen den bekannten Absatzhöchstmengen des Vorproduktes (p), den von den Experten erwarteten Absatzhöchstmengen (e) und den tatsächlichen realisierten Absatzhöchstmengen des Neuproduktes (c). Die Experten-erwartungen und die tatsächlichen Realisationen können die realisierte Nachfrage des Vorproduktes maximal um 40% übertreffen oder unterschreiten.

		Expertenschätzung der Absatzhöchstmengen des aktuellen Produktes im Vergleich zum Vorprodukt				
		-20%	-10%	0%	+10%	+20%
tatsächliche Absatzhöchstmenge des aktuellen Produktes im Vergleich zum Vorprodukt	+20%	$e \ll p \ll c$ (SK1)	$e < p \ll c$	$e \approx p \ll c$	$p < e < c$ (SK4)	$p \ll e \approx c$
	+10%	$e \ll p < c$	$e < p < c$ (SK2)	$e \approx p < c$	$p < e \approx c$	$p < c < e$ (SK8)
	0%	$e \ll p \approx c$	$e < p \approx c$	$e \approx p \approx c$ (SK0)	$p \approx c < e$	$p \approx c \ll e$
	-10%	$e < c < p$ (SK3)	$e \approx c < p$	$c < e \approx p$	$c < p < e$ (SK5)	$c < p \ll e$
	-20%	$e \approx c \ll p$	$c < e < p$ (SK7)	$c \ll e \approx p$	$c \ll p < e$	$c \ll p \ll e$ (SK6)

Tabelle 4.11: Konstellationen der prognostizierten und realisierten Absatzhöchstmengen

Somit ergeben sich 25 verschiedene Konstellationen. Zusätzlich zur unveränderten Konstellation (Vergleichsbasis, SK0) werden die weiteren acht grau markierten abweichenden Konstellationen getestet, da die anderen Fälle Spezialfälle der zu untersuchenden Kombinationen sind. Diejenigen Konstellationen, in denen der Experte die Nachfrage unterschätzt bzw. überschätzt, werden mit den Nummern 1-4 bzw. 5-8

bezeichnet (SK1-SK4 bzw. SK5-SK8). Dabei bilden die Konstellation SK1/SK2 und SK5/SK6 die Konstellationen mit den größten Abweichungen zwischen Prognose und Schätzung (20-40%). Hierbei wird eine umgekehrte Tendenz geschätzt, d.h., eine Absatzsteigerung (Absatzreduktion) statt einer Absatzreduktion (Absatzsteigerung). Bei den übrigen Relationen schätzt der Experte die Tendenz richtig, aber nicht das Ausmaß, so dass eine 10%-Differenz zwischen Prognose und Realisation besteht. In den Konstellationen SK3 und SK4 wird eine höhere Nachfrage des Neuproduktes im Falle SK7 und SK8 eine niedrigere Nachfrage erwartet.

Die verschiedenen Nachfragezeitreihen (des aktuellen Produktes und der Expertenmeinung) werden durch Variation der Parameter a_1 der Brockhoff-Funktion gebildet. Die konkreten Kombinationen des Parameters zu den möglichen Nachfrageabweichungen zum Vorprodukt (./ .20%, ./ .10%, 0%, +10%, +20%) sind in Tabelle 4.12 zusammengefasst. Zudem ergibt sich bei der Generierung der Zeitreihen der Fehlerterm mit einer maximalen Höhe von 4% durch die zufällige Wahl einer Frequenz $\hat{\eta} \in [0;1]$ der harmonischen Schwingung.

	Werte des Parameters a_1 nach Zeitreihen				
Niveauperänderung	+10%	+20%	$\pm 0\%$./ .10%	./ .20%
$ME_{2,t}$	3,52	3,84	3,20	2,88	2,56

Tabelle 4.12: Parameterkombinationen der Niveauperänderung der Nachfrage

Die *unsystematischen* Unsicherheiten spiegeln zufällige Schwankungen wider, die anhand des Interpolationsfehlers der Zeitreihe des Vorproduktes durch die Brockhoff-Funktion ermittelt werden. In jedem Schritt der rollierenden Planung wird die Zeitreihe durch die tatsächliche Nachfrage aktualisiert. Für die vorliegende Zeitreihe werden die Parameter, die Fehlerterme und die Kovarianzmatrix¹⁾ der geschätzten Parameter der Brockhoff-Funktion ermittelt, die sich den gegebenen Daten des Vor-

¹⁾ Die symmetrische Kovarianzmatrix enthält auf ihrer Diagonalen die Varianzen der einzelnen Parameter der Brockhoff-Funktion und beschreibt somit die Streuung der Parameter. Die restlichen Einträge geben Informationen über die Korrelationen zwischen den Parametern wider.

produktes optimal anpasst. Dabei wird das Verfahren der Least-Squares Methode benutzt, bei der die Summe der maximalen Abstände minimiert werden. Anhand der Daten können dann drei Szenarien (SZ1, SZ2, SZ3) mit der Interpolation der Zeitreihe und der Ober- und Untergrenze des 95%-Konfidenzintervalls ermittelt werden. Es wird angenommen, dass die Szenarien gleichwahrscheinlich sind ($p_1, p_2, p_3 = 1/3$). Es sei angemerkt, dass die zukünftige Nachfrage nicht innerhalb des Intervalls liegen muss, da die Szenarien Schätzungen der Zukunft darstellen. Um dies zu verdeutlichen ist in Abbildung 4.3 ein beispielhafter Auszug der Initialprognose der Nachfrage in den Perioden 12 bis 16 für Szenariokonstellation 0 abgebildet.

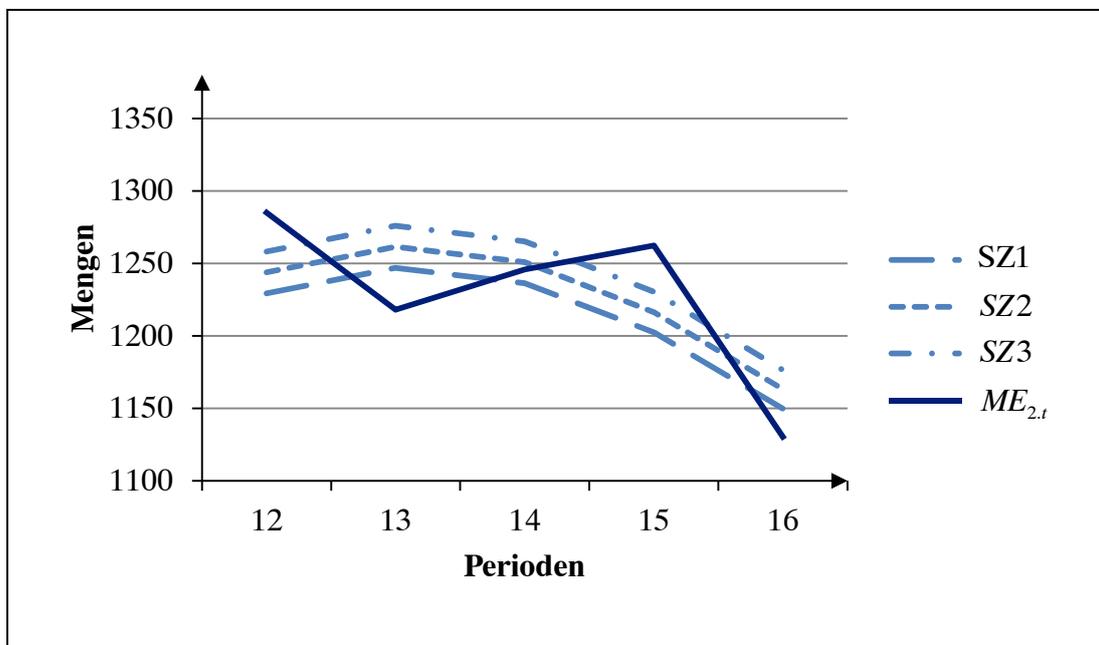


Abbildung 4.3: Erzeugte Szenarien der Initialprognose der Nachfrage in der Szenariokonstellation 0 (Auszug)

Abschließend werden in Tabelle 4.13 die Ziele, die Aufgaben, das Entscheidungsfeld, welches sich durch die vorliegende Planungssituation, das integrierte Prognosemodell und die gegebenen Informationen ergibt, und die Beobachtungsgegenstände der numerischen Analyse zusammengefasst.

Ziel		Untersuchung der Eignung des Planungsansatzes Auswirkungen der Fehleinschätzungen des Experten Vergleich verschiedener Flexibilitätskonfigurationen der Ressourcen			
Aufgabe		Dimensionierung der Kapazität um den Barwert zu maximieren			
Entscheidungsfeld	Planungssituation	Situation I		Situation IV	
	Prognosemodell	spezifizierte SEMs der Planungssituationen			
	Informationen	Mengen des Vorproduktes	Planungsparameter des neuen Produktes	unterschiedliche Nachfrage- und Rückflussszenarien	Flexibilitätskonfigurationen
Beobachtung		Berechnungszeiten	realisierter Kapitalwert	Ergebnisrobustheit	Planungsrobustheit

Tabelle 4.13: Skizze des Testdesigns

4.2.3 Ablauf der Rollierenden Planung

Im definierten Planungshorizont von 40 Perioden wird die Kapazitätsdimensionierung durch die Anwendung einer rollierenden Planung ergänzt. In jedem Planungsschritt PS werden mit Hilfe des generierten Planungsansatzes Kapazitätspläne erstellt, die durch einen fixierten und vorläufigen Bereich charakterisiert sind. Die Entscheidungen des fixierten Bereichs werden als verbindlich festgelegt. In einem Planabstand von 8 Perioden werden die im vorherigen Planungsschritt aufgestellten Kapazitätspläne mit vorläufigem Charakter auf Grundlage neuer Nachfrage- und Rückflussrealisationen aktualisiert. Die Planung endet, wenn der der letzte Planungsschritt erreicht ist (siehe Abbildung 4.4). Die einzelnen Schritte werden im Folgenden erläutert.

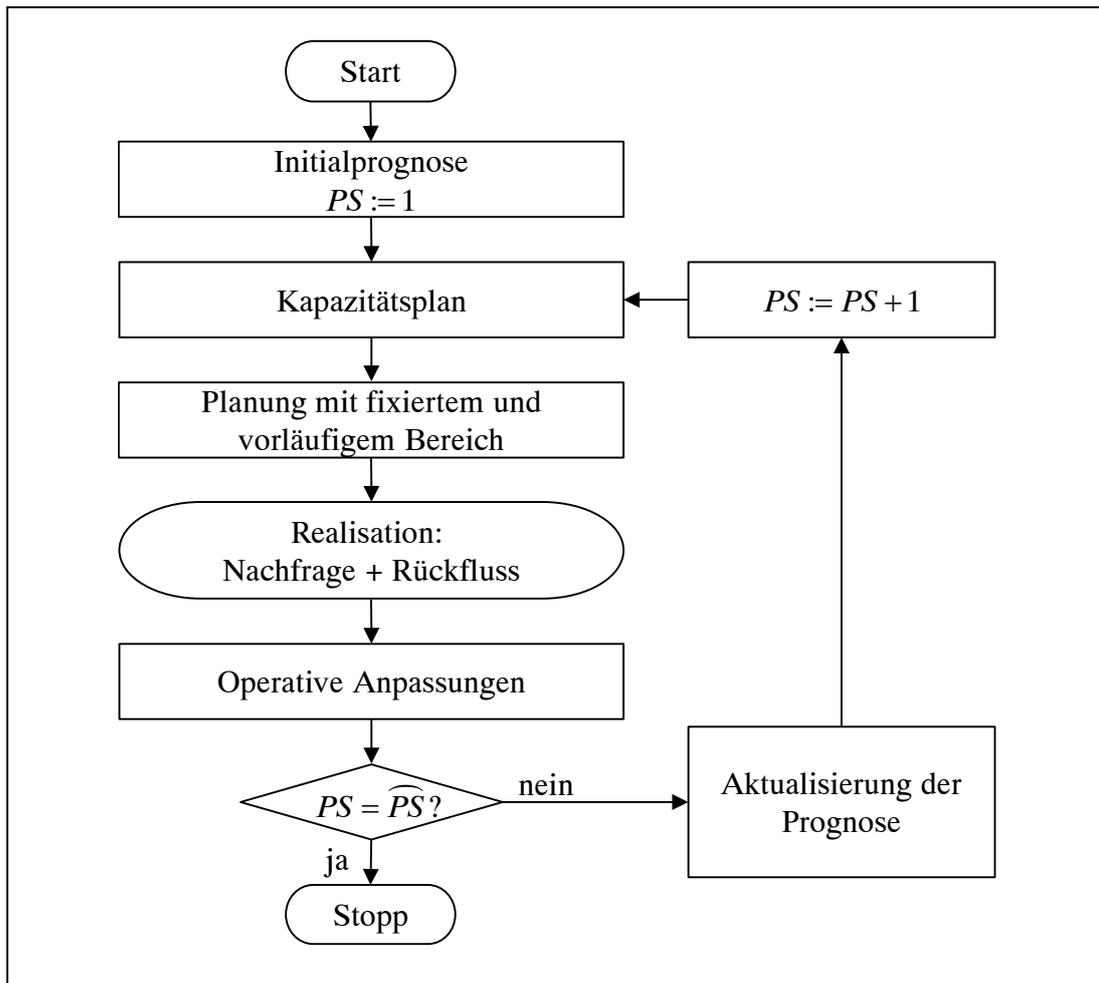


Abbildung 4.4: Ablauf der rollierenden Planung

In der aktuellen Periode 0 wird auf Grundlage der Daten des Vorproduktes und des Expertenwissens eine *Initialprognose* der Nachfrage- und Rückflussmengen erstellt. Für diejenigen Prognosemodelle, die sich aus den Planungssituationen ergeben, gelten folgende Annahmen:

- Es bestehen nur einseitige Abhängigkeiten zwischen Güterrückfluss- und Nachfragemengen, d.h., die Nachfragemengen sind unabhängig von den Güterrückflussmengen.
- In der Situation IV werden die Nachfragemengen nicht in die Prognose der Rückflussmengen mitaufgenommen, da sie lediglich die Absatzhöchstmenge bestimmen. Die Absatzmengen sind der Grund für die Güterrückflussmengen und werden deshalb als exogene Variable abgebildet.

Für die Modelle zur Prognose der Güterrückflussmengen ergeben sich bei einseitigem Abhängigkeitsverhältnis folgende Ausprägungen, deren Wirkungen auf die Robustheit und den durchschnittlichen Barwert aufgrund ihrer unterschiedlich berücksichtigten erklärenden Zeitreihen zu untersuchen sind. Aufgrund der zwei möglichen Güterrückflussarten ($j = 3, 4$) handelt es sich um Systeme mit zwei Gleichungen.

	Abhängigkeiten	SEM
Planungssituation I	einseitig	$y_t = \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{l'} * y_{t-l'} + \sum_{l=0}^L \beta_l * x_{t-l}^1 + u_t$ <p>mit $y_t = XR_t$ und $x_t^1 = XE_t$</p>
Planungssituation IV	einseitig	$y_t = \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{l'} * y_{t-l'} + \sum_{l=0}^L \beta_l^1 * x_{t-l}^1 + \sum_{l=0}^L \beta_l^2 * x_{t-l}^2 + u_t$ <p>mit $y_t = XR_t$, $x_t^1 = XE_t$ und $x_t^2 = XN_t$</p>

Tabelle 4.14: Spezifikation der Prognosemodelle

Die Initialprognose der Güterrückflüsse ($j = 3, 4$) besteht aus der Bestimmung der Parameter des VARX-Modells zur Beschreibung der Güterrückflussmengen. Das VARX-Modell wird in die Planung so integriert, dass bei der Festlegung der Absatzmengen und in Situation IV zusätzlich mit der Festlegung der Rücknahmemengen ermittelt wird, welche Rückflussmengen im Zeitablauf zu erwarten sind. Dadurch kann die Dimensionierung der Hin- und Rückflusskapazität simultan vorgenommen werden.

Im ersten Schritt der Initialprognose werden die Zeitreihen mit Hilfe des erweiterten Dickey-Fuller-Tests auf ihre Stationarität überprüft. Bei allen Zeitreihen wird die Nullhypothese nicht abgelehnt. Das bedeutet, dass die Zeitreihen nicht stationär sind. Nach einmaligem Differenzieren kann die Stationarität gesichert werden. Somit sind die Zeitreihen integriert mit Ordnung 1 ($d = 1$).

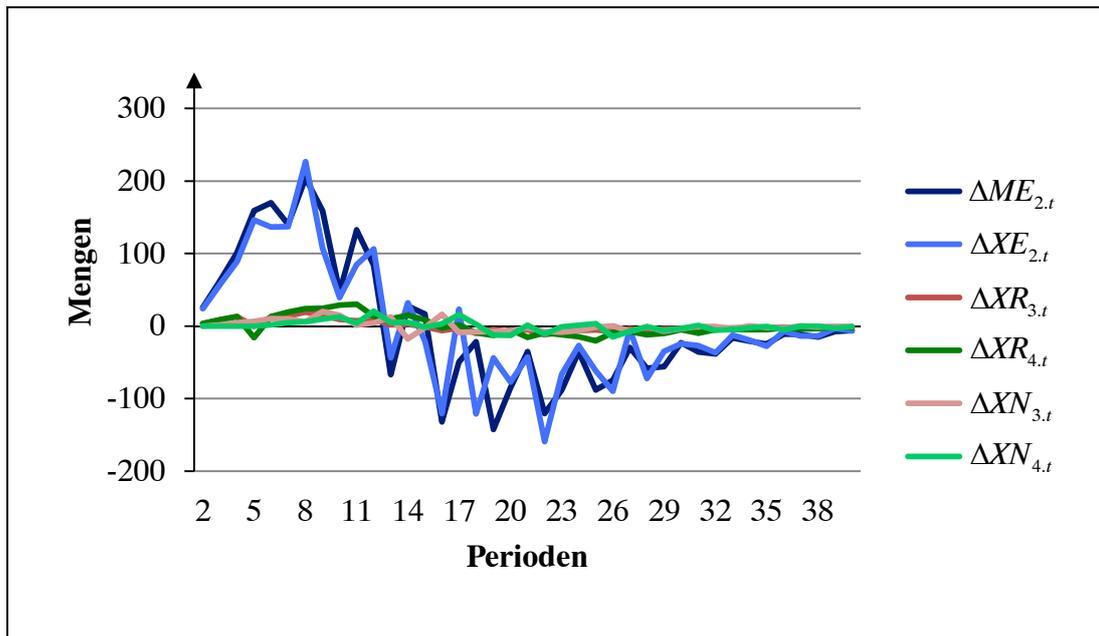


Abbildung 4.5: Stationäre Nachfrage-, Absatz-, Rückfluss- und Rücknahmemengen des Vorproduktes

Für die Initialprognose werden zur Bestimmung der Ordnungen der maximalen Verzögerungen (Lagordnung L, L') die in MATLAB implementierten Funktionen der multivariaten Regressionsrechnung benutzt. Laut vorherigem Schritt werden die maximale Verzögerungen wie folgt festgelegt: $L' = 4$ und $L = 3$. Im zweiten Schritt werden die Parameter der relevanten Modelle $\text{VARX}(L', d, L)$ geschätzt. Es wird darauf geachtet, dass hinreichend viele Vorabwerte zur Schätzung benutzt werden. Aufgrund der festgelegten maximalen Verzögerungen ergeben sich folgende relevanten Modelle (Tabelle 4.15).

