

Antizipationsfunktionen für die hierarchische Planung am Beispiel der Koordination von langfristiger Standort- und mittelfristiger Produktionsplanung

Dissertation

Zur Erlangung der Würde des Doktors der
Wirtschafts- und Sozialwissenschaften
des Fachbereichs Betriebswirtschaftslehre
der Universität Hamburg

vorgelegt von

Dipl.-Wirt.-Inf. Florian Kröger
aus Herford

Hamburg, 2013

Vorsitzender: Prof. Dr. Bernhard Arnold

Erstgutachter: Prof. Dr. Hartmut Stadler

Zweitgutachter: Prof. Dr. Knut Haase

Datum der Disputation: 22.01.2014

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	ix
Abkürzungsverzeichnis	xi
Symbolverzeichnis	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Ziel der Arbeit	1
1.2 Aufbau der Arbeit	2
2 Grundlagen	5
2.1 Planungsebenen und -aufgaben im Supply Chain Management	5
2.1.1 Supply Chain Planning Matrix	5
2.1.2 Langfristige Standortplanung	10
2.1.3 Mittelfristige Produktionsplanung	15
2.2 Formalisierung der hierarchischen Planung nach Schneeweiß	18
2.2.1 Klassifikation des Planungssystems	19
2.2.2 Hierarchische Planungsstruktur	20
2.2.3 Koordination und formales Modell	22
2.2.4 Antizipation	24
2.2.5 Aggregation und Disaggregation	26
2.2.6 Literaturüberblick	29
3 Koordination der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung	37
3.1 Eigenschaften und mathematisches Modell der betrachteten langfristigen Standortplanung	38
3.2 Eigenschaften und mathematisches Modell der betrachteten mittelfristigen Produktionsplanung	47
3.3 Mathematisches Gesamtmodell	56
3.4 Notwendigkeit einer Koordination	60
3.5 Ein Praxisbeispiel	66

3.6	Literaturüberblick	69
3.7	Voraussetzungen und Anforderungen an eine Koordination	80
4	Übertragung des Konzepts der hierarchischen Planung auf die langfristige Standort- und mittelfristige Produktionsplanung	83
4.1	Hierarchische Planungsstruktur	83
4.2	Instruktion und Reaktion	86
4.3	Aggregation und Disaggregation	88
4.4	Antizipationsfunktion	91
4.5	Varianten der hierarchischen Koordination ohne Antizipation	93
5	Entwicklung neuer hierarchischer Koordinationsformen	99
5.1	Antizipationsfunktionen zur besseren Abschätzung der untergeordneten Planungsebene	99
5.1.1	Allgemeine Formulierung einer explizit approximierten Antizipationsfunktion	102
5.1.2	Allgemeine Formulierung einer teilweise explizit exakten Antizipationsfunktion	109
5.2	Varianten der hierarchischen Koordination mit den entwickelten Antizipationsfunktionen	113
5.2.1	Mengenmäßig explizit approximierte Antizipationsfunktion	114
5.2.2	Kapazitätsmäßig explizit approximierte Antizipationsfunktion	124
5.2.3	Teilweise explizit exakte Antizipationsfunktion mit einer Periode	132
5.2.4	Teilweise explizit exakte Antizipationsfunktion mit zwei Perioden	137
6	Testrechnungen	145
6.1	Testaufbau	145
6.1.1	Varianten der hierarchischen Koordination ohne Antizipation	145
6.1.2	Varianten der hierarchischen Koordination mit Antizipation	146
6.1.3	Prämissen und Testszenarien	147
6.2	Erzeugung der Testdaten und Ablauf der Testrechnungen	149
6.3	Auswertung der Ergebnisse	153
7	Zusammenfassung, Fazit und Ausblick	163
7.1	Zusammenfassung	163
7.2	Fazit	165
7.3	Ausblick	166
	Literaturverzeichnis	169
A	Anhang	177
A.1	Erzeugung der Testdaten	177

A.2	Einstellungen der Testszenarien	184
A.2.1	Kleines Szenario	184
A.2.2	Großes Szenario	189
A.3	Ergebnisse der Testrechnungen	194

Abbildungsverzeichnis

2.1	Supply Chain Planning Matrix mit Planungsaufgaben	6
2.2	Rollierende Planung	13
2.3	Hierarchische Planungsstruktur	21
2.4	Hierarchisches Planungssystem nach Schneeweiß	25
3.1	Einordnung in die Supply Chain Planning Matrix	37
3.2	Beispiel für Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung	49
3.3	Interdependenzen der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung	61
3.4	Modifiziertes Beispiel für Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung	65
3.5	Beispiel für Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung mit erhöhter Kapazität	66
4.1	Einordnung der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung in das hierarchische Planungssystem nach Schneeweiß	85
4.2	Instruktion und Reaktion in der hierarchischen langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung	87
4.3	Antizipation der Produktionsplanung in der hierarchischen langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung	92
4.4	Top-Down Planung	94
4.5	Iterative hierarchische Planung	95
5.1	Iterative hierarchische Planung mit mengenmäßig explizit approximierter Antizipationsfunktion	122
5.2	Iterative hierarchische Planung mit kapazitätsmäßig explizit approximierter Antizipationsfunktion	129
5.3	Iterative hierarchische Planung mit teilweise explizit exakter Antizipationsfunktion mit einer Periode	135
5.4	Iterative hierarchische Planung mit teilweise explizit exakter Antizipationsfunktion mit zwei Perioden	141
6.1	Beispielhaft erzeugte Nachfrage eines Marktes für ein Produkt über zehn Jahre	151
6.2	Verteilung der Gaps des kleinen Szenarios je Variante	155
6.3	Verteilung der Rechenzeiten des kleinen Szenarios je Variante	157