$L \backslash L'$	0	1	2	3
1	$\text{VARX}(1,1,0)$	$\text{VARX}(1,1,1)$	$\text{VARX}(1,1,2)$	$\text{VARX}(1,1,3)$
2	$\text{VARX}(2,1,0)$	$\text{VARX}(2,1,1)$	$\text{VARX}(2,1,2)$	$\text{VARX}(2,1,3)$
3	$\text{VARX}(3,1,0)$	$\text{VARX}(3,1,1)$	$\text{VARX}(3,1,2)$	$\text{VARX}(3,1,3)$
4	$\text{VARX}(4,1,0)$	$\text{VARX}(4,1,1)$	$\text{VARX}(4,1,2)$	$\text{VARX}(4,1,3)$

Tabelle 4.15: Relevante Prognosemodelle

Die Unterschiede zwischen den Prognosemodellen der beiden Planungssituationen ergeben sich aus den zu berücksichtigenden Zeitreihen und deren Konsequenz für die Anzahl der zu ermittelnden aktiven Parameter¹⁾ (siehe Tabelle 4.16).

		Situation I				Situation IV			
$L' \backslash L$		0	1	2	3	0	1	2	3
1		9	11	13	15	13	19	25	31
2		13	15	17	19	17	23	29	35
3		17	19	21	23	21	27	33	39
4		21	23	25	27	25	31	37	43

Tabelle 4.16: Anzahl der zu ermittelnden Parameter

Die beschriebenen Modelle werden durch die Berechnung des Informationskriteriums nach Akaike AIC auf ihre Eignung geprüft. Als Input dienen die bei der Berechnung der Modellparameter bestimmten Likelihoodfunktion und die Anzahl der aktiven Parameter pro Modell. Für die relevanten Modelle wird zusätzlich die Stabilität des Modells überprüft²⁾. Das Modell, das den kleinsten AIC -Wert liefert und stabil ist, wird als optimales Modell gewählt. Die Ergebnisse der berechneten Informationskriterien und der Stabilitätsüberprüfung sind in Tabelle 4.17 und 4.18 zusammengefasst. Somit werden für die folgenden Tests die Modelle VARX(4,1,3) bzw. VARX(4,1,3) für die Situationen I bzw. IV gewählt.

¹⁾ Die Anzahl der aktiven Parameter eines Prognosemodells ergibt sich aus der Summe der Anzahl der Einträge des Absolutterms, der Regressanden der endogenen und exogenen Variablen und der Elemente der symmetrischen Kovarianzmatrix des Störterms.

²⁾ Die Stabilität eines Modells impliziert, dass die Zeitreihen bei der Prognose langfristig stationär bleiben, z.B. ist kein Aufschaukeln von Störtermen möglich. Für weitere Erläuterungen zur Stabilität von VAR-Modellen siehe z.B. Lütkepohl (2005), S. 13 ff.

		Situation I				Situation IV			
$l \backslash l'$		0	1	2	3	0	1	2	3
1		431	429	423	258	431	415	413	194
2		419	415	409	253	415	408	398	176
3		389	364	317	197	375	359	318	n.d.
4		234	212	155	22	218	202	-989	-2293

Tabelle 4.17: Ergebnisse der berechneten Informationskriterien nach Akaike

		Situation I				Situation IV			
$l \backslash l'$		1	2	3	4	1	2	3	4
1		stabil	stabil	stabil	stabil	stabil	stabil	stabil	stabil
2		stabil	stabil	stabil	stabil	stabil	stabil	stabil	stabil
3		stabil	stabil	stabil	stabil	stabil	stabil	stabil	n. stabil
4		stabil	stabil	stabil	stabil	stabil	stabil	stabil	stabil

Tabelle 4.18: Ergebnisse der Stabilitätsüberprüfung

Da die Zeitreihen des Vorproduktes integrierte Zeitreihen der Ordnung 1 sind, erfolgt die Parameterbestimmung der VARX-Modellierung auf Grundlage der differenzierten Zeitreihen. Aus diesem Grund werden abhängig von der Planungssituation neue Variablen für die erklärenden Variablen der Rückflussmengen in das Planungsmodell eingefügt, welche die Differenzen der Variablen von zwei aufeinanderfolgenden Zeitpunkten beschreiben. In Planungssituation I werden die folgenden Differenzen der erklärenden Variablen der Rückfluss- und Absatzmengen notwendig:

$$\Delta XR_t = XR_t - XR_{t-1} \quad (4.9)$$

$$\Delta XE_t = XE_t - XE_{t-1} \quad (4.10)$$

In Situation IV stellen zusätzlich die differenzierten Rücknahmemengen eine Einflussgröße der differenzierten Rückflussmengen dar:

$$\Delta XN_t = XN_t - XN_{t-1} \quad (4.11)$$

Dadurch ergeben sich folgende Prognosemodelle, welche die ersten Differenzen der Rückflussmengen auf Grundlage der ersten Differenzen der Einflussfaktoren beschreiben:

- Situation I:

$$\Delta XR_t = \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{l'} * \Delta XR_{t-l'} + \sum_{l=0}^L \beta_l * \Delta XE_{t-l} + u_t \quad (4.12)$$

- Situation IV:

$$\Delta XR_t = \sum_{l'=1}^{L'} \gamma_{l'} * \Delta XR_{t-l'} + \sum_{l=0}^L \beta_l^1 * \Delta XE_{t-l} + \sum_{l=0}^L \beta_l^2 * \Delta XN_{t-l} + u_t \quad (4.13)$$

In das Planungsmodell werden diese Prognosemodelle ohne den Störterm integriert, um den zukünftigen Güterrückfluss zu prognostizieren, da die Störterme einem weißen Rauschen (Erwartungswert = 0) folgen.

Auf der Ebene des Kapazitätsanpassungsmodells wird nun auf dieser Grundlage in Periode 0 der erste *Kapazitätsplan* für die Perioden 1 bis 40 mit dem Ziel der Maximierung des erwarteten Barwerts erstellt. Davon sind die für die Perioden 1 bis 8 bestimmten Werte der Kapazitätsentscheidungen Vorgaben und die restlichen Werte Vorabinformationen. Jeweils nach $A = 8$ Perioden erfolgt eine Aktualisierung durch die in der Zwischenzeit realisierten Daten bezüglich der Nachfrage- und Rückflussmengen und in Situation IV zusätzlich durch die realisierten Absatz- und Rücknahmemengen. Damit ergeben sich für den Planungszeitraum 5 Planungszyklen ($\widehat{PS} = T/A = 40/8 = 5$).

Im Güterflussmodell, d.h. in der untergeordneten Ebene, erfolgt nun die Planung für die ersten A Perioden *mit den Vorgaben* des Kapazitätsanpassungsmodells. Der Entscheider trifft unter Berücksichtigung der möglichen Szenarien seine operativen Entscheidungen. Aus ökonomischer Sicht wird angenommen, dass in beiden Planungssituationen die minimale Absatzhöchstmenge (Szenario 1, unteres 95%-Quantil) eingehalten werden muss. Beschaffungs-, Lager-, Produktions- und Rücknahmemengen werden zudem geplant.

Nach Ablauf der A Perioden werden die *tatsächlichen* A Werte der Nachfrage- und Rückflussmengen offenbart. Die tatsächliche Nachfrage wurde einmalig anhand der Brockhoff-Funktion (4.2) generiert und wird in jedem Planungsschritt weiter aufgedeckt. Die tatsächlichen Rückflussmengen werden mit Hilfe der VARX-Modellierung auf Grundlage der realisierten Planwerte (realisierte Absatz- und Rücknahmemengen) generiert. Rechnungsgrundlage ist das oben beschriebene VARX-Modell (Formel (4.8)), welches bei der Generierung der Zeitreihen des Vorproduktes angewendet wurde und die Beziehungen zwischen Rückfluss-, Absatz- und Rücknahmemengen beschreibt. Der Fehlerterm hat einen Erwartungswert von 0 und kann maximal um 1% schwanken (weißes Rauschen).

Nach zufälligem Eintreten des Nachfrageszenarios weiß der Entscheider, ob seine Planwerte *operativ angepasst* werden müssen. Die tatsächlich realisierte Absatzmenge $\overline{XE}_{2,t}$ entspricht in Planungssituation I der Produktnachfrage und in Planungssituation IV dem Minimum von geplanter Absatzmenge $XE_{2,t}$ und Absatzhöchstmenge $\overline{ME}_{2,t}$. Für die aktuelle Periode t kann somit die tatsächliche Rückflussmenge \overline{XR}_t berechnet werden. Die realisierten Rücknahmemengen \overline{XN}_t ergeben sich aus dem Minimum aus geplanten Rücknahmemengen und tatsächlicher Rückflussmengen. Die operativen Anpassungen der Planwerte von Absatz- und Rücknahmemenge werden durch Beschaffungs-, Lager- und Produktionsmengen ausgeglichen.

Auf Grundlage der nun bekannten Nachfrage und der realisierten Planwerte wird eine *Aktualisierung der Prognose* vorgenommen. Die Parameter der Brockhoff-Funktion werden mit Hilfe der Interpolation der Zeitreihe, die durch die tatsächlichen Nachfrage- und der Expertenschätzung für zukünftige Entwicklungen charakterisiert ist, angepasst. Anhand des Prognosefehlers werden drei Nachfrageszenarien für den nächsten Planungszyklus generiert: die Prognose und die Unter- und Obergrenze des 95% Konfidenzintervalls. Die aktualisierten Zeitreihen der Absatz-, Rückfluss- und Rücknahmemenge sind Rechnungsgrundlage der Parameter der VARX-Modellierung. Das bekannte Vorgehen wird durchgeführt: Die Zeitreihen werden ggfs. stationär transformiert, relevante Prognosemodelle werden gebildet, Regressionskoeffizienten bestimmt und ein geeignetes Prognosemodell erwählt. Aufgrund von Strukturbrüchen können die Integrationsordnungen der bei der Prognose vorliegenden

Zeitreihen eine höhere Ordnung als 1 haben. Aus diesem Grund wird die Information über die Ordnung jeder Zeitreihe in einem Parameter abgespeichert und geht als Inputparameter in das Planungsmodell ein. Damit wird im Planungsmodell ermöglicht, die bei dem integrierten Prognosemodell berechneten Prognosewerte auf die ökonomischen Variablen (XE, XR, XN) zu übertragen (siehe Unterabschnitt 3.4.2).

Mit den aktualisierten Daten der Prognosemodelle beginnt der nächste Planungszyklus. Die rollierende Planung wird solange fortgesetzt, bis das Ende des prognostizierten Produktlebenszyklus erreicht ist.

4.3 Durchführung

Um die Eignung des Planungsansatzes sowie Auswirkungen der Prognosequalität und des Einsatzes von flexiblen Ressourcen auf die Robustheit in unterschiedlichen Planungssituationen zu prüfen, werden der Rechenaufwand, die realisierten Kapitalwerte und Robustheitsindikatoren der Planungssituation I (keine Handlungsmöglichkeiten bzgl. der Rücknahme- und Absatzmengen) und Planungssituation IV (freie Entscheidung bzgl. der Rücknahme- und Absatzmengen) in unterschiedlichen Szenario- (SK0-SK8) und Auszahlungskonstellationen (KK1-KK5) untersucht. Als Vergleichsbasis werden die Ergebnisse der Szenariokonstellation 0 herangezogen, in der das Nachfrage- und Rückflussniveau des Neuproduktes dem des Vorproduktes entsprechen. Die Szenariokonstellationen SK1-SK8 sind durch die Relation zwischen tatsächlicher Nachfrage und der zuvor angenommenen Expertenschätzung charakterisiert (siehe Unterabschnitt 4.2.2). Bei dieser Betrachtung wird untersucht, welche Auswirkungen Fehleinschätzungen des Experten (Unter- bzw. Überschätzung der Nachfrage und des Rückflussaufkommens) auf die Indikatoren haben. Des Weiteren wird anhand unterschiedlicher Auszahlungskonstellationen, die sich durch unterschiedliche variable Wertwirkungen für die Kapazitätsanpassung charakterisieren, der Einsatz unterschiedlicher Flexibilitätskonfigurationen der Ressourcen untersucht (siehe Unterabschnitt 4.2.1.2). Das Modell wurde mit AIMMS implementiert und in einem rollierenden Planungshorizont mit Hilfe des Solvers CPLEX gelöst. Die Aktualisierung des Prognosemodells wird durch die in MATLAB definierten

Funktionen vollzogen. Via COM Object wird in MATLAB das in AIMMS implementierte Planungsmodell ausgeführt.

Die Planungsergebnisse¹⁾ zeigen, dass der Planungsansatz in Situation I immer eine optimale Lösung findet. In Planungssituation IV finden 15 Testläufe (0,8%) keine optimale Lösung für die bestehende Datenkonstellation. Bei weiteren 46 Testläufen (2,3%) konnte kein anwendbares Prognosemodell ausgehend von der vorliegenden Datenbasis ermittelt werden. Da die Prognosemodelle auf Grundlage von realisierten Daten des Neuproduktes und den vergangenen Daten des Vorproduktes bestimmt werden, können sich die Entwicklungen des Neuproduktes unterschiedlich stark von denen des Vorproduktes unterscheiden, sodass die Vergangenheitswerte sich als Basis nicht eignen. Dies führt zu Strukturbrüchen in den Zeitreihen und keiner Erkennung einer Systematik. In den Testläufen wurde dies dadurch erkannt, dass die Abschätzungen der Linearisierungen greifen. Eine genauere Analyse dieses Auftretens zeigt, dass 80% der Fälle zu Konstellation 7 und 8 gehören. Dies sind Konstellationen, bei denen der Experte die Absatzhöchstmenge überschätzt. Aus Gründen der Vergleichbarkeit werden diese Testläufe aus den folgenden Analysen ausgeschlossen.

Die folgende Tabelle 4.20 gibt für jede Planungssituation die Häufigkeit der Verwendung von Lag-Ordnungen der endogenen (Index l') und exogenen Variablen (Index l) in den Prognosemodellen an (siehe Unterabschnitt 4.2.3)²⁾. Es lässt sich erkennen, dass in beiden Situationen Prognosemodelle mit hohen Lag-Ordnungen bevorzugt werden. Dies resultiert aus der Verwendung des angenommen Modells für die Generierung des Güterrückflusses (siehe Unterabschnitt 4.2.1.3). Weiterhin ist zu beobachten, dass in Planungssituation I prozentual mehrere unterschiedliche

¹⁾ Es wurden insgesamt 1980 Tests durchgeführt (1980=990*2 Planungssituationen, 990=9 Szenariokonstellationen * 11 Kostensätze * 10 Durchläufe). Diese entsprechen 9900 Berechnungen (9900=1980 Tests * 5 Planungszeiträume).

²⁾ Hier und im Folgenden werden nur die Durchläufe untersucht, die eine zulässige Lösung erzeugt haben. Bei 990 Testläufen pro Planungssituation und 4 Updates im rollierenden Planungshorizont ergibt sich folgende Anzahl der möglichen Aktualisierungen der Prognosemodelle: Situation I: 990 Tests*4 Updates=3960; Situation IV: (990-62 (nicht zulässige und entartete Lösungen)) Tests*4 Updates=3716.

VARX-Modelle zum Einsatz gelangen als in Situation IV. Dabei ist ein leichter Trend von verringerten Lag-Ordnungen der exogenen Variablen zu erkennen. Daraus folgt, dass die Einbeziehung der Zeitreihen des Vorproduktes die Verwendung unterschiedlicher VARX-Modelle bekräftigt. Der Einfluss ist in Planungssituation I aufgrund reduzierter Entscheidungsmöglichkeiten größer als in Planungssituation IV. Die Planungssituation I ist somit anfälliger gegenüber Strukturbrüchen in den Zeitreihen.

	Planungssituation I				Planungssituation IV			
$l \backslash l'$	0	1	2	3	0	1	2	3
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0,25%	0,25%	0	0	0,03%	0,19%
3	0	0,20%	1,67%	1,16%	0	0	0,05%	4,82%
4	2,07%	5,53%	19,27%	69,6%	1,53%	0,86%	2,02%	90,5%

Tabelle 4.19: Prozentuale Verwendung der unterschiedlichen VARX-Modelle mit Lagordnungen l (exogen) und l' (endogen) bei 4 Updates im rollierenden Planungshorizont für Planungssituation I und IV

4.4 Auswertung der Planungsergebnisse

4.4.1 Berechnungszeiten

Zur Beurteilung des Rechenaufwandes werden in Tabelle 4.20 die durchschnittlichen Berechnungszeiten \bar{t} (in Sekunden) der einzelnen Testläufe und deren Variationskoeffizienten (VarK) je Planungssituation und Flexibilitätsstufe dargestellt. Aufgrund des mittelfristigen Planungshorizontes sind die Berechnungszeiten in allen Fällen akzeptabel. Es ist zu erkennen, dass die Werte der beiden Indikatoren in Planungssituation I kleiner sind als in Planungssituation IV. Die Zeit beträgt etwa 3 Sekunden. Die durchschnittliche Lösungszeit der Planungssituation IV ist ca. 200 bis 250-mal länger als in Planungssituation I und liegt durchschnittlich zwischen 678 und 783 Sekunden.

		Ressourcenflexibilität		
		voll flexibel	mittel flexibel	inflexibel
Planungssituation I	\bar{t}	2,99	3,18	2,58
	VarK	0,03	0,06	0,07
Planungssituation IV	\bar{t}	678,13	685,63	782,12
	VarK	2,00	2,26	2,02

Tabelle 4.20: Durchschnitte und Variationskoeffizienten der Berechnungszeiten (Sekunden) in Planungssituation I und IV

Diese Ergebnisse lassen sich durch die Anzahl von zu überprüfenden Kombinationen bei der Optimierung erklären. In Planungssituation I stimmt die Absatz- mit der Nachfragemenge und die Rücknahme- mit der Rückflussmenge überein. Dadurch ist die Anzahl der zu treffenden Entscheidungen geringer als in Planungssituation IV. Dies führt zu weniger Freiheitsgraden in Planungssituation I und zu einem geringeren Rechenaufwand. Diese Beobachtung steht der **Vermutung 1.1** nicht entgegen.

In Planungssituation I sind die Variationskoeffizienten der Berechnungszeiten sehr klein und sehr nahe an null. In Planungssituation IV nehmen sie einen Wert zwischen 2 und 2,26 an. Ein Variationskoeffizient größer als 1 sagt aus, dass die Standardabweichung größer als der Mittelwert ist und die Berechnungszeiten erheblich schwanken. Somit haben zufällige Schwankungen der unsicheren Parameter in Planungssituation IV höheren Einfluss auf die durchschnittliche Lösungszeit als in Situation I. Dies resultiert insbesondere aus der größeren Anzahl von Entscheidungsmöglichkeiten (Rechenaufwand) bei realisierten Werten der Nachfrage und Rückflussmenge.

In Planungssituation I sind im Gegensatz zu Planungssituation IV keine großen Veränderungen bzgl. der durchschnittlichen Lösungszeit bei den unterschiedlichen Flexibilitätsstufen auszumachen. Durchschnittlich führt die Erfüllung der Restriktionen (vollständige Nachfragebedienung, vollständige Güterrückflussannahme) in diesen Tests zu einer Erhöhung der Modellkomplexität und zur Erhöhung der durchschnittlichen Lösungszeit. In Planungssituation IV hingegen ist zu erkennen, dass die durchschnittliche Lösungszeit mit absteigender Flexibilität steigt. Zudem ist zu erkennen, dass der Variationskoeffizient bei mittlerer Flexibilität in beiden Planungssi-

tuationen am höchsten ist, d.h., dass sich bei mittlerer Flexibilität die größten Auswirkungen auf die durchschnittliche Lösungszeit zeigen.

In der Gesamtsicht ist zu konstatieren, dass eine Erweiterung des Zuordnungsproblems durch zunehmende Flexibilität nicht unbedingt mit einer Erhöhung der durchschnittlichen Lösungszeit einhergeht. Die Ergebnisse widersprechen der **Vermutung 1.2** für die Planungssituation IV.

4.4.2 Realisierter Kapitalwert

Die Ergebnisse des durchschnittlichen Kapitalwertes ZM je Szenariokonstellation (SK) werden in den folgenden Abbildungen für die Planungssituation I und IV je nach Flexibilitätsstufe (Flex1: voll flexibel, Flex2: mittel flexibel, Flex3: inflexibel) dargestellt. Als Vergleichsbasis dient die Datenkonstellation SK0 (vgl. Abbildung 4.6), in der das Nachfrageniveau des Vorproduktes als Ausgangspunkt für das Neuprodukt angenommen wird. Dies entspricht einer Abweichung von $\pm 0\%$.

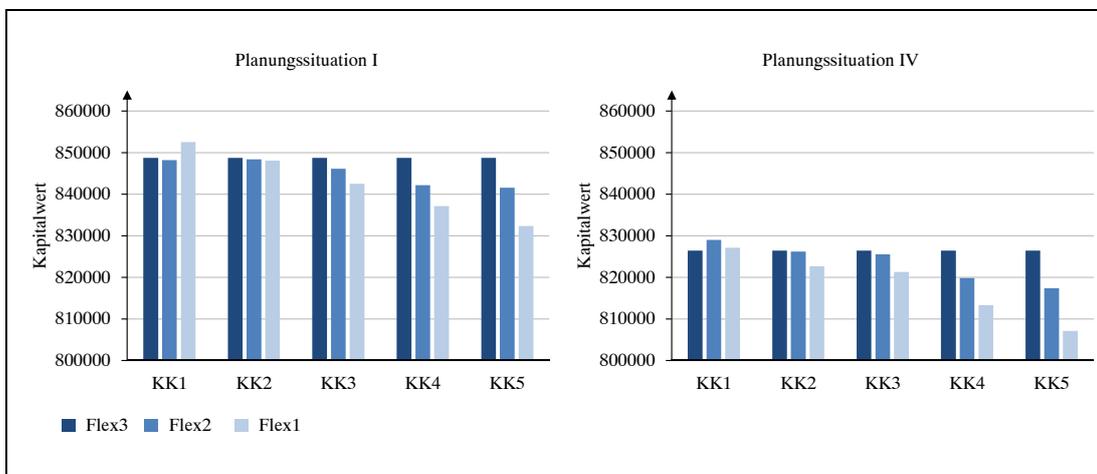


Abbildung 4.6: Durchschnitt der generierten Kapitalwerte der Vergleichskonstellation SK0 in Planungssituation I und IV für alle Auszahlungs- und Flexibilitätskonstellationen

Die Analyse der Abbildung 4.6 zeigt, dass in Planungssituation I durchschnittlich ein höherer Kapitalwert vorliegt als in Planungssituation IV. Diese Beobachtung widerspricht der **Vermutung 2.1** für die Vergleichskonstellation. Eine genaue Analyse der Ergebnisse zeigt, dass die Initialplanung in Planungssituation IV immer einen höheren Kapitalwert errechnet. Die im Planungsablauf unterschiedlichen Entscheidungs-

möglichkeiten der vorliegenden Planungssituationen führen zu diesen Ergebnissen. Als erstes ist deren Einfluss auf die Spezifikation des Prognosemodells als Ursache zu nennen. Durch die vollständige Nachfrageerfüllung und Rücknahme der Güterrückflüsse in Planungssituation I ist der Verlauf der Zeitreihen des Neuproduktes dem des Vorproduktes sehr ähnlich. Nur die unsystematischen Abweichungen und das Niveau der Höhe dieser Zeitreihen können beim Neuprodukt abweichen. In Planungssituation IV hingegen sind Entscheidungen bzgl. der Absatz- und Rücknahmeentscheidungen möglich. Da die Güterrückflussmengen aufgrund der hohen Aufbereitungskosten in dem vorliegenden Testdesign nicht attraktiv sind, kann dies zu Strukturbrüchen in den Zeitreihen führen. Zudem werden die bei der Spezifikation des Prognosemodells vorliegenden Zeitreihen im Zeitablauf durch realisierte Werte aktualisiert. Die Aktualisierungen finden jedoch in seltenen Abständen statt. Es wurden 4 Updates im Planungszeitraum durchgeführt, so dass der Einfluss der alten Zeitreihen im Planungsablauf sehr stark ist. Die so verursachten Strukturbrüche in Kombination mit den relativ seltenen Updates führen zu einer geringeren Prognosequalität der Güterrückflussmengen als in Planungssituation I.

Ein weiterer Grund für die Unterschiede der Kapitalwerte besteht im Testablauf. Zunächst werden in beiden Planungssituationen die Absatzmengen nach Feststehen des Kapazitätsplans so eingeplant, dass Szenario 1 realisiert wird, also die untere Grenze des 95%-Quantils, so dass kein Nachfrageszenario verletzt wird. In Planungssituation IV ergeben sich die realisierten Absatzmengen dann als Minimum der Absatzhöchstmenge und den geplanten Absatzmengen. Dadurch wird ein Zukauf bzw. eine Erwerbung von Neuprodukten am Beschaffungsmarkt verhindert. In Planungssituation I ist dies notwendig, um die Nachfrage vollständig zu bedienen. Die höheren Anschaffungsauszahlungen werden durch das Einsparungspotential, welches durch die Aufbereitung der erhöhten Güterrückflussmengen generiert wird, kompensiert. Dies hat in Planungssituation I einen positiven Effekt auf den Kapitalwert.

Um die Auswirkungen von *Prognosefehlern* auf den realisierten Kapitalwert zu analysieren, werden im folgenden Ergebnisse der Szenariokonstellationen SK1 bis SK8 dargestellt. Die Abbildungen 4.7 und 4.8 zeigen die relativen Veränderungen des Kapitalwertes der Szenariokonstellationen SK1 bis SK8 zur Vergleichskonstellation

SK0 für jede Flexibilitäts- und Kostenstufe in Planungssituation I und IV. Sie sind nach der Relation zwischen Expertenerwartung und tatsächlich eingetretener Nachfragesituation sortiert: Unter- ($e < c$) bzw. Überschätzung ($c < e$) der Nachfrage.

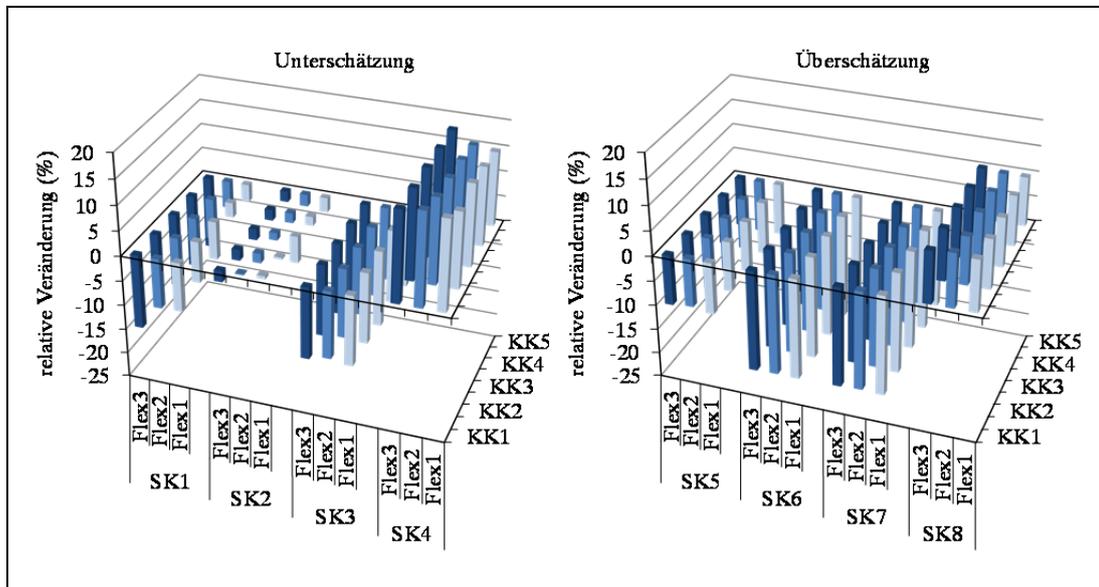


Abbildung 4.7: Durchschnittliche relative Veränderung des Kapitalwertes zur Vergleichskonstellation SK0 in der Planungssituation I bei Unter- und Überschätzung der Nachfrage

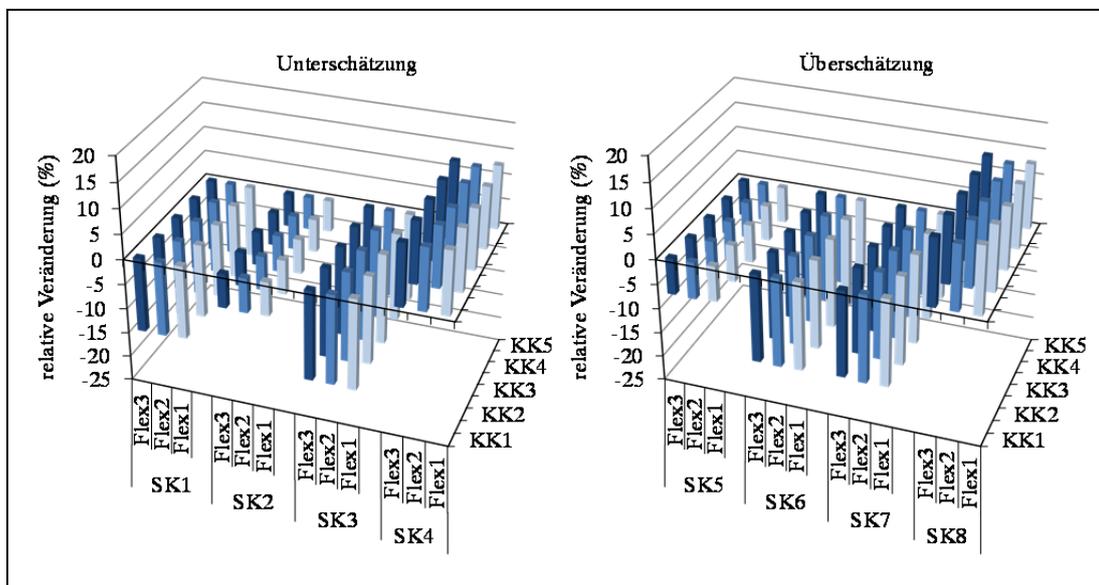


Abbildung 4.8: Durchschnittliche relative Veränderung des Kapitalwertes zur Vergleichskonstellation SK0 in der Planungssituation IV bei Unter- und Überschätzung der Nachfrage

In der Gesamtsicht der durchschnittlichen Kapitalwerte zeigen sich ähnliche relative Veränderungen der generierten Kapitalwerte bei steigenden variablen Zahlungen (KK2-KK5) und je Flexibilitätsstufe für die Kapazitätsanpassung. Tabelle 4.21 stellt die durchschnittlichen relativen Veränderungen für die Szenariokonstellationen über alle Kostenkombinationen dar.

SK	Nachfrageunterschätzung				Nachfrageüberschätzung			
	SK1	SK2	SK3	SK4	SK5	SK6	SK7	SK8
Absatzpotential	+20%	+10%	-10%	+20%	-10%	-20%	-20%	+10%
Planungssituation I	-7,77	-1,79	-14,50	16,29	-10,34	-20,77	-20,22	9,90
Planungssituation IV	-14,87	-6,77	-18,13	12,12	-7,41	-18,13	-17,88	12,78

Tabelle 4.21: Durchschnittliche relative Veränderung des Kapitalwertes zur Vergleichskonstellation SK0

Aus den Daten wird deutlich, dass sich in Planungssituation I und IV Fehleinschätzungen der Nachfrageentwicklung des Neuproduktes teilweise negativ auf den Kapitalwert auswirken. Im Fall der Unterschätzung (SK1-SK4) wird aufgrund unzureichender Kapazität das Absatzpotential (+20%, +10%, -10%, +20%) in beiden Situationen nicht ausgeschöpft. Im Fall der Überschätzung (SK5-SK8) können die überhöhten Investitionen in Planungssituation IV durch erhöhte laufende Zahlungsüberschüsse kompensiert werden; in Planungssituation I hingegen nicht.

In beiden Situationen ist die größte positive relative Veränderung bei Unterschätzung in SK4 zu erkennen und bei Überschätzung in SK8. Das sind die beiden Konstellationen, in denen der Experte einen Nachfrageanstieg für das Neuprodukt annimmt, aber die tatsächliche Nachfrage um 10% unter- (SK4) bzw. überschätzt (SK8). Alle anderen Fehleinschätzungen der Nachfrage durch den Experten haben keine oder negative Auswirkungen auf die Ausprägung des Kapitalwertes. Weiterhin ist zu erkennen, dass in Planungssituation I bei Nachfrageunterschätzung und in Planungssituation IV bei Nachfrageüberschätzung die positiveren relativen Veränderungen auftreten. In der Gesamtsicht ist zu resümieren, dass bei Unterschätzung in Planungssituation I und bei Überschätzung in Planungssituation IV besser auf systematische Unsicherheiten reagiert werden kann.

Unterschätzung ($e < c$): In Planungssituation I ist bei einem Nachfragerückgang für das Neuprodukt zu erkennen, dass ihre Unterschätzung (SK3) die Reduzierung des Kapitalwertes verstärkt (Kapitalwertreduktion $>$ Nachfragereduktion). Durchschnittlich reduziert sich der Kapitalwert bei einem Nachfragerückgang von 10% um 14,50% in Planungssituation I und um 18,13% in Planungssituation IV. Bei einer höheren Nachfrage kann das Absatzpotential in beiden Situationen nicht ausgeschöpft werden. Der positive Effekt wird entweder gedämpft (SK4) oder sogar umgekehrt (SK1, SK2). Es ist deutlich zu erkennen, dass die relativen Veränderungen des Kapitalwertes in Planungssituation IV schlechter sind als in Planungssituation I. Der größte Unterschied zwischen den durchschnittlichen relativen Abweichungen besteht in der Szenariokonstellation SK1. Dort liegt eine Unterschätzung von 40% vor. Bei einer Kapitalwertreduktion bedeutet diese eine höhere negative Abweichung; bei einer Kapitalwerterhöhung eine niedrigere positive Veränderung. An der positiveren relativen Veränderung des Kapitalwertes in Planungssituation I ist zu erkennen, dass trotz geforderter vollständiger Nachfragebedienung und unzureichend aufgebauter Kapazität höhere Einzahlungen (Erlöse) als in Planungssituation IV generiert werden können. Ein ausschlaggebender Grund für diesen Effekt ist die Aufbereitung der Güterückflüsse, die in einem höheren Ausmaß zurückfließen als vorher erwartet wurde.

Überschätzung ($c < e$): In Planungssituation I hat die Nachfrageüberschätzung bei einem Nachfragerückgang (SK5, SK6, SK7) und einem Nachfrageanstieg (SK8) kaum Auswirkungen auf den Kapitalwert (Kapitalwertreduktion \approx Nachfragereduktion bzw. Kapitalwerterhöhung \approx Nachfrageerhöhung). Die Nachfrage wird vollständig bedient und alle Güterückflüsse werden zurückgenommen. Die Fehleinschätzung bzgl. der Kapazitätsplanung hat keine Auswirkung auf den möglichen Absatz.

Die Beobachtungen zeigen, dass in Planungssituation IV die Überschätzung den negativen Effekt eines Nachfragerückgang (SK5, SK6, SK7) abschwächt (Kapitalwertreduktion $<$ Nachfragereduktion). Bei einer höheren Nachfrage (SK8) geht mit einer Überschätzung eine Erhöhung des Kapitalwertes einher (Kapitalwerterhöhung $>$ Nachfrageerhöhung). Da in beiden Situationen die Absatzmengen von der Nachfrage restringiert werden, werden die Ergebnisse des Kapitalwertes in Planungssituation IV durch eine Reduzierung der Auszahlungen für Lagerhaltung und Entsorgung der Gü-

terrückflüsse bewirkt. Eine genaue Analyse der Ergebnisse zeigt, dass die Rücknahme der Güterrückflussart $j = 4$ vermieden wird, da die Rücknahme und die Verarbeitung dieser Art sehr zahlungsintensiv sind. Der relative Anstieg des Kapitalwertes im Vergleich zur Nachfrageentwicklung beträgt in etwa 2-3%.

In der Gesamtsicht ist zu resümieren, dass sich die Prognosequalität in den meisten Fällen auf den generierten Kapitalwert auswirkt. Fehleinschätzungen der Nachfrageentwicklung in Planungssituation I haben negative Auswirkungen auf den realisierten Kapitalwert. Mit zunehmender Unzuverlässigkeit der Prognose wird der Kapitalwert reduziert. Dabei reduziert eine Unterschätzung des Kapazitätsbedarfs den Kapitalwert stärker als eine Überschätzung. Negative Auswirkungen auf den Kapitalwert bei abnehmender Prognosequalität sind in Planungssituation IV erkennbar. Hingegen können bei einer Überschätzung der Nachfrage positive Effekte generiert werden: Die erhöhten Investitionen können teilweise durch erhöhte laufende Zahlungen kompensiert werden. Diese Ergebnisse widersprechen der **Vermutung 2.2** für die Planungssituation IV.

Bezüglich des Einsatzes von *flexiblen Ressourcen* und dessen Auswirkungen auf den realisierten Kapitalwert konnten folgende Beobachtungen gemacht werden: In Vergleichskonstellation SK0 ist zu erkennen, dass in Kostenkombination 1 (KK1) eine höhere Ressourcenflexibilität einen höheren Kapitalwert bedingt (siehe Abbildung 4.6). Wenn die variablen Anpassungskosten steigen (KK2-KK5), können die Vorteile der Mehrzweckaggregate (Bestandsflexibilität) die Kosten nicht mehr kompensieren. Dies ist in Planungssituation I und IV ab Auszahlungskonstellation 2 der Fall. Das bedeutet, dass sich die Investition in flexiblere Ressourcen bei Vorliegen der Kostenkombination 1 für die Unternehmung lohnt. Dort haben alle Ressourcen die gleiche Kostenstruktur.