Tabellenverzeichnis

2.1	Literaturüberblick zu verwendeten Antizipationsfunktionen - Teil 1	34
2.2	Literaturüberblick zu verwendeten Antizipationsfunktionen - Teil 2	35
3.1	Gegenstand der betrachteten langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung	62
3.2	Literaturüberblick zur Koordination der Standort- und Produktionspla- nung - Teil 1	76
3.3	Literaturüberblick zur Koordination der Standort- und Produktionspla- nung - Teil 2	77
3.4	Literaturüberblick zur Koordination der Standort- und Produktionspla- nung - Teil 3	78
3.5	Literaturüberblick zur Koordination der Standort- und Produktionspla- nung - Teil 4	79
6.1	Dimensionen des kleinen Szenarios	147
6.2	Dimensionen des großen Szenarios	148
6.3	Durchschnittliche Gaps und Rechenzeiten der Varianten des kleinen Sze- narios	154
6.4	Variantenvergleich der Gesamtergebnisse des kleinen Szenarios mit dem Wilcoxon Vorzeichen-Rang-Test	158
6.5	Variantenvergleich der Rechenzeiten des kleinen Szenarios mit dem Wil- coxon Vorzeichen-Rang-Test	159
6.6	Durchschnittliche Gaps, Rechenzeiten und Optimalitätslücken der Vari- anten des großen Szenarios	161
A.1	Bestimmung der Mengen	177
A.2	Bestimmung der Daten - Teil 1	178
A.3	Bestimmung der Daten - Teil 2	179
A.4	Bestimmung der Daten - Teil 3	180
A.5	Bestimmung der Daten - Teil 4	181
A.6	Bestimmung der Daten - Teil 5	182
A.7	Bestimmung der Daten - Teil 6	183
A.8	Bestimmung der Dimensionen im kleinen Szenario	184

A.9 Anzahl an Nebenbedingungen, reellwertigen und binären Variablen der Modelle im kleinen Szenario	185
A.10 Bestimmung der Daten im kleinen Szenario - Teil 1	186
A.11 Bestimmung der Daten im kleinen Szenario - Teil 2	187
A.12 Bestimmung der Daten im kleinen Szenario - Teil 3	188
A.13 Bestimmung der Dimensionen im großen Szenario	189
A.14 Anzahl an Nebenbedingungen, reellwertigen und binären Variablen der Modelle im großen Szenario	190
A.15 Bestimmung der Daten im großen Szenario - Teil 1	191
A.16 Bestimmung der Daten im großen Szenario - Teil 2	192
A.17 Bestimmung der Daten im großen Szenario - Teil 3	193
A.18 Gesamtergebnisse der Varianten des kleinen Szenarios je Testinstanz . . .	195
A.19 Gaps der Varianten des kleinen Szenarios je Testinstanz	196
A.20 Rechenzeiten der Varianten des kleinen Szenarios je Testinstanz	197
A.21 Ergebnisse der Prüfvariablen des Wilcoxon Vorzeichen-Rang-Tests der Gesamtergebnisse je Hypothese und Variantenvergleich	198
A.22 Ergebnisse der Prüfvariablen des Wilcoxon Vorzeichen-Rang-Tests der Rechenzeiten je Hypothese und Variantenvergleich	199
A.23 Gaps der Varianten des großen Szenarios je Testinstanz	200
A.24 Rechenzeiten der Varianten des großen Szenarios je Testinstanz	201
A.25 Optimalitätslücken des Modells der Standortplanung der Varianten des großen Szenarios je Testinstanz	202

Abkürzungsverzeichnis

APS	Advanced Planning System
CLSP	Capacitated Lot Sizing Problem
HP	Hierarchische Planung
HPP	Hierarchische Produktionsplanung
LP	Linear Programming
ME	Mengeneinheiten
MIP	Mixed Integer Programming
MLCLSP	Multi Level Capacitated Lot Sizing Problem
MP	Master Planning
MPS	Master Production Scheduling
NAFTA	North American Free Trade Agreement
PPP	Produktionsprogrammplanung
SC	Supply Chain
SCM	Supply Chain Management
SCP	Supply Chain Planning
WLP	Warehouse Location Problem

Symbolverzeichnis

Indizes und Mengen

G	Menge der geografischen Standorte
g	Geografischer Standort aus G
I	Menge der Produkte
i	Produkt (PPP-Beispiel)
i, j	Produkt aus I
K	Menge der Märkte
k	Markt aus K
M	Planungshorizont der mittelfristigen Produktionsplanung
m	Periode der Basis-Ebene
m	Periode der mittelfristigen Produktionsplanung (Monat)
P	Menge der Produktgruppen
p	Produktgruppe aus P
PG_p	Menge der Produkte von Produktgruppe p ($PG_p \subset I$)
S	Menge der Standorte / Standortkonfigurationen
s, r	Standort / Standortkonfiguration aus S
SG_g	Menge der Standorte / Standortkonfigurationen am geografischen Standort g ($SG_g \subset S$)
T	Planungshorizont der Standortplanung
t	Periode (PPP-Beispiel)
t	Periode der Standortplanung (Jahr)

t	Periode der Top-Ebene
tt	Ausgewählte zweite Periode der Antizipationsfunktion
Daten	
δ^{TM}	Mindestdauer einer Standortöffnung
μ^{TM}	Mindestdauer einer Produkt-Werk-Allokation
π^{AF}	Anteil der Backordermenge, der nach einer Periode als Lost Sales auftritt
π^{BM}	Anteil der Backordermenge, der nach einer Periode als Lost Sales auftritt
τ_s^{TM}	Dauer bis Standortöffnung von s komplett vollzogen (falls $\tau_s^{TM} = 0$, ist der Standort bereits in der Periode der Eröffnung zu 100% verfügbar)
\widehat{cd}^{AF}	Antizipierte Kosten für zusätzlichen Kapazitätsbedarf
\widehat{ce}^{AF}	Antizipierte Kosten für direkte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung
\widehat{cf}^{AF}	Antizipierte Kosten für vor- oder nachgelagerte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung
$\widehat{gc}_t^{AF,t=1}$	Gewichtungsfaktor für Zielsetzung aus der Periode $t = 1$ für die Periode t
$\widehat{gc}_t^{AF,t=tt}$	Gewichtungsfaktor für Zielsetzung aus der Periode $t = tt$ für die Periode t
\widehat{gd}_{tm}^{AF}	Gewichtungsfaktor für zusätzlichen Kapazitätsbedarf in Periode t und Periode m
\widehat{gx}_{tm}^{AF}	Gewichtungsfaktor für Nachfrage in Periode t und Periode m
a_s^{AF}	Produktionskoeffizient an Standort s
a_i	Produktionskoeffizient für Produkt i (PPP-Beispiel)
a_{si}^{BM}	Produktionskoeffizient für Produkt i an Standort s
a_{sp}^{TM}	Produktionskoeffizient für Produktgruppe p an Standort s
ax^B	Koeffizient für Entscheidungsmenge
ax^T	Koeffizient für Entscheidungsmenge
$B_{ski,m=0}^{BM}$	Backordermenge von Produkt i am Standort s für Markt k in Periode $m = 0$

$B_{skit,m=0}^{BM}$	Backordermenge von Produkt i am Standort s für Markt k in Periode $m = 0$ und Periode t
$B_{skpt,m=0}^{AF}$	Antizipierte Backordermenge von Produktgruppe p an Standort s für Markt k in Periode $m = 0$ und Periode t
cb_s^{AF}	Kosten für Kapazität in Form von Backordermengen an Standort s
cb_{ki}^{BM}	Kosten für Backordermenge von Markt k für Produkt i
cb_{kp}^{AF}	Kosten für Backordermenge von Markt k für Produktgruppe p
cd^B	Kosten für zusätzlichen Kapazitätsbedarf
cd_{ski}^{BM}	Transportkosten von Standort s zu Markt k für Produkt i
cd_{sk}	Transportkosten von Standort s zu Markt k (WLP-Beispiel)
ce^B	Kosten für direkte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung
cf^B	Kosten für vor- oder nachgelagerte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung
cl_i	Lagerkostensatz von Produkt i (PPP-Beispiel)
cl_s^{AF}	Kosten für Kapazität in Form von Lagerbestand an Standort s
cl_{si}^{BM}	Lagerkostensatz von Produkt i an Standort s
cl_{sp}^{AF}	Lagerkostensatz von Produktgruppe p an Standort s
cls_s^{AF}	Kosten für Kapazität in Form von Lost Sales an Standort s
cls_{ki}^{BM}	Kosten für Lost Sales von Markt k für Produkt i
cls_{kp}^{AF}	Kosten für Lost Sales von Markt k für Produktgruppe p
cr_i	Rüstkosten für Produkt i (PPP-Beispiel)
cr_{si}^{BM}	Rüstkosten für Produkt i an Standort s
cr_{sp}^{AF}	Rüstkosten für Produktgruppe p an Standort s
crp_s^{AF}	Kosten je Rüstübergang zwischen Produktgruppen an Standort s
crp_s^{BM}	Kosten je Rüstübergang zwischen Produktgruppen an Standort s
ct_{sri}^{BM}	Transportkosten von Standort s zu Standort r für Produkt i
ct_{srp}^{AF}	Transportkosten von Standort s zu Standort r für Produktgruppe p