Die Ergebnisse der weiteren Szenariokonstellationen SK1 bis SK8 (Tabellen 4.7 und 4.8) zeigen ähnliche relative Veränderungen der generierten Kapitalwerte bei steigenden variablen Zahlungen (KK2-KK5) und je Flexibilitätsstufe für die Kapazitätsanpassung. Das bedeutet, dass mit zunehmender Zahlung für höhere Flexibilität tendenziell die Kapitalwerte sinken wie in Vergleichskonstellation SK0. Somit gilt, dass

die erhöhten Anschaffungsauszahlungen für flexiblere Anlagen nicht durch die aufgrund der Flexibilität verminderten Anpassungsauszahlungen kompensiert werden. Einzige Ausnahme ist die Entwicklung der Kapitalwerte in Szenariokonstellation SK1 in Planungssituation I. Dort ist sowohl in Flexibilitätsstufe 2 als auch in Stufe 1 ein Anstieg der Kapitalwerte bei steigenden variablen Anschaffungsauszahlungen zuerkennen.

In der Gesamtsicht ist zu erkennen, dass Investitionen in flexible Ressourcen sich unter Unsicherheit positiv auf den Kapitalwert auswirken können. Dies ist jedoch von dem Unterschied zu den Investitionsauszahlungen für weniger flexible Ressourcen und von der Art und dem Ausmaß der Unsicherheit abhängig. Mit diesen Ergebnissen wird der **Vermutung 2.3** teilweise widersprochen.

4.4.3 Robustheit

4.4.3.1 Ergebnisrobustheit

Eine Analyse der Variationskoeffizienten der Kapitalwerte erlaubt erste Robustheitsaussagen. Im Hinblick auf die Ergebnisrobustheit ist erkennbar, inwieweit die zufälligen Schwankungen der Absatzhöchst- und Rückflussmengen bei unterschiedlicher Nachfrage- und Rückflusseinschätzung (SK0-SK8) und bei unterschiedlicher Flexibilität der Anlagen (Flex1-Flex3) absorbiert werden.

Die Variationskoeffizienten der generierten Kapitalwerte für Szenariokonstellation 0 sind generell in jeder Planungssituation, in jeder Auszahlungskonstellation und in jeder Flexibilitätskonfiguration sehr niedrig bzw. sehr nahe an null ($\text{VarK} < 0,012$) (siehe Abbildung 4.9). Das bedeutet, dass zufällige Schwankungen der Nachfrage- und Rückflussmengen einen geringen Einfluss auf den durchschnittlichen Kapitalwert haben. Die Ergebnisrobustheit ist also hoch. In der Planungssituation IV zeigen die Werte der Variationskoeffizienten stärkere Schwankungen als in Planungssituation I. Dies resultiert aus den zufälligen Schwankungen der Nachfrage- und Rückflussmengen sowie den höheren Freiheitsgraden bzgl. der Nachfragebedienung und der Güterrückflussannahme in Planungssituation IV. Die **Vermutung 3.1** kann nicht bestätigt werden.

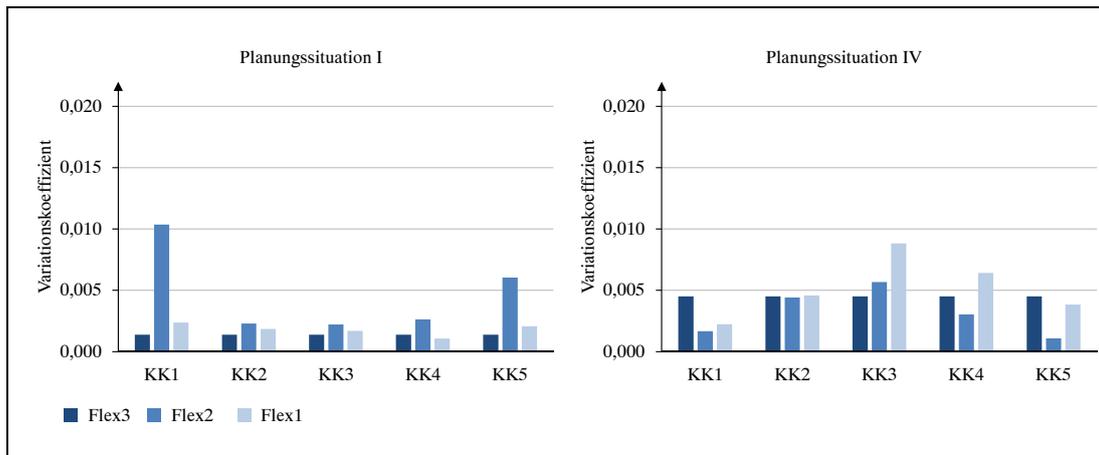


Abbildung 4.9: Variationskoeffizient der generierten Kapitalwerte der Vergleichskonstellation SK0 in Planungssituation I und IV für alle Auszahlungs- und Flexibilitätskonstellationen

Die Abbildungen 4.10 und 4.11 zeigen die Ergebnisse der Variationskoeffizienten für die Szenariokonstellationen SK1 bis SK8 in beiden Planungssituationen bei Unter- und Überschätzung der Nachfrage. Es ist zu erkennen, dass *Prognosefehler* und Strukturbrüche in den Zeitreihen (durch Niveaushiftung der Nachfrage im Vergleich zum Vorprodukt) grundsätzlich negativ auf die Ergebnisrobustheit auswirken. Jedoch ist das Niveau der Variationskoeffizienten in beiden Planungssituationen für alle Auszahlungs- und Flexibilitätskonstellationen weiterhin sehr niedrig, da es einen Wert nahe an null annimmt. Es liegt für alle Konstellationen unter 0,02, was bedeutet, dass die Standardabweichung maximal 2% des Mittelwertes ausmacht. Die Schwankungen der Nachfrage- (periodische Schwankungen mit maximal 4% Einfluss) und Rückflussmengen (gleichverteilter Störterm, max. 1%) haben folglich einen geringen Einfluss auf den generierten Kapitalwert.

In Planungssituation I ist erkennbar, dass eine Unterschätzung der Nachfrage die Ergebnisrobustheit tendenziell deutlicher abschwächt als eine Überschätzung, vor allem dann, wenn die Prognosequalität sehr niedrig ist (SK1, SK2). Die Szenariokonstellation 1 liefert die niedrigste Ergebnisrobustheit (Unterschätzung um 40%). Das heißt, dass zufällige Abweichungen zu höheren Schwankungen des Kapitalwerts führen. Durch eine Erhöhung des Nachfrageniveaus im Vergleich zum Vorgängerprodukt wird die Ergebnisrobustheit tendenziell deutlicher abgeschwächt als durch eine Reduktion, vor allem dann, wenn die Prognosequalität niedrig ist (SK1, SK2, SK8).

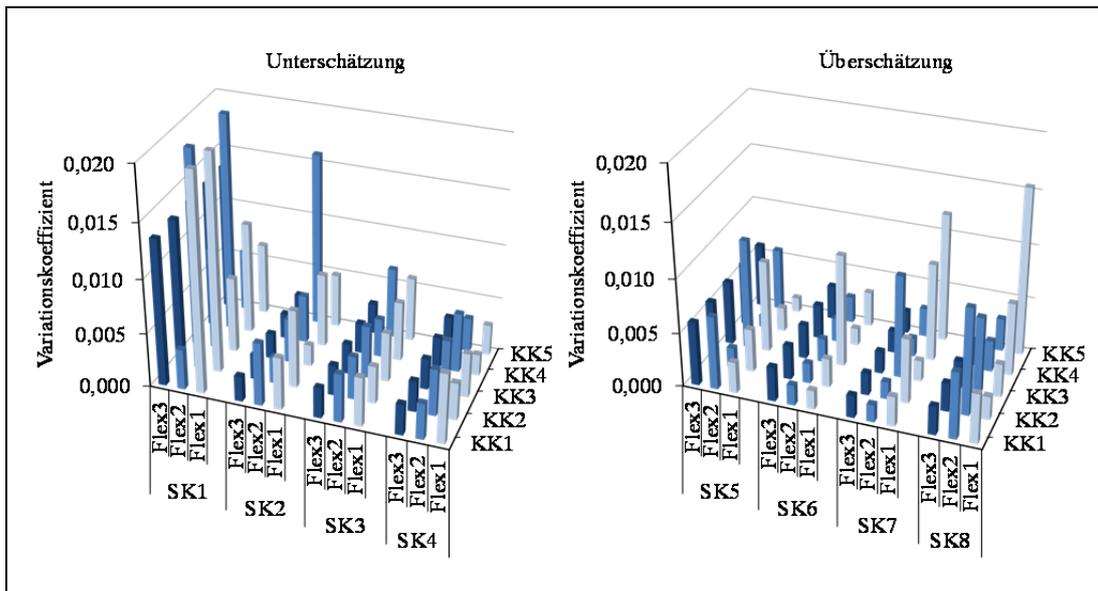


Abbildung 4.10: Variationskoeffizienten der Kapitalwerte in der Planungssituation I bei Unter- und Überschätzung der Nachfrage

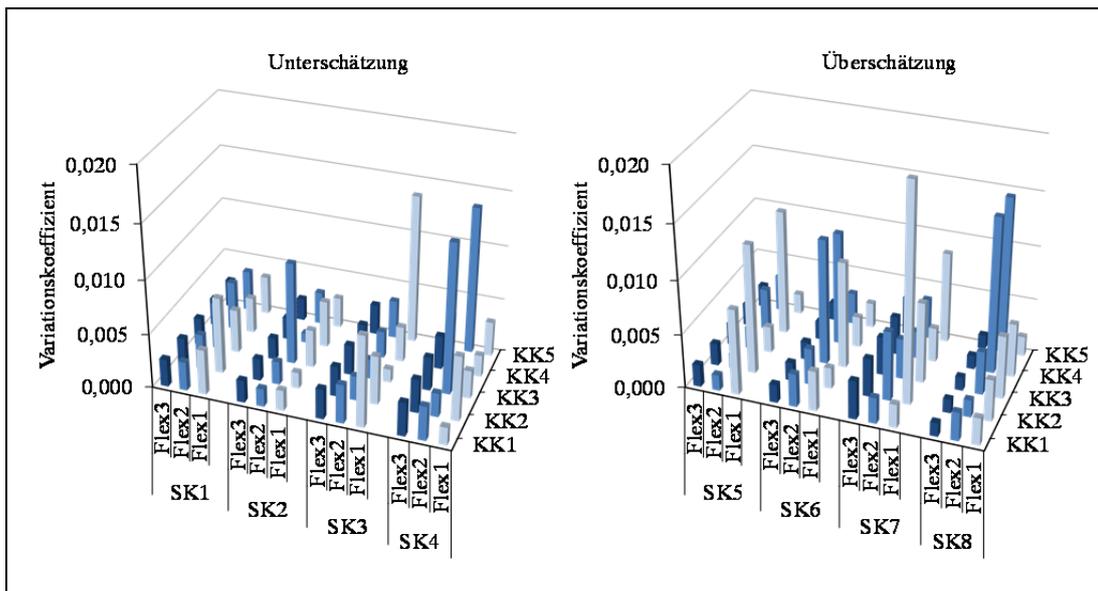


Abbildung 4.11: Variationskoeffizienten der Kapitalwerte in der Planungssituation IV bei Unter- und Überschätzung der Nachfrage

In Planungssituation IV können gegenläufige Aussagen zu Planungssituation I getroffen werden (siehe Abbildung 4.11). In Planungssituation IV schwächt eine Überschätzung der Nachfrage die Ergebnisrobustheit tendenziell deutlicher ab als eine Unterschätzung. Das bedeutet, dass zufällige Schwankungen der Nachfrage und des Rückflusses einen größeren Einfluss auf den generierten Kapitalwert haben. Insbesondere fällt auf, dass die Konstellation SK1, die in Planungssituation I die niedrigste

Ergebnisrobustheit aufzeigt, in Planungssituation IV eine sehr hohe Ergebnisrobustheit hat. Diese Ergebnisse können durch die in Planungssituation I geforderten vollständigen Nachfragebedienung und Güterrückflussbewältigung erklärt werden. Zufällige Schwankungen können bei unzureichend aufgebauter Kapazität in Planungssituation I zu häufigen Auszahlungen (Auszahlungen für ad-hoc-Käufe) führen. In Planungssituation IV schwächen jedoch zufällige Schwankungen bei einem hohen Prognosefehler und bei Unterschätzung (SK1, SK2) die Ergebnisrobustheit deutlich weniger ab als bei Überschätzung (SK5, SK6).

In der Gesamtsicht widersprechen die Beobachtungen teilweise der **Vermutung 3.2**. Große Abweichungen zwischen tatsächlichem und erwartetem Kapazitätsbedarf führen nur in Planungssituation I zu stärkeren Anpassungen und einer deutlicheren Abschwächung der Ergebnisrobustheit. Des Weiteren wirkt eine Überschätzung in Planungssituation IV stärker negativ als eine Unterschätzung.

Die Analyse der Auswirkungen unterschiedlicher Flexibilitätskombinationen der eingesetzten Ressourcen zeigt, dass in der Vergleichskonstellation bei steigenden variablen Kapazitätsanpassungskosten für Flex2 und Flex1 (KK2-KK5) in beiden Situationen ein gegenläufiger Trend zu erkennen ist. In Planungssituation I verlaufen die Variationskoeffizienten konvex und in Planungssituation IV konkav. In Szenario-konstellation SK1 bis SK8 weisen Investitionen in flexible Ressourcen in beiden Planungssituationen keine einheitliche Wirkung auf die Ergebnisrobustheit auf, auch hier ist ihre Vorteilhaftigkeit von der Höhe der Investitionsauszahlungen und der Nachfragekonstellation abhängig. Es lässt sich feststellen, dass bei steigenden variablen Auszahlungen für Kapazitätsanpassungen die Ergebnisrobustheit tendenziell sinkt. Dies sieht sich insbesondere bei einem Nachfrageanstieg für das neue Produkt erkennen (SK1, SK2, SK4 und SK8). Somit kann der **Vermutung 3.3** nicht widersprochen werden.

4.4.3.2 Planungsrobustheit

Die Analyse der Planungsrobustheit mit dem Indikator von Kimms (1998) gibt Auskunft darüber, in welchem Ausmaß Fehleinschätzungen der Nachfrage und der Einsatz von flexiblen Ressourcen mit unterschiedlichen variablen Kapazitätsanpassungsauszahlungen die Häufigkeit und Stärke von Plananpassungen beeinflussen. Ein hoher Wert des Indikators deutet auf eine niedrige Planungsrobustheit hin. Je weniger Plananpassungen erfolgen und je geringfügiger die Planänderungen sind, umso näher ist der Robustheitsindikator am Wert null und umso robuster ist der Plan. Unterschiede in der Planungsrobustheit einzelner Konstellationen beider Planungssituationen lassen sich durch eine aggregierte Betrachtung verdeutlichen, bei der die durchschnittliche Planungsrobustheit über alle Maschinen, Durchläufe und Planungszyklen, welche Modifikationen der Kapazitätspläne bewirken können, für jede Flexibilitätsstufe ermittelt wird. Dabei werden die Kapazitätsanpassungen, die zeitlich näher an den Planungszeitpunkten sind, höher gewichtet. Da 4 Updates der Kapazitätspläne in einem Zeitraum von 40 Perioden vorgenommen werden, finden Planungen zu den Planungszeitpunkten 1, 9, 17, 25 und 33 statt.

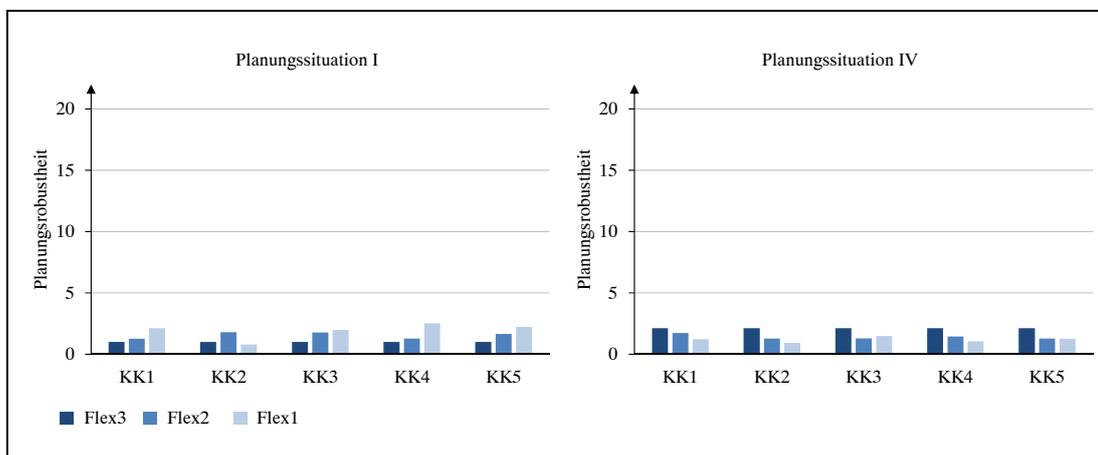


Abbildung 4.12: Durchschnittliche Planungsrobustheit der Vergleichskonstellation SK0 in den Planungssituationen I und IV

In Abbildung 4.12 werden die Werte der aggregierten Planungsrobustheit der Vergleichskonstellation (SK0) in Planungssituation I und IV dargestellt. Der Indikator nimmt in beiden Planungssituationen abhängig von der Flexibilitätsstufe und der Auszahlungskonstellationen einen Wert zwischen 0,8 und 2,5 an. Eine genaue Aus-

sage darüber, in welcher Planungssituation höhere Planungsrobustheit generiert wird, lässt sich nicht eindeutig treffen. Diese Ergebnisse stehen der **Vermutung 4.1** entgegen.

In den Abbildungen 4.13 und 4.14 werden die Ergebnisse der aggregierten Planungsrobustheit der weiteren Szenariokonstellationen (SK1-SK8) für alle Flexibilitäts- und Auszahlungskonstellationen der beiden Planungssituationen dargestellt. In der Gesamtsicht ist zu konstatieren, dass die Planungsrobustheit in SK0 tendenziell höher als in den anderen Konstellationen ist. Der Grund hierfür ist, dass das Neuprodukt einen ähnlichen Nachfrageverlauf aufweist wie das Vorprodukt und der Experte es richtig erkannt hat. Somit sind weniger Kapazitätsanpassungen notwendig als in Konstellationen, in denen die Expertenmeinung von der tatsächlichen Realisation abweicht oder die Realisation gegenüber dem Vorgänger abweicht. Somit resultiert, dass Fehleinschätzungen der Absatzhöchst- und Rückflussmengen durch den Experten tendenziell in beiden Situationen zu einer niedrigeren Planungsrobustheit führen.