Symbolverzeichnis

ct_{sr}^{AF}	Kosten für Kapazität in Form von Transportmengen von Standort s zu Standort r
cx^T	Kosten für Entscheidungsmenge
cx_s^{AF}	Produktions- und Transportkosten für Absatzmengen an Standort s
cx_{si}^{BM}	Produktionskosten an Standort s für Produkt i
cx_{skp}^{TM}	Produktions- und Transportkosten für Absatzmenge von Standort s zu Markt k für Produktgruppe p
cy^T	Kosten für binäre Strukturentscheidung
cy_s^{TM}	Fixe Kosten für Standort s
cy_s	Fixe Kosten für Standort s (WLP-Beispiel)
cyg_g^{TM}	Öffnungskosten für geografischen Standort g
cyo_s^{TM}	Öffnungskosten für Standort s
cy_s^{TM}	Schließungskosten für Standort s
cz_s^{AF}	Kosten für Zusatzkapazitäten an Standort s
cz_s^{BM}	Kosten für Zusatzkapazitäten an Standort s
d_{it}	Nachfrage für Produkt i in Periode t (PPP-Beispiel)
d_{kim}^{BM}	Nachfrage von Markt k für Produkt i in Periode m
d_{kitm}^{BM}	Nachfrage von Markt k für Produkt i in Periode m und Periode t
d_{kpt}^{TM}	Nachfrage von Markt k für Produktgruppe p in Periode t
d_{kt}	Nachfrage von Markt k in Periode t (WLP-Beispiel)
d_{tm}^B	Nachfrage in Periode t und Periode m
db_{it}	Deckungsbeitrag von Produkt i in Periode t (PPP-Beispiel)
dg_{kpm}^{AF}	Anteil der Nachfrage von Markt k für Produktgruppe p in Periode m innerhalb eines Jahres
$dmin_{it}$	Mindestabsatzmenge für Produkt i in Periode t (PPP-Beispiel)
$dmin_{ki}^{BM}$	Prozentualer Mindestanteil der zu liefernden, mittelfristigen Nachfrage für Markt k für Produkt i

$dmin_{kp}^{TM}$	Prozentualer Mindestanteil der zu liefernden, langfristigen Nachfrage für Markt k für Produktgruppe p
k^B	Kapazität
k^T	Kapazität
k_s^{BM}	Monatliche Kapazität von Standort s
k_s^{TM}	Jährliche Kapazität von Standort s
k_s	Kapazität von Standort s (WLP-Beispiel)
k_t	Kapazität in Periode t (PPP-Beispiel)
$KB_{st,m=0}^{AF}$	Antizipierte vorhandene Anfangs-Kapazität in Form von Backordermengen an Standort s in Periode $m = 0$ und Periode t
$KL_{st,m=0}^{AF}$	Antizipierte vorhandene Anfangs-Kapazität in Form von Lagerbestand an Standort s in Periode $m = 0$ und Periode t
ko_{st}^{TM}	Reduktion des Kapazitätsanteils, wenn 100%ige Verfügbarkeit noch t Perioden am Standort s benötigt (z.B. $\tau_s^{TM} = 3 : ko_{s,t=1}^{TM} = 0,1 ko_{s,t=2}^{TM} = 0,3 ko_{s,t=3}^{TM} = 0,4$ d.h. im Jahr der Eröffnung (zu Beginn der Periode) stehen 100%-40% = 60% der Maximalkapazität zur Verfügung), $t = 1 \dots \tau_s^{TM}$
kp_{sp}^{BM}	Kapazität von Standort s für Produktgruppe p ($0 \dots k_s^{BM}$)
kp_{sp}^{TM}	Kapazität von Standort s für Produktgruppe p ($0 \dots k_s^{TM}$)
$L_{i,t=0}$	Lageranfangsbestand von Produkt i in Periode $t = 0$ (PPP-Beispiel)
$L_{i,T}$	Lagerendbestand von Produkt i in Periode $t = T$ (PPP-Beispiel)
$L_{si,m=0}^{BM}$	Lageranfangsbestand von Produkt i an Standort s in Periode $m = 0$
$L_{sit,m=0}^{BM}$	Lageranfangsbestand von Produkt i an Standort s in Periode $m = 0$ und Periode t
$L_{spt,m=0}^{AF}$	Antizipierter Lageranfangsbestand von Produktgruppe p an Standort s in Periode $m = 0$ und Periode t
$lmax_s^{AF}$	Maximaler Lagerbestand an Standort s
$lmax_s^{BM}$	Maximaler Lagerbestand an Standort s
M	Hinreichend große Zahl (PPP-Beispiel)

Symbolverzeichnis

M^{AF}	Hinreichend große Zahl
M^{BM}	Hinreichend große Zahl
p_s^{AF}	Absatzpreis an Standort s
p_{ki}^{BM}	Absatzpreis auf Markt k für Produkt i
p_{kp}^{TM}	Absatzpreis auf Markt k für Produktgruppe p
ra_i	Rüstzeit von Produkt i (PPP-Beispiel)
ra_{si}^{BM}	Rüstzeit von Produkt i an Standort s
ra_{sp}^{AF}	Rüstzeit von Produktgruppe p an Standort s
rap_s^{AF}	Rüstzeit je Rüstübergang zwischen Produktgruppen an Standort s
rap_s^{BM}	Rüstzeit je Rüstübergang zwischen Produktgruppen an Standort s
x_t^{T*}	Entscheidungsmenge in Periode t
$x_{skp,t=1}^{TM}$	Absatzmenge der Produktgruppe p von Standort s auf Markt k in aktuellem Jahr $t = 1$
$y_start_{st}^{TM}$	1, wenn Standort s zu Beginn der Periode t geschlossen werden darf; 0, sonst ($t = 1 \dots \delta^{TM}$)
y_t^{T*}	Binäre Strukturentscheidung in Periode t
$Y_{s,t=0}^{TM}$	Bestehende Standorte s in Periode $t = 0$
$y_{s,t=1}^{TM}$	Entscheidung ob Standort s in aktuellem Jahr $t = 1$ geöffnet ist
$yk_{s,t=1}^{TM}$	Standortkapazität als Anteil zwischen 0 und 1 von Standort s in aktuellem Jahr $t = 1$
$yo_start_{st}^{TM}$	1, wenn Standort s in der Vergangenheit in Periode t geöffnet wurde; 0, sonst ($-\tau_s^{TM} + 1 \leq t \leq 0$)
$yp_start_{spt}^{TM}$	1, wenn Produkt-Werk-Allokation von Produktgruppe p an Standort s zu Beginn der Periode t aufgegeben werden darf; 0, sonst ($t = 1 \dots \mu^{TM}$)
$YP_{sp,t=0}^{TM}$	Bestehende Produkt-Werk-Allokationen von Produktgruppe p an Standort s in Periode $t = 0$
$yp_{sp,t=1}^{TM}$	Produkt-Werk-Allokation ob Produktgruppe p an Standort s in aktuellem Jahr produziert wird $t = 1$

z	Kapitalzinssatz (WLP-Beispiel)
z	Kapitalzinssatz
$zmax_s^{AF}$	Maximale Zusatzkapazitäten an Standort s
$zmax_s^{BM}$	Maximale Zusatzkapazitäten an Standort s
Variablen	
\hat{D}_{tm}^{AF}	Antizipierter zusätzlicher Kapazitätsbedarf in Periode t und Periode m
\hat{E}_{tm}^{AF}	Antizipierte direkte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung in Periode t und Periode m
\hat{F}_{tm}^{AF}	Antizipierte vor- oder nachgelagerte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung in Periode t und Periode m
B_{skim}^{BM}	Backordermenge von Produkt i an Standort s für Markt k in Periode m
B_{skitm}^{BM}	Backordermenge von Produkt i an Standort s für Markt k in Periode m und Periode t
B_{skptm}^{AF}	Antizipierte Backordermenge von Produktgruppe p an Standort s für Markt k in Periode m und Periode t
D_{tm}^B	Zusätzlicher Kapazitätsbedarf in Periode t und Periode m
E_{tm}^B	Direkte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung in Periode t und Periode m
F_{tm}^B	Vor- oder nachgelagerte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung in Periode t und Periode m
K_{tm}^{AF++}	Antizipierte in Anspruch genommene Kapazität des Kapazitätsüberschusses in Periode t und Periode m
K_{tm}^{AF+}	Antizipierter Kapazitätsüberschuss in Periode t und Periode m
K_{tm}^{AF-}	Antizipierter Kapazitätsmangel in Periode t und Periode m
KB_{stm}^{AF}	Antizipierte vorhandene Kapazität in Form von Backordermengen an Standort s in Periode m und Periode t
KL_{stm}^{AF}	Antizipierte vorhandene Kapazität in Form von Lagerbestand an Standort s in Periode m und Periode t

KL_{stm}^{AF}	Antizipierte vorhandene Kapazität in Form von Lost Sales an Standort s in Periode m und Periode t
KM_{stm}^{AF}	Antizipierter Kapazitätsmangel an Standort s in Periode m und Periode t
KT_{sr}^{AF}	Antizipierte vorhandene Kapazität in Form von Transportmengen von Standort s an Standort r in Periode m und Periode t
KU_{stm}^{AF}	Antizipierter Kapazitätsüberschuss an Standort s in Periode m und Periode t
KUA_{stm}^{AF}	Antizipierte in Anspruch genommene Kapazität des Kapazitätsüberschusses an Standort s in Periode m und Periode t
L_{it}	Lagerbestand von Produkt i am Ende der Periode t (PPP-Beispiel)
L_{sim}^{BM}	Lagerbestand von Produkt i an Standort s am Ende der Periode m
L_{sitm}^{BM}	Lagerbestand von Produkt i an Standort s am Ende der Periode m und Periode t
L_{sptm}^{AF}	Antizipierter Lagerbestand von Produktgruppe p an Standort s am Ende der Periode m und Periode t
LS_{skim}^{BM}	Lost Sales von Produkt i an Standort s für Markt k in Periode m
LS_{skitm}^{BM}	Lost Sales von Produkt i an Standort s für Markt k in Periode m und Periode t
LS_{skptm}^{AF}	Antizipierte Lost Sales von Produktgruppe p an Standort s für Markt k in Periode m und Periode t
R_{it}	1, wenn für Produkt i in Periode t gerüstet wird; 0, sonst (PPP-Beispiel)
R_{sim}^{BM}	1, wenn für Produkt i an Standort s in Periode m gerüstet wird; 0, sonst
R_{sitm}^{BM}	1, wenn für Produkt i an Standort s in Periode m und Periode t gerüstet wird; 0, sonst
RP_{spm}^{BM}	1, wenn für Produktgruppe p an Standort s in Periode m gerüstet wird; 0, sonst
RP_{sptm}^{AF}	1, wenn für Produktgruppe p an Standort s in Periode m und Periode t gerüstet wird; 0, sonst