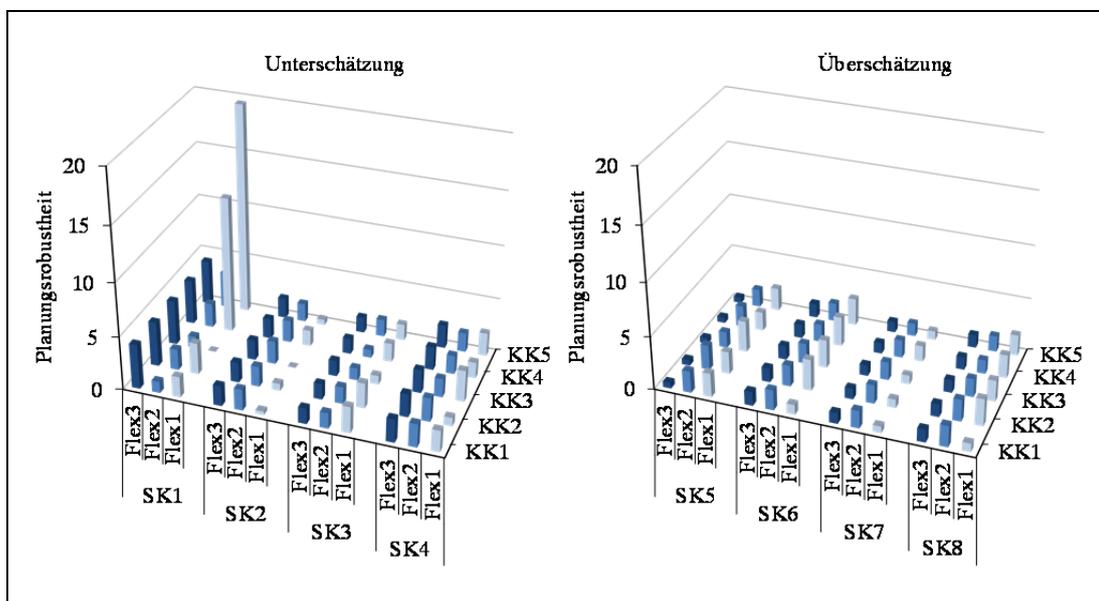


Abbildung 4.13: Durchschnittliche Planungsrobustheit der Kapazitätsanpassungsentscheidungen in der Planungssituation I bei Unter- und Überschätzung

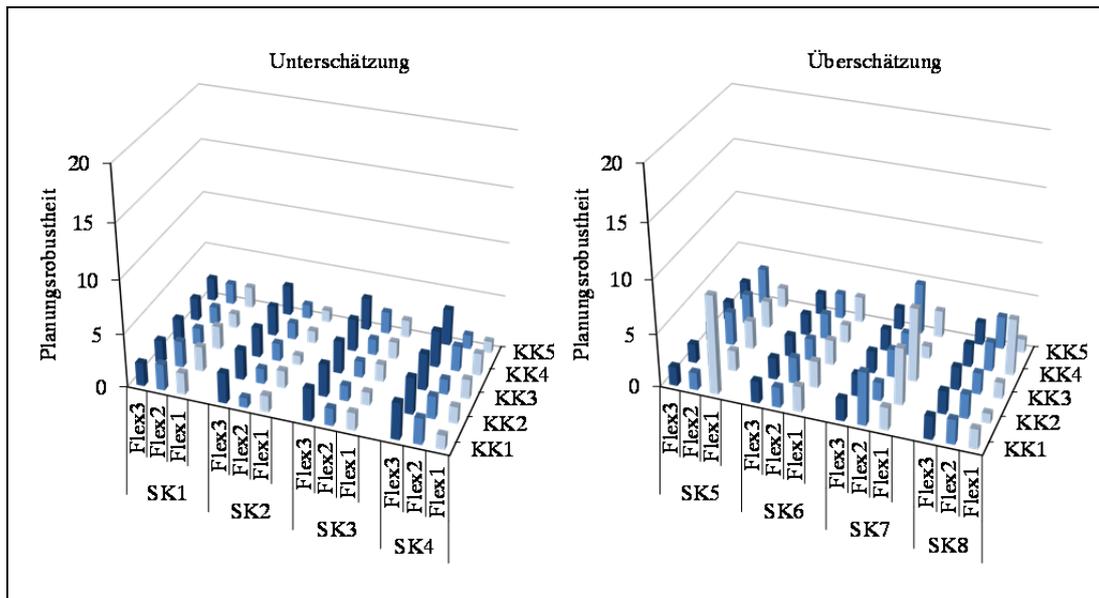


Abbildung 4.14: Durchschnittliche Planungsrobustheit der Expansions- und Kontraktionsentscheidungen in der Planungssituation IV bei Unter- und Überschätzung

Zur detaillierten Analyse der Fehleinschätzungen werden in Tabelle 4.22 die durchschnittlichen relativen Veränderungen des Robustheitsindikators zur Vergleichskonstellation dargestellt. Demnach zeigen nur 2 Kombinationen eine höhere Planungsrobustheit als SK0. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Planungsrobustheit in Planungssituation I tendenziell höher ist als in Planungssituation IV, wenn die Konstellation SK1 außer Acht gelassen wird. Dies lässt sich durch die zusätzlichen Entscheidungsmöglichkeiten (Absatz- und Rücknahmemengen) und durch die Annahmen der Prognoseverfahren erklären. In Planungssituation I wird eine höhere Stabilität der Prognose generiert, da eine vollständige Nachfragebedienung und eine vollständige Rücknahme aller Güterrückflüsse vorausgesetzt werden. Diese können gewährleistet werden, da ein Fremdbezug der Neuprodukte bzw. eine direkte Entsorgung der Rückflussmenge ohne Aufbereitung bei unzureichender aufgebauter Anlagenkapazität möglich ist. Da bei der Generierung der realisierten Rückflussmengen dasselbe Prognosemodell wie bei der Initialprognose eingesetzt wird, weisen die Zeitreihen des Neuproduktes die gleiche Systematik bzw. Struktur wie die des Vorproduktes auf.

	Nachfrageunterschätzung				Nachfrageüberschätzung			
SK	SK1	SK2	SK3	SK4	SK5	SK6	SK7	SK8
Absatzpotential	+20%	+10%	-10%	+20%	-10%	-20%	-20%	+10%
Planungssituation I	162,23	-7,65	4,93	22,90	24,32	36,70	-18,44	18,74
Planungssituation IV	51,50	8,26	26,20	38,19	134,47	71,87	150,75	77,47

Tabelle 4.22: Durchschnittliche relative Veränderung der Planungsrobustheit zur Vergleichskonstellation SK0

Die Annahme der zahlungsintensiven Güterrückflüsse, die im Testaufbau getroffen wurde, führen in Planungssituation IV zu Strukturbrüchen in den Zeitreihen. Bei der Generierung der Absatzdaten wird von einer Nachfrage-proportionalen Menge (85%) mit stochastischen Schwankungen von 10% ausgegangen, was nicht dem Entscheidungsverhalten des Neuproduktes entsprechen muss. Zudem wird bei der Analyse der Ergebnisse deutlich, dass auch die Annahmen der Rücknahmemengen, die im Prognosemodell angenommen werden, nicht der Realität entsprechen, da zum größten Teil auf die Rücknahme der Güterart 4 verzichtet wird, da diese sehr zahlungsintensiv ist. Dadurch kommt es zu Strukturbrüchen in den Zeitreihen, die zur Schätzung des Prognosemodells herangezogen werden. Im Planablauf wurde beschrieben, dass im Rahmen der Aktualisierung der Regressionsparameter der multivariaten Prognoseverfahren der Einfluss der Zeitreihen bis zum Ende des Planungszeitraumes weiter besteht, dieser aber mit jedem Update weiter abgeschwächt wird. Auch die Tatsache, dass in der Planung nur 4 Updates der Informationsbasis durchgeführt werden, unterstreicht den bestehenden Einfluss der Zeitreihen des Vorproduktes. Aus diesem Grund sind in Planungssituation IV häufigere und stärkere Kapazitätsanpassungen die Konsequenz der Strukturbrüche.

Die Auswirkungen von Fehleinschätzungen werden im Folgenden nach Unter- und Überschätzung des Kapazitätsbedarfs analysiert:

Unterschätzung ($e < c$): Der Indikator zeigt die größten positiven Abweichungen zur Vergleichskonstellation in beiden Planungssituationen in Szenariokonstellation I. In Planungssituation I ist die Abweichung dreimal größer als in Planungssituation IV.

In dieser Konstellation schätzt der Experte die Absatzhöchstmengen, sowie die Rückflussmengen um 40% niedriger ein als sie realisiert werden. Dies führt dazu, dass im Zeitablauf Anpassungsmaßnahmen vollzogen werden müssen. Dies schlägt sich in den Expansionsplänen und insbesondere in den Kontraktionsplänen nieder. Es wurde deutlich zu wenig Kapazität aufgebaut, deren Abbau zeitlich schrittweise nach hinten verlagert wird. Die beste durchschnittliche Verbesserung der Planungsrobustheit zur Vergleichskonstellation liefert Szenariokonstellation 2, sowohl in Planungssituation I als auch in Planungssituation IV.

Überschätzung (c<e): Bei Überschätzung ist die Planungsrobustheit in Planungssituation I höher als in Planungssituation IV. Das bedeutet, dass weniger starke Anpassungen bei systematischen und zufälligen Schwankungen vorgenommen wurden. Die Planungsrobustheit verschlechtert sich durchschnittlich um maximal 36,70%. Dies bedeutet, dass Fehleinschätzungen des Experten im Fall von Nachfrageüberschätzung weniger Auswirkungen auf die Planungsrobustheit haben als in Planungssituation IV.

Der Indikator zeigt bei stark niedriger Nachfrage (−20%) und einer geringen Fehleinschätzung der Absatzhöchst- und Rückflussmengen von 10% in Planungssituation I die höchste Planungsrobustheit. Dies ist auf die grundsätzlich niedrige Kapazitätsnachfrage aufgrund niedriger Absatz- und Rückflussmengen zurückzuführen. Am niedrigsten ist die Planungsrobustheit in Planungssituation IV im Fall SK7 bei Nachfragerückgang und einer Überschätzung von 10%. Insbesondere die Kontraktionspläne werden mehrfach nach unten korrigiert.

In der Gesamtsicht kann die **Vermutung 4.2** nicht bekräftigt werden. Grundsätzlich kann resümiert werden, dass die Prognosequalität Einfluss auf die Planungsrobustheit hat. Während bei Unterdeckung tendenziell große Abweichungen zwischen Expertenschätzung und tatsächlicher Nachfrage zu einer niedrigen Planungsrobustheit führen, induzieren bei Überdeckung kleine Prognosefehler häufigere Kapazitätsanpassungen in Planungssituation IV.

Bezüglich der Auswirkungen des Einsatzes von unterschiedlichen Flexibilitätskonfigurationen der Ressourcen können folgende Beobachtungen identifiziert werden:

Herangezogen werden die Ergebnisse der Kostenkombination KK1, in der die variablen Auszahlungen für Kapazitätsanpassungen für alle Ressourcen mit unterschiedlicher Eignung dieselbe Höhe haben. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, inwiefern eine Erhöhung der Ressourcenflexibilität zufällige Schwankungen absorbieren kann. In Vergleichskonstellation SK0 ist zu erkennen, dass die Eignung bzw. Flexibilität der Anlagen einen unterschiedlichen Effekt auf die Planungsrobustheit in beiden Planungssituationen hat (Abbildung 4.12). In Planungssituation I zeigen die Ergebnisse der Konstellation SK0, dass bei niedriger Flexibilität tendenziell eine höhere Robustheit vorliegt als bei hoher Flexibilität. In Planungssituation IV steigt hingegen tendenziell die Planungsrobustheit mit zunehmender Flexibilität. Das bedeutet, dass in Planungssituation IV unerwartete Schwankungen der Absatzhöchst- und Rückflussmengen beim Einsatz flexibler Anlagen und einer zuverlässigen Prognose weniger häufige/starke Plananpassungen induzieren. In Situation I ist dies nicht erkennbar.

In den weiteren Szenariokonstellationen (SK1-SK8) ist zu erkennen, dass in beiden Planungssituationen und bei Unterschätzung der Nachfrage die Planungsrobustheit tendenziell mit zunehmender Flexibilität bei Kostenkombination KK1 steigt. Das bedeutet, dass unerwartete Schwankungen von flexiblen Ressourcen besser absorbiert werden. Einzige Ausnahme ist die Konstellation SK3 in Planungssituation I, in der ein Nachfragerückgang des Neuproduktes um 10% zu erkennen ist. Bei Überschätzung der Nachfrage ist insbesondere bei einem Nachfragerückgang in Planungssituation IV erkennbar, dass unerwartete Schätzungen zu häufigeren/starken Kapazitätsanpassungen bei flexiblen Ressourcen führen können. Diese Ergebnisse widersprechen damit teilweise **Vermutung 4.3**.

Die Betrachtung der Ergebnisse des Indikators in den weiteren Kostenkombinationen lässt Aussagen über die Wirkungen von Erhöhungen der variablen Auszahlungen für Kapazitätsanpassungen zu. Die Abbildungen 4.13 und 4.14 zeigen, dass die aggregierte Planungsrobustheit in beiden Planungssituationen bei höherer Flexibilität tendenziell mit steigenden variablen Kapazitätsauszahlungen sinkt. Dieser Effekt ist aber grundsätzlich über alle Konstellationen nicht sehr hoch. Bei Unterschätzung ($e < c$) lässt sich der Einfluss der Erhöhung der variablen Anpassungsauszahlungen

erst erkennen, wenn die Nachfrage um 40% unterschätzt wurde (SK1). Das bedeutet, dass in den betrachteten Konstellationen eine Erhöhung der variablen Kapazitätsauszahlungen erst ab einer Expertenabweichung von 40% zu einer niedrigeren Planungsrobustheit führt und dies auch nur in Planungssituation I. Die Anlagenkapazität wird schrittweise nach oben korrigiert und Kontraktionspläne zeitlich nach hinten verschoben. In diesem Fall ist die Planungsrobustheit viel niedriger als bei starren Ressourcen. Mit steigenden Auszahlungen sinkt die Planungsrobustheit exponentiell.

Bei Überschätzung ($c < e$) ist ein größerer Einfluss der Erhöhung der variablen Kapazitätsauszahlungen für Anpassungen in beiden Planungssituationen zu erkennen. Mit steigenden Auszahlungen sinkt die Planungsrobustheit. Die Kontraktionspläne werden schrittweise nach unten korrigiert. Starke Verringerungen der Planungsrobustheit sind bei einem Nachfragerückgang in Planungssituation IV zu beobachten.

Mit diesen Ergebnissen kann **Vermutung 4.4** nicht widersprochen werden. Es wurde gezeigt, dass eine Erhöhung der Auszahlungen für Kapazitätsanpassung bei flexibleren Ressourcen zu häufigeren/stärkeren Kapazitätsanpassungen führen kann. Dieser Effekt ist jedoch von der Art und dem Ausmaß der Unsicherheit abhängig.

5 Fazit

Der Ausgangspunkt der Überlegungen dieser wissenschaftlichen Arbeit war die integrative Betrachtung von Gütererstellung und Güterrückflussbewältigung im Rahmen von CLSCs. Dabei stellte sich die Frage, wie den Wechselwirkungen dieser beiden Prozesse bei der Planung der Produkterstellungs- und Rückflussbewältigungskapazität in einem mittelfristigen Planungshorizont Rechnung getragen wird. Wesentlich ist dabei, dass der Kapazitätsbedarf durch voneinander abhängige Gütererstellungs- und Güterrückflüsse induziert wird, zwischen denen Markt-, Ressourcen- und Leistungsinterdependenzen bestehen können. Die mittelfristige Antizipation von Güternachfrage und -rückfluss ist durch hohe Unsicherheit geprägt, weil die autonome Disponierbarkeit durch den Entscheidungsträger nicht gegeben ist. Aufgrund der Risikoaversion des Entscheidungsträgers stellte sich zudem die Frage, welche Maßnahmen im Rahmen der Kapazitätsdimensionierung integriert werden, um robuste Pläne zu gestalten.

Die Literaturanalyse der Ansätze zur Kapazitätsdimensionierung zeigte, dass Produktions- und Rückflussbewältigungskapazität zumeist unabhängig voneinander geplant werden, so dass die aufgrund der Vernetzung der Güterflüsse bestehenden Wechselwirkungen unberücksichtigt bleiben. Überdies wird die Einbeziehung von Unsicherheit in Planungsansätzen mit direktem Bezug zur Kapazitätsdimensionierung nur vereinzelt betrachtet. Demnach bestehen überwiegend Unsicherheiten bzgl. der Produktnachfrage bzw. der Güterrückflussmengen, welche zumeist als Parameter mit bekannten Verteilungen modelliert werden. Des Weiteren werden unrealistische Annahmen über die Informationen zum Güterrückfluss getroffen. Die Verfügbarkeit dieser Informationen wird entweder vorausgesetzt, ohne die Prognoseprobleme zu berücksichtigen, oder es wird ein Prognoseverfahren herangezogen, das den Besonderheiten des Planungsproblems nicht Rechnung zu tragen vermag. Dadurch fließen insbesondere die Wechselwirkungen zwischen Produktnachfrage-/Absatzmenge und Güterrückfluss-/Rücknahmemenge nicht in das Planungskalkül mit ein. Diese werden vor allem durch die vorliegende Planungssituation bzgl. Nachfrageerfüllung und Rücknahme der Güterrückflüsse beeinflusst. Robustheitsüberlegungen werden bis-

lang nur in Ansätzen thematisiert, in denen die Kapazitätsdimensionierung eine untergeordnete Rolle spielt. Bei Planung mit unvollständiger Information wird lediglich in Ansätzen des Network-design-Problems durch die Schaffung von Flexibilität (Investition in hybride Standorte) die Möglichkeit gegeben, Unsicherheiten zu handhaben. Aus diesem Grund werden die Auswirkungen der Anwendung von wirkungsbezogenen Maßnahmen zur Handhabung der Unsicherheit im Rahmen der Kapazitätsdimensionierung nicht ausreichend diskutiert.

Aufbauend auf diesen Stand der Forschung standen die simultane Planung von Gütererstellungs- und Rückflussbewältigungskapazität und das daraus abgeleitete Problem der Nachfrage- und Güterrückflussprognose im Fokus der Betrachtung. Dies umfasste die Berücksichtigung der Abhängigkeiten zwischen dem konsumorientierten und rückgewinnungsorientierten Güterfluss sowie die Einbeziehung der Einflussfaktoren der Prognosewerte.

Folgende Forschungsfragen ließen sich aus der Analyse der wissenschaftlichen Literatur ableiten:

- (1) Wie lassen sich zeitliche und sachliche (Markt-, Leistungs- und Ressourcen-) Interdependenzen zwischen originären Produkten und ihren Güterrückflüssen in einem dynamischen Entscheidungsprozess kombinieren?
- (2) Welche ökonomischen Implikationen ergeben sich für die Kapazitätsdimensionierung, wenn unterschiedliche Planungssituationen, hinsichtlich Nachfrageerfüllung und Rücknahme von Güterrückflüssen, berücksichtigt werden?
- (3) Welche Auswirkungen hat die Risikoaversion des Entscheidungsträgers unter der Annahme unvollständiger Information auf das Entscheidungskalkül?
- (4) Wie können die zusätzlichen Unsicherheiten in CLSCs, die sich durch die Wechselbeziehungen zwischen Produktnachfrage-/Absatzmenge und Güterrückfluss-/Rücknahmemenge ergeben, im Entscheidungsmodell erfasst werden?
- (5) Welche Auswirkungen haben Prognosefehler und der Einsatz von flexiblen Ressourcen auf den Rechenaufwand, auf das monetäre Ziel und auf die Robustheit, und wie können sie gemessen werden?
- (6) Welchen Einfluss hat die Höhe der Expansions- und Kontraktionsauszahlungen der Potentialfaktoren auf die Planungsrobustheit?