RP_{sptm}^{BM}	1, wenn für Produktgruppe p an Standort s in Periode m und Periode t gerüstet wird; 0, sonst
RPR_{stm}^{BM}	Anzahl an Rüstvorgängen zwischen Produktgruppen an Standort s in Periode m
RPR_{stm}^{AF}	Anzahl an Rüstvorgängen zwischen Produktgruppen an Standort s in Periode m und Periode t
RPR_{stm}^{BM}	Anzahl an Rüstvorgängen zwischen Produktgruppen an Standort s in Periode m und Periode t
T_{srjm}^{BM}	Transportmenge von Produkt i aus Standort s an Standort r in Periode m
T_{srjm}^{BM}	Transportmenge von Produkt i aus Standort s an Standort r in Periode m und Periode t
T_{srptm}^{AF}	Antizipierte Transportmenge von Produktgruppe p aus Standort s an Standort r in Periode m und Periode t
X_t^T	Entscheidungsmenge in Periode t
X_{it}	Produktionsmenge von Produkt i in Periode t (PPP-Beispiel)
X_{sim}^{BM}	Produktionsmenge von Produkt i an Standort s in Periode m
X_{sitm}^{BM}	Produktionsmenge von Produkt i an Standort s in Periode m und Periode t
X_{tm}^B	Entscheidungsmenge in Periode t und Periode m
XD_{it}	Absatzmenge von Produkt i in Periode t (PPP-Beispiel)
XD_{skim}^{BM}	Absatzmenge von Produkt i an Standort s für Markt k in Periode m
XD_{skitm}^{BM}	Absatzmenge von Produkt i an Standort s für Markt k in Periode m und Periode t
XD_{skpt}^{TM}	Absatzmenge von Produktgruppe p an Standort s für Markt k in Periode t
XD_{skt}	Absatzmenge von Standort s für Markt k in Periode t (WLP-Beispiel)
Y_t^T	Binäre Strukturentscheidung in Periode t
Y_{st}	1, wenn Standort s in Periode t geöffnet ist; 0, sonst (WLP-Beispiel)

Symbolverzeichnis

Y_{st}^{TM}	1, wenn Standort s in Periode t geöffnet ist; 0, sonst
YG_{gt}^{TM}	1, wenn geografischer Standort g in Periode t geöffnet wird; 0, sonst
YK_{st}^{TM}	Standortkapazität als Anteil zwischen 0 und 1 von Standort s in Periode t
YO_{st}^{TM}	1, wenn Standort s zu Beginn der Periode t geöffnet wird; 0, sonst
YP_{spt}^{TM}	1, wenn Produktgruppe p an Standort s in Periode t produziert wird; 0, sonst
YS_{st}^{TM}	1, wenn Standort s zu Beginn der Periode t geschlossen wird; 0, sonst
Z_{sm}^{BM}	Zusatzkapazitäten an Standort s in Periode m
Z_{stm}^{AF}	Antizipierte Zusatzkapazitäten an Standort s in Periode m und Periode t
Z_{stm}^{BM}	Zusatzkapazitäten an Standort s in Periode m und Periode t

1 Einleitung

1.1 Motivation und Ziel der Arbeit

Immer mehr Unternehmen nutzen heutzutage ausgefeilte kommerzielle Planungssoftware, um ihre Aktivitäten wirkungsvoll zu koordinieren und damit Wettbewerbsvorteile zu erzielen. Dabei sind die Aktivitäten häufig über mehrere Standorte verteilt und müssen über verschiedene Planungsebenen koordiniert werden. Zu der genutzten Planungssoftware zählen auch Advanced Planning Systeme (APS), die von unterschiedlichen Softwareherstellern angeboten werden und nach den Prinzipien der Hierarchischen Planung (HP) aufgebaut sind.

Die HP sieht vor, die Koordination von zwei oder mehr Planungsebenen über einen iterativen Planungsablauf zu verbessern. Dabei wird eine Instruktion von einer übergeordneten an eine untergeordnete Planungsebene und eine Reaktion von einer untergeordneten an eine übergeordnete Planungsebene übergeben. Zusätzlich soll die übergeordnete Planungsebene durch eine Antizipation der Reaktion der untergeordneten Planungsebene bereits frühzeitig bessere Lösungen für das gesamte Planungssystem bestimmen.

Für die Koordination der meisten Planungsebenen bieten APS bereits Verknüpfungen und Antizipationen im Sinne der HP an, jedoch nicht für die Koordination der langfristigen Standortplanung und mittelfristigen Produktionsplanung. Zwar werden Informationen ausgetauscht, eine ausreichende Koordination nach den Prinzipien der HP ist aber nicht gegeben.

Dies stellt ein Problem dar, denn insbesondere langfristige Planungen können zu Lösungen führen, die auf untergeordneten Planungsebenen erhebliche Folgekosten nach sich ziehen. Werden zum Beispiel nicht genügend Kapazitäten durch einen Standort zur Verfügung gestellt, müssen bei Kapazitätsengpässen in der mittelfristigen Produktionsplanung im Nachhinein Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung getroffen werden, die mit zusätzlichen Kosten verbunden sind. Ursachen dafür sind unterschiedliche Fristigkeiten und Aggregationsniveaus der involvierten Planungsebenen, die zu Aggregations- und Disaggregationsfehlern führen können. Um derartige Situationen zu vermeiden, ist es notwendig, lang- und mittelfristige Planungsebenen besser zu koordinieren.

Für die Koordination von lang- und mittelfristigen Planungsebenen bietet sich das Konzept der HP an. Es wurde bislang jedoch noch nicht konkret auf eine solche Planungssituation angewandt. Auch werden bisher entwickelte Antizipationsfunktionen, die eine untergeordnete Planungsebene abschätzen, zumeist sehr problemspezifisch dargestellt oder bilden die untergeordnete Planungsebene exakt ab. Eine Übertragung der

bisher entwickelten Antizipationsfunktionen auf die Abschätzung einer mittelfristigen Planungsebene lässt sich somit nur schwer realisieren oder würde die Komplexität der Planung zu sehr erhöhen.

Aus diesem Grund besteht das Ziel der Arbeit darin, neue hierarchische Koordinationsformen mit Antizipationsfunktionen auf Basis der HP zu entwickeln, die die Koordination unterschiedlicher Planungsebenen mit unterschiedlichen Aggregationsniveaus und Fristigkeiten ermöglichen und somit die Lösungsgüte verbessern.

Insbesondere die zu entwickelnden Antizipationsfunktionen sollen die Reaktion einer mittelfristigen Planungsebene abschätzen, um damit die Entscheidung der übergeordneten Planungsebene zugunsten einer besseren Gesamtlösung zu beeinflussen. Gleichzeitig soll durch die Antizipationsfunktionen die Abbildungsgenauigkeit der Prozesse und Daten der mittelfristigen Planungsebene erhöht werden, um eine verbesserte Bereitstellung und Nutzung der Kapazitäten zu erzielen sowie Marktpotenziale besser auszuschöpfen.

Die neuen hierarchischen Koordinationsformen mit Antizipationsfunktionen werden dabei konkret auf die Koordination der langfristigen Standortplanung und mittelfristigen Produktionsplanung angewandt. Die zu entwickelnden Antizipationsfunktionen sollen betriebliche Anwendungsaspekte für die langfristige Standort- und mittelfristige Produktionsplanung beinhalten, aber auch so konzipiert sein, dass sie allgemein formuliert und auf andere Planungssituationen anwendbar sind.

1.2 Aufbau der Arbeit

Zur Erreichung des vorgestellten Ziels werden im ersten Schritt in Kapitel 2 die Planungsebenen und -aufgaben im Supply Chain Management (SCM) vorgestellt. Neben allgemeinen Grundlagen werden besonders die langfristige Standort- und mittelfristige Produktionsplanung näher beschrieben. Dazu dienen Klassifikationen sowie mathematische Modelle, die im weiteren Verlauf der Arbeit als Basis dienen. Anschließend wird die HP in der Formalisierung nach Schneeweiß (2003b) vorgestellt. Dabei wird unter anderem auf die hierarchische Planungsstruktur mit einer über- und einer untergeordneten Planungsebene sowie die formale Darstellung der Antizipation eingegangen, die als Grundlage für die zu entwickelnden Antizipationsfunktionen dient. Da die Planungsebenen unterschiedliche Aggregationsniveaus und Fristigkeiten besitzen, werden allgemeine Verfahren zur Aggregation und Disaggregation beschrieben. Zuletzt wird Literatur vorgestellt, die sich mit der HP und besonders der Antizipation auseinandersetzt.

In Kapitel 3 werden die mathematischen Modelle der betrachteten langfristigen Standortplanung und mittelfristigen Produktionsplanung sowie die zugehörigen Eigenschaften erläutert. Daneben wird zu Vergleichszwecken ein Gesamtmodell aufgestellt und die Notwendigkeit einer Koordination beider Planungsebenen erklärt. Das Praxisbeispiel eines Konsumgüterherstellers unterstreicht die Notwendigkeit einer Koordination der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung und stellt eine weitere Moti-

vation dieser Arbeit dar. Es wird ein Literaturüberblick zu Arbeiten gegeben, die sich mit der Koordination der beiden Planungsebenen auseinandersetzen. Die gewonnenen Erkenntnisse führen abschließend dazu, dass Voraussetzungen und Anforderungen formuliert werden, die eine Koordination der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung berücksichtigen sollte.

Die entwickelten Modelle der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung werden in Kapitel 4 in das Konzept der HP eingebunden. Hier werden die langfristige Standortplanung als übergeordnete Planungsebene und die mittelfristige Produktionsplanung als untergeordnete Planungsebene definiert. Zusätzlich werden die auszutauschenden Daten der Planungsebenen als Instruktion und Reaktion vorgestellt und die eingesetzten Verfahren zur Aggregation und Disaggregation beschrieben. Letztlich wird die Antizipation für die betrachtete Planungssituation abstrakt formuliert, um sie im folgenden Kapitel genauer zu definieren.

Neue Antizipationsfunktionen und die zugehörigen hierarchischen Koordinationsformen werden anschließend in Kapitel 5 entwickelt. Nach der allgemeinen Beschreibung der zu antizipierenden Bestandteile einer untergeordneten Planungsebene werden zwei allgemeine Formulierungen neuer Antizipationsfunktionen vorgestellt. Anschließend werden insgesamt vier konkrete Antizipationsfunktionen auf Basis der allgemein formulierten Antizipationsfunktionen für die Koordination der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung aufgestellt und die zugehörigen Planungsabläufe der hierarchischen Koordination beschrieben.