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurde ein prognoseintegrierendes Modell zur simultanen Planung von Gütererstellungs- und Rückflussbewältigungskapazität entwickelt. Den Ausgangspunkt bildete eine Strukturierung des Planungsproblems, welche die Ideen aus den unterschiedlichen vorhandenen Kapazitätsdimensionierungsansätzen zusammenführt und um ein Güterflussmodell erweitert. Die Forschungsfragen werden im Folgenden zusammenfassend beantwortet:

(1) Die zeitlichen und sachlichen Interdependenzen zwischen originären Produkten und ihren Güterrückflüssen wurden in einem mehrperiodigen Planungsmodell erfasst, welches zwei Teilmodelle kombiniert: Im *aktivitätsanalytischen Güterflussmodell* werden einerseits die für die zu transformierenden Gütermengen auszuführenden Prozesse mit der jeweiligen Kapazitätsnachfrage und andererseits die Wechselwirkungen zwischen den Absatz- und Rückflussmengen abgebildet. Bedingt durch den mittelfristigen Planungshorizont der Kapazitätsdimensionierung erfolgte eine aggregierte Erfassung von Hin- und Rückflussgütern unterschiedlicher Qualität auf Produktebene mit Hilfe einer dynamischen linearen Technologie. Die Hin- und Rückflüsse sind über das Prognosemodell gekoppelt. Im *Kapazitätsanpassungsmodell* werden Kapazitätsexpansions- und -kontraktionsentscheidungen im Zeitablauf getroffen, um die für die Gütererstellung und Rückflussbewältigung erforderliche Kapazität zu decken. Zusätzlich erfasst dieses Teilmodell die Verzögerung zwischen der Investitions-/Desinvestitionsentscheidung und der daraus resultierenden Änderung der verfügbaren Kapazität.

(2) Abhängig von der vorliegenden Planungssituation bzgl. der Nachfrageerfüllung und der Rücknahmebedingung bestehen *unterschiedliche Handlungsmöglichkeiten* für die Unternehmung. Die vier Planungssituationen (I-IV) beschreiben, ob die Absatz- bzw. Rücknahmemengen den Nachfrage- bzw. Rückflussmengen entsprechen müssen. Bei vollständiger Nachfrageerfüllung bzw. vollständiger Rücknahmebedingung aufgrund vertraglicher und/oder gesetzlicher Verpflichtungen entfallen die Möglichkeiten, über Absatz und Rücknahme zu entscheiden.

(3) Aufgrund der Risikoaversion des Entscheidungsträgers stellte sich die Frage, welche Maßnahmen in den Planungsansatz integriert werden können, um die beste-

hende Unsicherheit zu handhaben. In der wissenschaftlichen Literatur wird die Generierung von Robustheit als wirkungsbezogene Maßnahme behandelt. Aus diesem Grund wird im Kapazitätsanpassungsmodell die Möglichkeit gegeben, über die qualitative Kapazität zu entscheiden. Dadurch ist es möglich, in *flexible Anlagen* zu investieren, die sowohl vorwärts- als auch rückwärtsgerichtete Güterflüsse bewältigen können. Durch den Aufbau von Bestandsflexibilität soll erzielt werden, dass die Auswirkungen von Unsicherheit gemindert oder kompensiert werden. Ein weiterer Ansatz zur Reduzierung der Auswirkungen von Unsicherheit ist die Einbeziehung unsicherer Größen im Planungsansatz. Die Nachfrage- und Rückflussunsicherheit wurden als relevante Unsicherheitsparameter identifiziert. Aus diesem Grund wurde ein dynamisches *stochastisches Planungsmodell* in Form eines zweistufigen szenariobasierten Kompensationsmodells formuliert. Auf der ersten Stufe des Kompensationsmodells werden die Kapazitätsexpansions- und -kontraktionsentscheidungen und auf der zweiten Stufe die operativen Anpassungsentscheidungen getroffen. Durch eine Szenariomodellierung ist es möglich, systematische und unsystematische Unsicherheit im Planungskalkül zu berücksichtigen, um die Planungsrobustheit zu erhöhen. Das vorliegende unsichere Entscheidungsfeld induziert die Relevanz, im Zeitablauf sukzessive Informationszuwächse bei der weiteren Planung zu berücksichtigen. Von besonderer Relevanz sind die Realisationen bezüglich der unsicheren Parameter und den getroffenen Entscheidungen für die Prognose der Nachfrage und des Rückflusses. Aus diesem Grund wurde der Planungsansatz durch die Betrachtung eines rollierenden Planungshorizontes erweitert („rollierende Planung“). Um die Auswirkungen der Modellintegration der Maßnahmen auf das monetäre Ziel und die Planungsrobustheit messen zu können, wurden geeignete Ansätze der Literatur auf das vorliegende Planungsproblem übertragen.

(4) Die Wechselbeziehungen zwischen Produktnachfrage-/Absatzmengen und Güterrückfluss-/Rücknahmemengen wurden durch die Integration von Prognoseverfahren im Entscheidungsmodell erfasst. Dabei bezieht sich die für die Kapazitätsdimensionierung in CLSC erforderliche *Prognose* auf die Entwicklung der Nachfrage- und Rückflussmengen im Zeitablauf. Zentrale Voraussetzungen sind dabei eine Prognose des gesamten Produktlebens- und Rückflusszyklus, die die Wechselwirkungen zwi-

schen Nachfrage- und Rückflussmengen mehrerer Güterarten erfasst, sowie die adäquate Berücksichtigung der aus der Prognose hervorgehenden unsicheren Aussagen über zukünftige Güterflussmengen im Planungsmodell. Die Analyse der Beziehungen ergab, dass der erfolgte Absatz folglich eine notwendige Bedingung für den Güterrückfluss ist. Sein zeitliches, mengenmäßiges, qualitatives und örtliches Auftreten ist jedoch direkt von den Handlungen des Konsumenten (Motive für die Rückgabe) und des Produzenten (Motive für die Rücknahme, für den Konsumenten gesetzte Rückgabeanreize) und indirekt von den gesellschaftlichen (z.B. in rechtlicher, ökonomischer, sozialer und demographischer Hinsicht) und technologischen Rahmenbedingungen, unter denen Konsumenten und Produzenten agieren, abhängig. Es stellte sich die Frage, wie der funktionale Zusammenhang zwischen den zukünftigen Rückflussmengen, den in Vorperioden bestehenden Nachfragemengen, realisierten Absatzmengen, Rückflussmengen, Rücknahmemengen und weiteren Einflussfaktoren bei der Prognose Rechnung getragen werden kann. In Abhängigkeit wesentlicher Charakteristika der CLSC (Planungssituation und Abhängigkeitsverhältnis zwischen Nachfrage- und Rückflussmengen) wurden unterschiedliche SEM herausgearbeitet, die diesen Anforderungen gerecht wurden. So können durch die Modellierung der erklärenden und zu erklärenden Größen als exogene und/oder endogene Variablen die Wechselwirkungen abgebildet werden. Insbesondere das Potential der Identifikation und der Abbildung von Marktinterdependenzen zwischen originären Produkten und ihren Güterrückflüssen ist in diesem Kontext hervorzuheben. Aufgrund des Abhängigkeitsverhältnisses zwischen Nachfrage- und Rückflussmengen ergaben sich zwei unterschiedliche Prognoseorte: Die Prognose der endogenen Größen (Rückflussmengen und ggf. Nachfragemengen) vollzieht sich innerhalb des Planungsmodells und die der exogenen Größen (z.B. Nachfragemengen) außerhalb des Modells. Bei endogenen Größen kommen die vorgestellten Prognosemodelle zum Einsatz. Für exogene Größen wurden in der Literatur diskutierte Wachstumsfunktionen aufgezeigt, die insbesondere längerfristige Entwicklungen berücksichtigen können und damit den Anforderungen einer mittelfristigen Prognose genügen.

Für die Durchführung der Prognose haben sich durch die Integration des relevanten Prognosemodells ins Planungsmodell Besonderheiten ergeben. Es stellte sich die

Frage, wie unrealistische Prognosewerte und nicht-stationäre Zeitreihen berücksichtigt werden können. Durch Verletzungen der Prognoseannahmen kann es zu *unrealistischen Prognosewerten* kommen. Zusätzliche Nebenbedingungen wurden im Planungsmodell eingefügt, um derartige Fälle der Planung auszuschließen. Die notwendige Bedingung der *Stationarität* der bei der Prognose betrachteten Zeitreihen wurde durch die Integration der Entscheidungsvariablen und Parameter des Planungsmodells sichergestellt. Die Kopplung zum Prognosemodell wird durch Mengenbilanzen gewährleistet.

(5) Um die Auswirkungen der Integration von Prognoseverfahren und des Einsatzes von flexiblen Ressourcen auf den Rechenaufwand, das monetäre Ziel und auf die Robustheit zu analysieren, wurde der entwickelte Planungsansatz in unterschiedlichen Planungssituationen für einen rollierenden Planungshorizont numerisch analysiert. Durch die simultane Betrachtung der Produkterstellungs- und Rückflussbewältigungsprozesse besteht erstmals die Möglichkeit, das Zusammenwirken von quantitativer und qualitativer Kapazität bei der Generierung von Robustheit zu analysieren. Um das Ausmaß unterschiedlicher Kosten- und Flexibilitätskonstellationen auf die Indikatoren zu bewerten, wurde die Nachfrage- und die Güterrückflussmengen für ein Neuprodukt in einem generischen Planungsproblem einer CLSC für die gegensätzlichsten Planungssituationen (Situation I: vollständige Nachfrageerfüllung und Rücknahmebedingung; IV: keine vollständige Nachfrageerfüllung und Rücknahmebedingung) simuliert. In der Gesamtsicht wurde aufgezeigt, dass sich ein Planungsmodell ergeben hat, mit dem Kapazitätsausstattungsentscheidungen unter Unsicherheit in einem rollierenden Planungsansatz unterstützt werden können.

Hinsichtlich der Anwendbarkeit wurde gezeigt, dass der Planungsansatz in Planungssituation IV zu höheren Berechnungszeiten aufgrund der erhöhten Anzahl an Handlungsalternativen führt und dass Unsicherheit (z.B. Strukturbrüche der Zeitreihen) zu einer Nicht-Anwendbarkeit des Prognoseansatzes führen kann (3% der Fälle). Unter Unsicherheit können sich Investitionen in flexible Ressourcen positiv auf den Kapitalwert auswirken. Dies ist jedoch von der Art und dem Ausmaß der Unsicherheit abhängig. Die Ergebnisrobustheit ist in allen betrachteten Szenarien sehr hoch, so dass geringe Schwankungen der Nachfrage und des Güterrückflusses das Planungs-

kalkül nicht wesentlich beeinflussen. Die Prognosequalität wirkt sich auf den generierten Kapitalwert aus. Mit zunehmender Unzuverlässigkeit der Prognose wird der Kapitalwert reduziert. Dabei ist in Planungssituation I eine Kapazitätsbedarfsunterschätzung und in Planungssituation IV eine Überschätzung weniger nachteilig für die Auswirkungen auf den Kapitalwert. Auch hinsichtlich der Planungsrobustheit führt eine schlechte Prognose zu einer Reduzierung der Planungsrobustheit. Eine Überschätzung in Planungssituation I und eine Unterschätzung der Nachfrage- und Rückflussmengen in Planungssituation IV führen zu einer höheren Planungsrobustheit.

(6) Bezüglich des Einflusses der Höhe der Expansions- und Kontraktionsauszahlungen für flexible Ressourcen konnte konstatiert werden, dass im Falle gleich hoher Auszahlungen für starre und flexible Ressourcen die Flexiblen aufgrund ihrer Eignung zur Absorption von Unsicherheiten tendenziell eine höhere Planungsrobustheit induzieren. Eine Erhöhung der Anpassungsauszahlungen kann häufigere/stärkere Kapazitätsanpassungen bedingen; die Wirkungen auf die Planungsrobustheit sind von der Art und dem Ausmaß der Unsicherheit abhängig.

Folgender weiterer Forschungsbedarf lässt sich aus der durchgeführten Analyse ableiten:

Im vorgestellten Planungsansatz wurde die Kapazität zur Bewältigung der Güterströme aufgrund der ökonomischen Nachhaltigkeit zum Ende des Planungszeitraumes abgebaut. Dabei wurde die Annahme eines finiten Planungshorizontes zugrunde gelegt. Die Auswirkungen der zeitlichen Überlappungen von Lebens- und Rückflusszyklen der Vorgänger- und Folgeprodukte sind im vorliegenden Planungsansatz der Kapazitätsdimensionierung bislang unberücksichtigt. Abhängig vom Ähnlichkeitsgrad der Vorgänger- und Folgeprodukte ergeben sich für die Interdependenzen zwischen originären Produkten und den Güterrückflüssen (Markt-, Ressourcen- und Leistungsinterdependenzen) neue Herausforderungen, denen Rechnung getragen werden muss: (1) Die integrative Betrachtung der Kapazitätsplanungsprobleme für Vorgänger- und Folgeprodukte kann das Erfordernis der Betrachtung eines *infiniten Planungshorizontes* induzieren. (2) Durch die Überlappung der Lebens- und Rückflusszyklen der Vorgänger- und Nachfolgeprodukte ergibt sich ein erweitertes Kapa-

zitätsdimensionierungsproblem, in dem die *Unsicherheit bzgl. des Einführungszeitpunktes des Neuproduktes* Berücksichtigung finden muss. (3) Zudem stellt sich die Frage, welche *Auswirkungen* die neuen Interdependenzen *auf das Prognoseproblem* haben und wie diese berücksichtigt werden können.

Weiterer Forschungsbedarf lässt sich bei der Ermittlung eines geeigneten Modells zur Prognose der Nachfrage- und Rückflussmengen ableiten. Im Rahmen der Kapazitätsdimensionierung hat die Berücksichtigung von Informationszuwächsen bzgl. des Neuproduktes bei der Ermittlung des Prognosemodells eine hohe Relevanz. Bei der *Bayes-Schätzung* wird von der Annahme ausgegangen, dass die Schätzung eines Vektor-autoregressiven Modells verbessert werden kann, wenn bereits vorhandene Informationen über die Parameter in die Schätzung einfließen¹⁾. Dabei werden alle zu schätzenden Parameter des multivariaten Modells als Zufallsvariablen angesehen und in einem Vektor zusammengefasst. Ziel ist es, eine a posteriori Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Parameter auf Grundlage einer a priori Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, die das Vorwissen widerspiegelt, zu bestimmen.

¹⁾ Vgl. Hamilton (1994), S. 360 ff.

Literatur

- Akaike, H.: A new look at the statistical model identification, in: IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 19 (1974), S. 716-723
- Akçali, E.; Çetinkaya, S.: Quantitative models for inventory and production planning in closed-loop supply chains, in: International Journal of Production Research, Vol. 49 (2011), S. 2373-2407
- Aksoy, H.K.; Gupta, S.M.: Capacity and buffer trade-offs in a remanufacturing system, in: Proceedings of SPIE International Conference on Environmentally Conscious Manufacturing II, Newton, 28.-29.10.2001, hrsg. v. S.M. Gupta, Bellingham 2002, S. 167-174
- Ambrosi, K.: Klassifikation und Identifikation, in: Numerische Taxonomie in der Marktforschung, hrsg. v. O. Opitz, München 1978, S. 79-109
- Amin, S.H.; Zhang, G.: A proposed mathematical model for closed-loop network configuration based on product life cycle, in: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 58 (2012), S. 791-801
- Assenmacher, W.: Einführung in die Ökonometrie, 6. Aufl., München/Wien 2002
- Auer, L.v.: Ökonometrie. Eine Einführung, 4. Aufl., Berlin/Heidelberg/New York 2007
- Bai, C.; Sarkis, J.: Flexibility in reverse logistics: A framework and evaluation approach, in: Journal of Cleaner Production, Vol. 47 (2013), S. 306-318
- Baker, K.R.: An experimental study of the effectiveness of rolling schedules in production planning, in: Decision Sciences, Vol. 8 (1977), S. 19-27
- Benedito, E.; Corominas, A.: Assessing the impact on optimal production capacities in a closed-loop logistic system of the assumption that returns are stochastically independent of sales, in: Journal of Industrial Engineering and Management, Vol. 4 (2011), S. 504-522
- Bengtsson, J.; Olhager, J.: Valuation of product-mix flexibility using real options, in: International Journal of Production Economics, Vol. 78 (2002), S. 13-28
- Beyer, H.-G.; Sendhoff, B.: Robust optimization, in: Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 196 (2007), S. 3190-3218
- Bhattacharjee, S.; Cruz, J.: Economic sustainability of closed loop supply chains: A holistic model for decision and policy analysis, in: Decision Support Systems, Vol. 77 (2015), S. 67-86

- Birge, J.R.; Louveaux, F.: Introduction to stochastic programming, 2. Aufl., New York et al. 2011
- Bish, E.K.; Wang, Q.: Optimal investment strategies for flexible resources, considering pricing and correlated demands, in: Operations Research, Vol. 52 (2004), S. 954-964
- Bloemhof-Ruwaard, J.M.; Fleischmann, M.; van Nunen, J.A.E.E.: Reviewing distribution issues in reverse logistics, in: New Trends in Distribution Logistics, hrsg. v. M.G. Speranza und P. Stähly, Berlin/Heidelberg/New York 1999, S. 23-44
- Blossfeld, H.-P.; Rohwer, G.: Techniques of event history modeling. New approaches to causal analysis, 2. Aufl., Mahwah/London 2002
- Box, G.E.P.; Jenkins, G.; Reinsel, G.C.: Time series analysis, 4. Aufl., New Jersey 2008
- Boyabatli, O.; Toktay, L.B.: Stochastic capacity investment and flexible vs. dedicated technology choice in imperfect capital markets, in: Management Science, Vol. 57 (2011), S. 2163-2179
- Brockhoff, K.: Unternehmenswachstum und Sortimentsänderungen, Köln/Opladen 1966
- Bulmus, S.C.; Zhu, S.X.; Teunter, R.: Capacity and production decisions under a remanufacturing strategy, in: International Journal of Production Economics, Vol. 145 (2013), S. 359-370
- Canda, A.; Yuan, X.-M.; Wang, F.-Y.: Modeling and forecasting product returns: An industry case study, in: Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Singapore, 06.-09.12.2015, hrsg. v. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Piscataway 2015, S. 871-875
- Cao, H.; Folan, P.: Product life cycle: The evolution of a paradigm and literature review from 1950-2009, in: Production Planning & Control, Vol. 23 (2012), S. 641-662
- Cardoso, S.R.; Barbosa-Póvoa, A.P.F.D.; Relvas, S.: Design and planning of supply chains with integration of reverse logistics activities under demand uncertainty, in: European Journal of Operational Research, Vol. 226 (2013), S. 436-451
- Carrasco-Gallego, R.; Ponce-Cueto, E.: Forecasting the returns in reusable containers' closed-loop supply chains. A case in the LPG industry, in: 3rd International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management, Barcelona, 02.-04.09.2009, hrsg. v. R. Companys Pascual et al., Barcelona 2009, S. 311-320

- Chand, S.; Hsu, V.N.; Sethi, S.: Forecast, solution, and rolling horizons in operations management problems: A classified bibliography, in: *Manufacturing and Service Operations Management*, Vol. 4 (2002), S. 25-43
- Chan, F.T.S. et al.: Management of sustainable manufacturing systems - A review on mathematical problems, in: *International Journal of Production Research*, Vol 55 (2017), S. 1210-1225
- Charnes, A.; Cooper, W.W.: Chance-constrained programming, in: *Management Science*, Vol. 6 (1959), S. 73-79
- Chen, Z.-L.; Li, S.; Tirupati, D.: A scenario-based stochastic programming approach for technology and capacity planning, in: *Computers & Operations Research*, Vol. 29 (2002), S. 781-806
- Chittamvanich, S.; Ryan, S.M.: Using forecasted information from early returns of used products to set remanufacturing capacity, Working Paper, Department of Industrial & Manufacturing Systems Engineering, Iowa State University, Ames o.J. (verfügbar: <http://www.public.iastate.edu/~smryan/earlyreturn.pdf>, 30.06.2011)
- Chod, J.; Zhou, J.: Resource flexibility and capital structure, in: *Management Science*, Vol. 60 (2014), S. 708-729
- Chouinard, M.; D'Amours, S.; Ait-Kadi, D.: A stochastic programming approach for designing supply loops, in: *International Journal of Production Economics*, Vol. 113 (2008), S. 657-677
- Chun, B.J.; Robinson, S.M.: Scenario analysis via bundle decomposition, in: *Annals of Operations Research*, Vol. 56 (1995), S. 39-63
- Clotey, T.: Development and evaluation of a rolling horizon purchasing policy for cores, in: *International Journal of Production Research*, Vol. 54 (2016), S. 2780-2790
- Clotey, T.; Benton, W.C.: Determining core acquisition quantities when products have long return lags, in: *IIE Transactions*, Vol. 46 (2014), S. 880-893
- Clotey, T.; Benton, W.C.; Srivastava, R.: Forecasting product returns for remanufacturing operations, in: *Decision Sciences*, Vol. 43 (2012), S. 589-614
- Clotey, T.; Srivastava, R.: Forecasting product returns for production planning and control in remanufacturing, in: *Proceedings of the 39th Annual Meeting of the Decision Science Institute, "Improving Competitiveness through Information and Decision Sciences"*, Baltimore, 22.-25.11.2008, hrsg. v. Decision Science Institute, Atlanta 2008, S. 1691-1696 (verfügbar: <http://www.decisionsciences.org/Proceedings/DSI2008/docs/169-2178.pdf>, 05.04.2011)

- Corsten, H.; Gössinger, R.: Produktionswirtschaft. Einführung in das industrielle Produktionsmanagement, 14. Aufl., München 2016
- Cox, D.R.: Regression models and life-tables, in: Journal of the Royal Statistical Society Series B, Vol. 34 (1972), S. 187-220
- Cox, D.R.; Oakes, D.: Analysis of survival data, London/New York 1984
- Das, D.; Dutta, P.: Design and analysis of a closed-loop supply chain in presence of promotional offer, in: International Journal of Production Research, Vol. 53 (2015), S. 141-165
- Das, S.; Yedlarajiah, D.: An integer programming model for prescribing material recovery strategies, in: Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics & the Environment, San Francisco, 06.-09.05.2002, hrsg. v. H.S. Matthews, Piscataway 2002, S. 118-122
- de Brito, M.P.; Dekker, R.: A framework for reverse logistics, in: Reverse Logistics - Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chains, hrsg. v. R. Dekker et al., Berlin/Heidelberg/New York 2004, S. 3-27
- de Brito, M.P.; Dekker, R.; Flapper, S.D.P.: Reverse Logistics: A review of case studies, in: Distribution Logistics, hrsg. v. B. Fleischmann und A. Klose, Berlin/Heidelberg/New York 2005, S. 243-281
- de Brito, M.P.; de Koster, M.B.M.: Product returns: Handling and warehousing issues, in: Reverse Logistics. Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chains, hrsg. v. R. Dekker et al., Berlin/Heidelberg/New York 2004, S. 135-153
- de Brito, M.P.; van der Laan, E.A.: Inventory control with product returns: The impact of imperfect information, in: European Journal of Operational Research, Vol. 194 (2009), S. 85-101
- de Kluyver, C.A.: Innovation and industrial product life cycles, in: California Management Review, Vol. 20 (1977), H. 1, S. 21-33
- de Rosa, V. et al.: Robust sustainable bi-directional logistics network design under uncertainty, in: International Journal of Production Economics, Vol. 145 (2013), S. 184-198
- Dhrymes, P.: Distributed lags. Problems of estimation and formulation, 2. Aufl., Amsterdam et al. 1985
- Di Domenica, N. et al.: Stochastic programming and scenario generation within a simulation framework: An information systems perspective, in: Decision Support Systems, Vol. 42 (2007), S. 2197-2218

- Dobos, I.; Richter, K.: An extended production/recycling model with stationary demand and return rates, in: *International Journal of Production Economics*, Vol. 90 (2004), S. 311-323
- Dupacova, J.; Gröwe-Kuska, N.; Römisch, W.: Scenario reduction in stochastic programming, in: *Mathematical Programming - Series B*, Vol. 95 (2003), S. 493-511
- Dyckhoff, H.: *Produktionstheorie*, 5. Aufl., Berlin/Heidelberg/New York 2006
- Dyckhoff, H.; Kasah, T.: Time horizon and dominance in dynamic life cycle assessment, in: *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 18 (2014), S. 799-808
- Dyckhoff, H.; Souren, R.; Keilen, J.: The expansion of supply chains to closed loop systems: A conceptual framework and the automotive industry's point of view, in: *Supply Chain Management and Reverse Logistics*, hrsg. v. H. Dyckhoff, R. Lachkes und J. Reese, Berlin et al. 2004, S. 13-34
- Easwaran, G.; Üster, H.: A closed-loop supply chain network design problem with integrated forward and reverse channel decisions, in: *IIE Transactions*, Vol. 42 (2010), S. 779-792
- Eckey, H.-F.; Kosfeld, R.; Dreger, C.: *Ökonometrie*, 2. Aufl., Wiesbaden 2001
- El-Sayed, M.; Afia, N.; El-Kharbotly, A.: A stochastic model for forward-reverse logistics network design under risk, in: *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 58 (2010), S. 423-431
- Engle, R.F.; Granger, C.W.J.: Co-integration and error correction: Representation, estimation, and testing, in: *Econometrica*, Vol. 55 (1987), S. 251-276
- Faccio, M. et al.: Multi-stage supply network design in case of reverse flows: A closed-loop approach, in: *International Journal of Operational Research*, Vol. 12 (2011), S. 157-191
- Fine, C.H.; Freund, R.M.: Optimal investment in product-flexible manufacturing capacity, in: *Management Science*, Vol. 36 (1990), S. 449-466
- Fischer, M.: *Produktlebenszyklus und Wettbewerbsdynamik*, Wiesbaden 2001
- Fleischmann, M.: *Quantitative models for reverse logistics*, Diss. Rotterdam 2000
- Fleischmann, M. et al.: Quantitative models for reverse logistics: A review, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 103 (1997), S. 1-17
- Fleischmann, M. et al.: A characterisation of logistics networks for product recovery, in: *Omega*, Vol. 28 (2000), S. 653-666

- Fleischmann, M.; Kuik, R.: On optimal inventory control with independent stochastic item returns, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 151 (2003), S. 25-37
- Franke, C. et al.: Remanufacturing of mobile phones - capacity, program and facility adaptation planning, in: *Omega*, Vol. 34 (2006), S. 562-570
- Frese, E.; Graumann, M.; Theuvsen, L.: *Grundlagen der Organisation*, 10. Aufl., Wiesbaden 2012
- Georgiadis, P.: An integrated system dynamics model for strategic capacity planning in closed-loop recycling networks: A dynamic analysis for the paper industry, in: *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 32 (2013), S. 116-137
- Georgiadis, P.; Athanasiou, E.: The impact of two-product joint lifecycles on capacity planning of remanufacturing networks, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 202 (2010), S. 420-433
- Georgiadis, P.; Athanasiou, E.: Flexible long-term capacity planning in closed-loop supply chains with remanufacturing, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 225 (2013), S. 44-58
- Georgiadis, P.; Vlachos, D.; Tagaras, G.: The impact of product lifecycle on capacity planning of closed-loop supply chains with remanufacturing, in: *Production and Operations Management*, Vol. 15 (2006), S. 514-527
- Geyer, R.; van Wassenhove, L.N.: The impact of constraints in closed-loop supply chains: The case of reusing components in product manufacturing, in: *Distribution Logistics*, hrsg. v. B. Fleischmann und A. Klose, Berlin/Heidelberg/New York 2005, S. 203-219
- Gössinger, R.; Panitz, S.: Produktlebens- und -rückflusszyklen als Ausgangspunkt der Kapazitätsplanung in Closed-Loop Supply Chains, in: *Nachhaltiges Entscheiden. Beiträge zum multiperspektivischen Performancemanagement von Wertschöpfungsprozessen*, hrsg. v. H. Ahn, M. Clermont und R. Souren, Wiesbaden 2016, S. 599-623
- Goggin, K.; Reay, E.; Browne, J.: Modelling end-of-life product recovery chains - A case study, in: *Production Planning & Control*, Vol. 11 (2000), S. 187-196
- Goh, T.N.; Varaprasad, N.: A statistical methodology for the analysis of the life-cycle of reusable containers, in: *IIE Transactions*, Vol. 18 (1986), S. 42-47
- Govindan, K.; Soleimani, H.; Kannan, D.: Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 240 (2015), S. 603-626

- Granger, C.W.J.: Some properties of times series data and their use in econometric model specification, in: *Journal of Econometrics*, Vol. 16 (1981), S. 121-130
- Grubbström, R.W.; Olhager, J.: Productivity and flexibility: Fundamental relations between two major properties and performance measures of the production system, in: *International Journal of Production Economics*, Vol. 52 (1997), S. 73-82
- Guide, V.D.R.: Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs, in: *Journal of Operations Management*, Vol. 18 (2000), S. 467-483
- Guide, D.R. et al.: Supply chain management for recoverable manufacturing systems, in: *Interfaces*, Vol. 30 (2000), S. 125-142
- Guide, D.R.; Harrison, T.P.; van Wassenhove, L.N.: The challenge of closed-loop supply chains, in: *Interfaces*, Vol. 33 (2003), S. 3-6
- Guide, D.R.; Spencer, M.S.: Rough-cut capacity planning for remanufacturing firms, in: *Production Planning & Control*, Vol. 3 (1997), S. 237-244
- Guide, D.R.; Srivastava, R.; Spencer, M.: An evaluation of capacity planning techniques in remanufacturing environment, in: *International Journal of Production Research*, Vol. 35 (1997), S. 67-82
- Guide, V.D.R.; van Wassenhove, L.N.: Managing product returns for remanufacturing, in: *Production and Operations Management*, Vol. 10 (2001), S. 142-155
- Guide, D.R.; van Wassenhove, L.N.: Closed-loop supply chains, in: *Quantitative Approaches to Distribution Logistics and Supply Chain Management*, hrsg. v. A. Klose, M.G. Speranza und L.N. van Wassenhove, Berlin/Heidelberg 2002, S. 47-60
- Guide, D.R.; van Wassenhove, L.N.: The evolution of closed-loop supply chain research, in: *Operations Research*, Vol. 57 (2009), S. 10-18
- Gungor, A.; Gupta, S.M.: Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: A survey, in: *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 36 (1999), S. 811-853
- Hackl, P.: *Einführung in die Ökonometrie*, 2. Aufl., München 2013
- Hamilton, J.D.: *Time series analysis*, New Jersey 1994
- Hanafi, J.; Kara, S.; Kaebnik, H.: Generating fuzzy coloured petri net forecasting model to predict the return of products, in: *Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, Orlando, 07.-10.05.2007, hrsg. v. Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York 2007, S. 245-250

- Handfield, R. et al.: Applying environmental criteria to supplier assessment: A study in the application of the analytical hierarchy process, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 141 (2002), S. 70-87
- Hansmann, K.-W.: *Kurzlehrbuch Prognoseverfahren*, Wiesbaden 1983
- Hasani, A.; Zegordi, S.H.; Nikbakhsh, E.: Robust closed-loop supply chain network design for perishable goods in agile manufacturing under uncertainty, in: *International Journal of Production Research*, Vol. 50 (2012), S. 4649-4669
- Hatefi, S.M. et al.: Reliable Design of an integrated forward-reverse logistics network under uncertainty and facility disruptions: A fuzzy possibilistic programming model, in: *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 19 (2015), S. 1117–1128
- Heisig, G.; Fleischmann, M.: Planning stability in a product recovery system, in: *OR Spektrum*, Vol. 23 (2001), S. 25-30
- Hellström, D.; Johansson, O.: The impact of control strategies on the management of returnable transport items, in: *Transportation Research Part E*, Vol. 46 (2010), S. 1128-1139
- Helsen, K.; Schmittlein, D.C.: Analyzing duration times in marketing: Evidence for the effectiveness of hazard rate models, in: *Marketing Science*, Vol. 12 (1993), S. 395-414
- Herroelen, W.; Leus, R.: Robust and reactive project scheduling: a review and classification of procedures, in: *International Journal of Production Research*, Vol. 42 (2004), S. 1599-1620
- Hess, J.; Mayhew, G.: Modeling merchandise returns in direct marketing, in: *Journal of Direct Marketing*, Vol. 11 (1997), S. 20-35
- Huang, X.-Y.; Yan, N.-N.; Qiu, R.-Z.: Dynamic models of closed-loop supply chain and robust H_∞ control strategies, in: *International Journal of Production Research*, Vol. 47 (2009), S. 2279-2300
- Ilgın, M.A.; Gupta, S.M.: Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art, in: *Journal of Environmental Management*, Vol. 91 (2010), S. 563-591
- Ilgın, M.A.; Gupta, S.M.: *Remanufacturing modeling and analysis*, Boca Raton 2012
- Inderfurth, K. et al.: Production planning for product recovery management, in: *Reverse Logistics. Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chains*, hrsg. v. R. Dekker et al., Berlin/Heidelberg/New York 2004, S. 249-274

- Inderfurth, K.: Impact of uncertainties on recovery behavior in a remanufacturing environment - A numerical analysis, in: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 35 (2005), S. 318-336
- Inderfurth, K.; Jensen, T.: Planungsnervosität im Rahmen der Produktionsplanung, in: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, 67. Jg. (1997), 817-834
- Jayaraman, V.: Production planning for closed-loop supply chains with product recovery and reuse: An analytical approach, in: *International Journal of Production Research*, Vol. 44 (2005), S. 981-998
- Jeong, B.; Jung, H.S.; Park, N.K.: A computerized causal forecasting system using genetic algorithms in supply chain management, in: *Journal of Systems and Software*, Vol. 60 (2002), S. 223-237
- Johansen, S.: Statistical analysis of cointegration vectors, in: *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol. 12 (1988), S. 231-254
- Johansen, S.: Estimation and hypothesis testing of cointegrating vectors in gaussian vector autoregressive models, in: *Econometrica*, Vol. 59 (1991), S. 1551-1580
- Julka, N. et al.: A review of multi-factor capacity expansion models for manufacturing plants: Searching for a holistic decision aid, in: *International Journal of Production Economics*, Vol. 106 (2007), S. 607-621
- Jung, K.S. et al.: Supply planning models for a remanufacturer under just-in-time manufacturing environment with reverse logistics, in: *Annals of Operations Research*, Vol. 240 (2016), S. 533-581
- Kalbfleisch, J.D.; Prentice, R.L.: *The statistical analysis of failure time data*, New York et al. 1980
- Kall, P.; Wallace, S.W.: *Stochastic programming*, Chichester et al. 1994
- Kaya, O.; Bagci, F.; Turkay, M.: Planning of capacity, production and inventory decisions in a generic reverse supply chain under uncertain demand and returns, in: *International Journal of Production Research*, Vol. 52 (2014), S. 270-282
- Kelle, P.; Silver, E.: Forecasting the returns of reusable containers, in: *Journal of Operations Management*, Vol. 8 (1989), S. 17-35
- Kiesmüller, G.P.; van der Laan, E.A.: An inventory model with dependent product demands and returns, in: *International Journal of Production Economics*, Vol. 72 (2001), S. 73-87
- Kim, K. et al.: Supply planning model for remanufacturing system in reverse logistics system, in: *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 51 (2006), S. 279-287

- Kimms, A.: Stability measures for rolling schedules with applications to capacity expansion planning, master productions, and lot sizing, in: *Omega*, Vol. 26 (1998), S. 355-366
- Klein, R.; Scholl, A.: *Planung und Entscheidung*, 2. Aufl., München 2011
- Kouvelis, P.; Kurawarwala, A.A.; Gutiérrez, G.J.: Algorithms for robust single and multiple period layout planning for manufacturing, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 63 (1992), S. 287-303
- Kouvelis, P.; Tian, Z.: Flexible capacity investments and product mix: Optimal decisions and value of postponement options, in: *Production and Operations Management*, Vol. 23 (2014), S. 861-876
- Kouvelis, P.; Yu, G.: *Robust discrete Optimization and its application*, Dordrecht/Boston/London 1997
- Koyck, L.M.: *Distributed lags and investment analysis*, Amsterdam 1954
- Krapp, M.; Nebel, J.; Sahamie, R.: Forecasting product returns in closed-loop supply chains, in: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 43 (2013a), S. 614-637
- Krapp, M.; Nebel, J.; Sahamie, R.: Using forecasts and managerial accounting information to enhance closed-loop supply chain management, in: *OR Spectrum*, Vol. 33 (2013b), S. 975-1007
- Kricke, H.R.; van Harten, A.; Schuur, P.C.: On a medium term product recovery and disposal strategy for durable assembly products, in: *International Journal of Production Research*, Vol. 36 (1998), S. 111-139
- Krikke, H.; Hofenk, D.; Wang, Y.: Revealing an invisible giant: A comprehensive survey into return practices within original (closed-loop) supply chains, in: *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 73 (2013), S. 239-250
- Krupp, J.A.: Structuring bills of material for automotive remanufacturing, in: *Production and Inventory Management Journal*, Vol. 34 (1993), H. 4, S. 46-52
- Kumar, A.; Chinnam, R.B.; Murat, A.: Hazard rate models for core return modeling in auto parts, in: *International Journal of Production Economics*, Vol. 183 (2017), S. 354-361
- Lebreton, B.: *Strategic closed-loop supply chain management*, Berlin/Heidelberg/New York 2007

- Lee, C.-W.; Doh, H.-H.; Lee, D.-H.: Capacity and production planning for a hybrid system with manufacturing and remanufacturing facilities, in: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B. Management and engineering manufacture, Vol. 229 (2015), S. 1645-1653
- Lee, D.-H.; Dong, M.: Dynamic network design for reverse logistics operations under uncertainty, in: Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. 45 (2009), S. 61-71
- Lee, D.-H. et al.: Design of product recovery networks under uncertainty, in: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2008 (2007), S. 19-25
- Li, Y. et al.: Optimal solution structure for multi-period production planning with returned products remanufacturing, in: Asia-Pacific Journal of Operational Research, Vol. 27 (2010), S. 629-648
- Lieckens, K.; Colen, P.; Lambrecht, M.: Optimization of a stochastic remanufacturing network with an exchange option, in: Decision Support Systems, Vol. 54 (2013), S. 1548-1557
- Lieckens, K.; Vandaele, N.: Reverse logistics network design with stochastic lead times, in: Computers & Operations Research, Vol. 34 (2007), S. 395-416
- Lieckens, K.; Vandaele, N.: Multi-level reverse logistics network design under uncertainty, in: International Journal of Production Research, Vol. 50 (2012), S. 23-40
- Linton, J.D.; Yeomans, J.S.: The role of forecasting in sustainability, in: Technological Forecasting and Social Change, Vol. 70 (2002), S. 21-38
- Linton, J.D.; Yeomans, J.S.; Yoogalingam, R.: Supply planning for industrial ecology and remanufacturing under uncertainty: A numerical study of leaded-waste recovery from television disposal, in: Journal of the Operational Research Society, Vol. 53 (2002), S. 1185-1196
- Linton, J.D.; Yeomans, J.S.; Yoogalingam, R.: Recovery and reclamation of durable goods: A study of television CRTs, in: Resources, Conservation and Recycling, Vol. 43 (2005), S. 337-352
- Listes, O.L.: A generic stochastic model for supply-and-return network design, in: Computers & Operations Research, Vol. 34 (2007), S. 417-442
- Listes, O.L.; Dekker, R.: A stochastic approach to a case study for product recovery network design, in: European Journal of Operational Research, Vol. 160 (2005), S. 268-287

- Lovelock, C.H.; Wirtz, J.: Services marketing, 7. Aufl., Boston 2011
- Luss, H.: Operations research and capacity expansion problems: A survey, in: Operations Research, Vol. 30 (1982), S. 907-947
- Lütkepohl, H.: New introduction to multiple time series analysis, Berlin et al. 2005
- Mahapatra, S.; Pal, R.; Narasimhan, R.: Hybrid (re)manufacturing and operational implications, in: International Journal of Production Research, Vol. 50 (2012), S. 3786-3808
- Makridakis, S.; Wheelwright, S.C.; Hyndman, R.J.: Forecasting. Methods and applications, 3. Aufl., New York et al. 1998
- Malcolm, S.A.; Zenios, S.A.: Robust optimization for power systems capacity expansion under uncertainty, in: Journal of the Operational Research Society, Vol. 45 (1994), S. 1040-1049
- Mandelbaum, M.; Buzacott, J.: Flexibility and decision making, in: European Journal of Operational Research, Vol. 44 (1990), S. 17-27
- Martínez-Costa, C. et al.: A review of mathematical programming models for strategic capacity planning in manufacturing, in: International Journal of Production Economics, Vol. 153 (2014), S. 66-58
- Martino, J.P.; Chen, K.-L.: Cluster analysis of cross impact model scenarios, in: Technological Forecasting and Social Change, Vol. 12 (1978), S. 61-71
- Marx-Gómez, J. et al.: Neuro-fuzzy approach to forecast returns of scrapped products to recycling and remanufacturing, in: Knowledge-Based Systems, Vol. 15 (2002), S. 119-128
- Melo, M.T.; Nickel, S.; Saldanha-da-Gama, F.: Facility location and supply chain management - A review, in: European Journal of Operational Research, Vol. 196 (2009), S. 401-412
- Mertens, P.: Mittel- und langfristige Absatzprognose auf der Basis von Sättigungsmodellen, in: Prognoserechnung, hrsg. v. P. Mertens und S. Rässler, Heidelberg et al. 2012, S. 183-224
- Mikus, B.: Risiken und Risikomanagement - ein Überblick, in: Risikomanagement, hrsg. v. U. Götze, K. Henselmann und B. Mikus, Heidelberg 2001, S. 3-28
- Minner, S.: Strategic safety stocks in reverse logistics supply chains, in: International Journal of Production Economics, Vol. 71 (2001), S. 417-428
- Mißler-Behr, M.: Methoden der Szenarioanalyse, Wiesbaden 1993

- Montgomery, D.C.; Weatherby, G.: Modeling and forecasting time series using transfer function and intervention methods, in: AIIE Transactions, Vol. 12 (1980), S. 289-307
- Mostard, J.; de Koster, R.; Teunter, R.H.: The distribution-free newsboy problem with resalable returns, in: International Journal of Production Economics, Vol. 97 (2005), S. 329-342
- Mukhopadhyay, S.; Ma, H.: Joint procurement and production decisions in remanufacturing under quality and demand uncertainty, in: International Journal of Production Economics, Vol. 120 (2009), S. 5-17
- Mulvey, J.M.; Vanderbei, R.J.; Zenios, S.A.: Robust optimization of large-scale systems, in: Operations Research, Vol. 49 (1995), S. 264-281
- Nahmias, S.: Production and operations analysis, 6. Aufl., Boston et al. 2000
- Opitz, O.: Numerische Taxonomie, Stuttgart/New York 1980
- Pankratz, A.: Forecasting with dynamic regression models, New York et al. 1991
- Patton, A.: Stretch Your Product's Earning Years: Top Management's Stake in the Product Life Cycle, in: Management Review, Vol. 48 (1959), S. 9-14 und 67-79
- Pfohl, H.-C.; Gallus, P.; Köhler, H.: Konzeption des Supply Chain Risikomanagements, in: Sicherheit und Risikomanagement in der Supply Chain, hrsg. v. H.-C. Pfohl, Hamburg 2008, S. 7-94
- Pindyck, R.S.; Rubinfeld, D.L.: Econometric models and economic forecasts, 4. Aufl., Boston et al. 1998
- Pishvaei, S.; Rabbani, M.; Torabi, S.A.: A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty, in: Applied Mathematical Modelling, Vol. 35 (2011), S. 637-649
- Potdar, A.; Rogers, J.: Methodology to forecast product returns for the consumer electronics industry, in: Proceedings of PICMET '10 "Technology Management for Global Economic Growth", Phuket, 18.-22.07.2010, hrsg. v. Portland International Center for Management of Engineering and Technology, Portland 2010, S. 290-230
- Potdar, A.; Rogers, J.: Reason-code based model to forecast product returns, in: Foresight, Vol. 14 (2012), S. 105-120
- Püchert, H.; Spengler, T.; Rentz, O.: Strategische Planung von Kreislaufwirtschafts- und Redistributionssystemen - am Fallbeispiel des Altaggregatsrecyclings, in: Zeitschrift für Planung, 7. Jg. (1996), S. 27-44

- Pujawan, I.N.; Smart, A.U.: Factors affecting schedule instability in manufacturing companies, in: *International Journal of Production Research*, Vol. 50 (2012), S. 2252-2266
- Ramezani et al.: Closed-loop supply chain network design under a fuzzy environment, in: *Knowledge-Based Systems*, Vol. 59 (2014), S. 108-120
- Rinne, H.; Specht, K.: *Zeitreihen*, München 2002
- Rockafellar, R.T.; Wets, R.J.-B.: Scenarios and policy aggregation in optimization under uncertainty, in: *Mathematics of Operations Research*, Vol. 16 (1991), S. 119-147
- Rogers, D.S.; Tibben-Lembke, R.S.: *Going backwards: Reverse logistics trends and practices*, Reno 1999
- Rogler, S.: *Risikomanagement im Industriebetrieb*, Wiesbaden 2002
- Ruszczynski, A.; Shapiro, A.: Stochastic programming models, in: *Stochastic Programming*, hrsg. v. A. Ruszczynski und A. Shapiro, Amsterdam 2003, S. 1-63
- Saeedi, S.; Mohammadi, M.; Torabi, S.A.: A De Novo programming approach for a robust closed-loop supply chain network design under uncertainty: An M/M/1 queueing model, in: *International Journal of Industrial Engineering Computations*, Vol. 6 (2015), S. 211-218
- Sahinidis, N.V.: Optimization under uncertainty: State-of-the-art and opportunities, in: *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 28 (2004), S. 971-983
- Salema, M.I.G.; Barbosa-Póvoa, A.P.; Novais, A.Q.: A strategic and tactical model for closed-loop supply chains, in: *OR Spectrum*, Vol. 31 (2009), S. 573-599
- Salema, M.I.G.; Barbosa-Póvoa, A.P.; Novais, A.Q.: Simultaneous design and planning of supply chains with reverse flows: A generic modelling framework, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 203 (2010), S. 336-349
- Sargan, J.D.; Bhargava, A.: Testing residuals from least squares regression for being generated by the Gaussian random walk, in: *Econometrica*, Vol. 51 (1983), S. 153-174
- Schneeweiss, C.; Schneider, H.: Measuring and designing flexibility as a generalized service degree, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 112 (1999), S. 98-106
- Scholl, A.: *Robuste Planung und Optimierung*, Heidelberg 2001
- Schröter, M.: *Strategisches Ersatzteilmanagement in Closed-Loop Supply Chains*, Wiesbaden 2006

- Schwarz, G.: Estimating the dimension of a model, in: *The Annals of Statistics*, Vol. 6 (1978), S. 461-464
- Seliger, G. et al.: Process and facility planning for mobile phone remanufacturing, in: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 53 (2004), H. 1, S. 9-12
- Serrato, M.A.; Ryan, S.M.; Gaytán, J.: A Markov decision model to evaluate outsourcing in reverse logistics, in: *International Journal of Production Research*, Vol. 45 (2007), S. 4289-4315
- Sethi, S.; Sorger, G.: A theory of rolling horizon decision making, in: *Annals of Operations Research*, Vol. 29 (1991), S. 387-416
- Shi, J.; Zhang, G.; Sha, J.: Optimal production planning for a multi-product closed loop system with uncertain demand and return, in: *Computers & Operations Research*, Vol. 38 (2011), S. 641-650
- Shu, T. et al.: Analysing remanufacturing decisions of supply chain members in uncertainty of consumer preferences, in: *Applied Economics*, Vol. 48 (2016), S. 3208-3227
- Slack, N.; Chambers, S.; Johnston, R.: *Operations Management*, 5. Aufl., Harlow et al. 2007
- Soleimani, H.; Govindan, K.: Reverse logistics network design and planning utilizing conditional value at risk, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 237 (2014), S. 487-497
- Solow, R.: On a family of lag distributions, in: *Econometrica*, Vol. 28 (1960), S. 393-406
- Souza, G.C.: Closed-loop supply chains: A critical review, and future research, in: *Decision Sciences*, Vol. 44 (2013), S. 7-38
- Spengler, T.; Ploog, M.; Schröter, M.: Integrated planning of acquisition, disassembly and bulk recycling: A case study on electronic scrap recovery, in: *OR Spectrum*, Vol. 25 (2003), S. 413-442
- Spengler, T.; Schröter, M.: Einsatz von Operations Research im produktbezogenen Umweltschutz - Stand und Perspektiven, in: *Betriebswirtschaftliche Forschung und Praxis*, 3. Jg. (2001), S. 227-244
- Sridharan, S.V.; Berry, W.L.; Udayabhanu, V.: Measuring master production schedule stability under rolling planning horizons, in: *Decision Sciences*, Vol. 19 (1988), S. 147-166

- Srivastava, S.K.; Srivastava, R.K.: Managing product returns for reverse logistics, in: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, Vol. 36 (2006), S. 524-546
- Stadtler, H.: Hierarchische Produktionsplanung bei losweiser Fertigung, Heidelberg 1988
- Steven, M.: Hierarchische Produktionsplanung, 2. Aufl., Heidelberg 1994
- Stier, W.: Methoden der Zeitreihenanalyse, Berlin/Heidelberg 2001
- Stuart, J.A. et al.: Challenges in determining electronics equipment take-back levels, in: IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology - Part C, Vol. 21 (1998), S. 225-232
- Surdato, S.; Takahashi, K.; Morikawa, K.: Efficient flexible long-term capacity planning for optimal sustainability dimensions performance of reverse logistics social responsibility: A system dynamics approach, in: International Journal of Production Economics, Vol. 184 (2017), S. 179-192
- Temur, G.T.; Balcilar, M.; Bolat, B.: A fuzzy expert system design for forecasting return quantity in reverse logistics network, in: Journal of Enterprise Information Management, Vol. 27 (2014), S. 316-328
- Teunter, R.H.: Determining optimal disassembly and recovery strategies, in: Omega, Vol. 34 (2006), S. 533-537
- Thierry, M.: An analysis of the impact of product recovery management on manufacturing companies, Delft 1997
- Thierry, M. et al.: Strategic issues in product recovery management, in: California Management Review, Vol. 37 (1995), H. 2, S. 114-135
- Tibben-Lembke, R.S.: The impact of reverse logistics on the total cost of ownership, in: Journal of Marketing Theory and Practice, Vol. 6 (1998), S. 51-60
- Tibben-Lembke, R.S.: Life after Death: Reverse logistics and the product lifecycle, in: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, Vol. 32 (2002), S. 223-244
- Tibben-Lembke, R.S.; Rogers, D.S.: Differences between forward and reverse logistics in a retail environment, in: Supply Chain Management, Vol. 7 (2002), S. 271-282
- Toffel, M.: Strategic management of product recovery, in: California Management Review, Vol. 46 (2004), H. 2; S. 120-141

- Toktay, B.; van der Laan, E.A.; de Brito, M.P.: Managing product returns: The role of forecasting, in: Reverse Logistics. Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chains, hrsg. v. R. Dekker et al., Berlin/Heidelberg 2004, S. 45-64
- Toktay, L.B.; Wein, L.M.; Zenios, S.A.: Inventory management of remanufacturable products, in: Management Science, Vol. 46 (2000), S. 1412-1426
- Verter, V.; Dincer, M.C.: An integrated evaluation of facility location, capacity acquisition, and technology selection for designing global manufacturing strategies, in: European Journal of Operational Research, Vol. 60 (1992), S. 1-18
- Vahdani, B.; Razmi, J.; Tavakkoli-Moghaddam, R.: Fuzzy possibilistic modeling for closed loop recycling collection networks, in: Environmental Modeling & Assessment, Vol. 17 (2012), S. 623-637
- Van Mieghem, J.A.: Investment strategies for flexible resources, in: Management Science, Vol. 44 (1998), S. 1071-1078
- Van Mieghem, J.A.: Capacity management, investment, and hedging: Review and recent developments, in: Manufacturing & Service Operations Management, Vol. 5 (2003), S. 269-302
- Vlachos, D.; Dekker, R.: Return handling options and order quantities for single period products, in: European Journal of Operational Research, Vol. 151 (2003), S. 38-52
- Vlachos, D.; Georgiadis, P.; Iakovou, E.: A system dynamics model for dynamic capacity planning of remanufacturing in closed-loop supply chains, in: Computers & Operations Research, Vol. 34 (2007), S. 367-394
- Winter, D.H.: Simultane strategische Produktionsplanung beim Vorliegen unvollständiger Information, Berlin 2011
- Wolters, J.: Dynamische Regressionsmodelle, in: Arbeiten mit ökonometrischen Modellen, hrsg. v. W. Gaab, U. Heilemann und J. Wolters, Heidelberg 2004, S. 47-84
- Wu, S.D.; Erkoc, M.; Karabuk, S.: Managing capacity in the high-tech industry: A review of literature, in: The Engineering Economist, Vol. 50 (2005), S. 125-158
- Xanthopoulos, A.; Iakovou, E.: A strategic methodological optimization framework for the design of a reverse logistics network with forward channel synergies, in: International Journal of Logistics Systems and Management, Vol. 7 (2010), S. 165-183
- Yamaguchi, K.: Event history analysis, Newbury Park/London/New Delhi 1991

- Zadeh, L.A.: Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility, in: Fuzzy Sets and Systems (1978), S. 3-28
- Zeballos, L.J. et al.: Addressing the uncertain quality and quantity of returns in closed-loop supply chains, in: Computers & Chemical Engineering, Vol. 47 (2012), S. 237-247
- Zeballos, L.J.; Méndez, C.A.; Barbosa-Povoa, A.P.: Design and planning of closed-loop supply chains: A risk-averse multistage stochastic approach, in: Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 55 (2016), S. 6236-6249
- Zhou, L. et al.: Forecasting return of used products for remanufacturing using Graphical Evaluation and Review Technique (GERT), in: International Journal of Production Economics, Vol. 181 (2016), S. 315-324

Anhang

Zeitreihen des Vorproduktes (gerundet)

Periode	$ME_{2,t}$	$XE_{2,t}$	$XR_{3,t}$	$XR_{4,t}$	$XN_{3,t}$	$XN_{4,t}$
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	25,73	24,26	3,64	3,64	0,00	0,00
3	88,02	81,25	12,19	12,19	1,79	0,00
4	188,97	169,86	25,48	25,48	6,33	0,00
5	348,12	316,04	25,25	9,58	12,91	0,00
6	518,29	452,85	38,08	22,50	23,30	1,69
7	658,42	589,87	51,88	41,83	33,18	6,36
8	862,81	816,48	71,22	65,77	38,87	12,36
9	1021,61	924,23	85,76	90,28	59,08	22,14
10	1068,44	963,86	94,95	119,07	73,72	34,65
11	1201,06	1048,72	102,55	149,10	74,81	38,48
12	1285,03	1155,10	111,58	162,78	79,18	59,02
13	1218,13	1111,43	113,21	172,80	92,01	64,37
14	1245,87	1143,60	115,98	187,54	74,47	69,44
15	1262,35	1122,92	115,19	196,09	72,23	68,22
16	1130,42	1002,39	108,87	193,31	88,44	71,33
17	1081,10	1025,74	106,36	194,90	79,70	86,87
18	1059,56	904,62	96,79	185,52	71,67	89,60
19	917,18	860,79	92,31	172,64	64,15	77,19
20	832,47	783,63	84,49	167,58	57,86	64,18
21	797,22	741,11	79,53	152,03	55,75	65,60
22	676,89	582,04	67,40	142,69	48,32	54,31
23	588,68	515,79	59,08	130,65	39,83	53,31
24	553,36	488,91	52,83	115,95	33,44	54,49
25	465,45	427,27	47,28	95,57	32,02	57,91
26	390,71	337,44	39,91	86,69	32,55	42,91
27	361,01	332,89	36,09	79,25	25,53	35,63
28	302,90	260,70	29,80	67,32	24,38	34,47
29	246,97	226,07	26,02	56,96	17,15	28,81
30	224,23	201,68	22,44	51,92	13,63	25,87
31	188,55	174,96	19,76	42,19	13,09	26,48
32	150,22	138,43	16,44	37,14	12,78	20,76
33	133,85	125,87	14,20	32,66	8,96	16,33
34	113,12	106,23	12,03	27,52	9,32	14,09
35	88,58	78,26	9,63	22,77	7,46	13,71
36	77,34	71,14	8,15	20,08	4,74	8,59
37	65,78	57,22	6,66	16,24	5,20	8,43
38	50,91	43,43	5,35	12,86	3,78	8,34
39	43,49	40,20	4,55	11,20	3,26	5,44
40	37,23	33,51	3,79	8,85	2,71	4,52