Sowohl für die entwickelten Varianten mit Antizipationsfunktion, als auch für herkömmliche Koordinationsformen werden Testrechnungen durchgeführt und in Kapitel 6 ausgewertet. Dabei werden zunächst der Testaufbau, die untersuchten Varianten der hierarchischen Koordination und die Konstruktion der Testinstanzen beschrieben, um danach die Ergebnisse detailliert, beispielsweise anhand von Wilcoxon Vorzeichen-Rang-Tests, auszuwerten.

Kapitel 7 fasst die Arbeit zusammen, zieht ein Fazit und gibt einen Ausblick auf mögliche Erweiterungen und Verbesserungen der entwickelten hierarchischen Koordinationsformen mit Antizipationsfunktionen.

2 Grundlagen

2.1 Planungsebenen und -aufgaben im Supply Chain Management

2.1.1 Supply Chain Planning Matrix

Ein Netzwerk aus mehreren Organisationen, die durch ihre jeweiligen Prozesse und Aktivitäten an der Wertschöpfung eines Produktes oder einer Dienstleistung beteiligt sind, wird als Wertschöpfungsnetzwerk bzw. Supply Chain (SC) bezeichnet. Hierbei kann zwischen inter- und intra-organisatorischen SCs unterschieden werden. Während bei inter-organisatorischen SCs zwei oder mehr rechtlich selbstständige Organisationen beteiligt sind, bezeichnet eine intra-organisatorische SC die SC einer einzigen großen Organisation. Die Planung der SC, insbesondere die Verknüpfung und Koordination der Prozesse, ist die Aufgabe des SCM (vgl. Stadtler, 2010, S. 7-9; Christopher, 2011, S. 15-18).

Das Ziel des SCM ist die effiziente Integration aller Teilnehmer der SC, wie Lieferanten, Produzenten oder auch Endverbraucher, um die nachgefragten Produkte oder Leistungen in der richtigen Menge, am richtigen Ort und zur richtigen Zeit bereit zu stellen, so dass die Gesamtkosten der SC minimiert und bestimmte Anforderungen eingehalten werden (vgl. Simchi-Levi et al., 2008, S. 1).

Um diese Zielsetzung zu erreichen, müssen Material-, Informations- und Geldflüsse zwischen den beteiligten Organisationen koordiniert werden (vgl. Stadtler, 2010, S. 7-8). Bekanntermaßen ist die Planung einer einzigen Organisation bereits eine Herausforderung, weshalb die Gesamtplanung einer SC mit mehreren Organisationen als sehr komplexe Aufgabe gilt. Zudem impliziert die Integration verschiedener Teilnehmer entlang der SC unterschiedliche Planungsebenen (vgl. z.B. Simchi-Levi et al., 2008, S. 1-3).

Der horizontale Planungsbereich beschäftigt sich mit Flüssen zwischen unterschiedlichen SC-Prozessen bzw. Organisationen die diese Prozesse in der Wertschöpfung ausführen. Die vertikale Planungsrichtung betrachtet hingegen mehrere Planungsebenen mit unterschiedlichen Aggregationsniveaus und unterschiedlich langen Planungszeiträumen, die zumeist für jede Organisation einzeln behandelt werden. Wichtig in diesem Zusammenhang ist die hierarchische Anordnung der vertikalen Planungsebenen, die von der obersten, sehr aggregierten Ebene der langfristigen Planung (strategische Entscheidungen, Planungshorizont: mehrere Jahre, z.B. zehn bis zwölf Jahre in der Automobilindustrie (vgl. Fleischmann et al., 2006, S. 195; Kauder und Meyr, 2009, S. 508)), über die mittelfristige Planung (taktische Entscheidungen, Planungshorizont: 6 bis 24 Monate),

bis hin zur detaillierten kurzfristigen Planung (operative Entscheidungen, Planungshorizont: wenige Tage bis drei Monate) reichen. Diese Hierarchie führt dazu, dass langfristig getroffene Entscheidungen mittelfristige und diese wiederum kurzfristige Entscheidungen beeinflussen, wodurch die Komplexität weiter steigt (vgl. z.B. Fleischmann et al., 2010, S. 90-97; Stadtler et al., 2012, S. 28-29).

Eine Gesamtplanung, die alle Planungsebenen einbezieht, wird als *Simultanplanung* bezeichnet, aber ist in der Praxis aufgrund der Komplexität zumeist nicht umsetzbar. Werden die Planungen der vertikalen Planungsebenen nacheinander durchgeführt, spricht man von einer *Sukzessivplanung*. Dabei können jedoch wichtige Abhängigkeiten zwischen den Planungsebenen missachtet werden (vgl. Fleischmann et al., 2010, S. 93). Um dies zu verhindern, liefert die HP einen Ansatz zur iterativen Koordination der vertikalen Planungsebenen. Nähere Erläuterungen zur HP folgen in Kapitel 2.2, da die HP einen Kernbestandteil dieser Arbeit bildet.

Zudem wird im weiteren Verlauf der Arbeit von einer intra-organisatorischen SC, also der SC einer einzigen großen Organisation, ausgegangen.

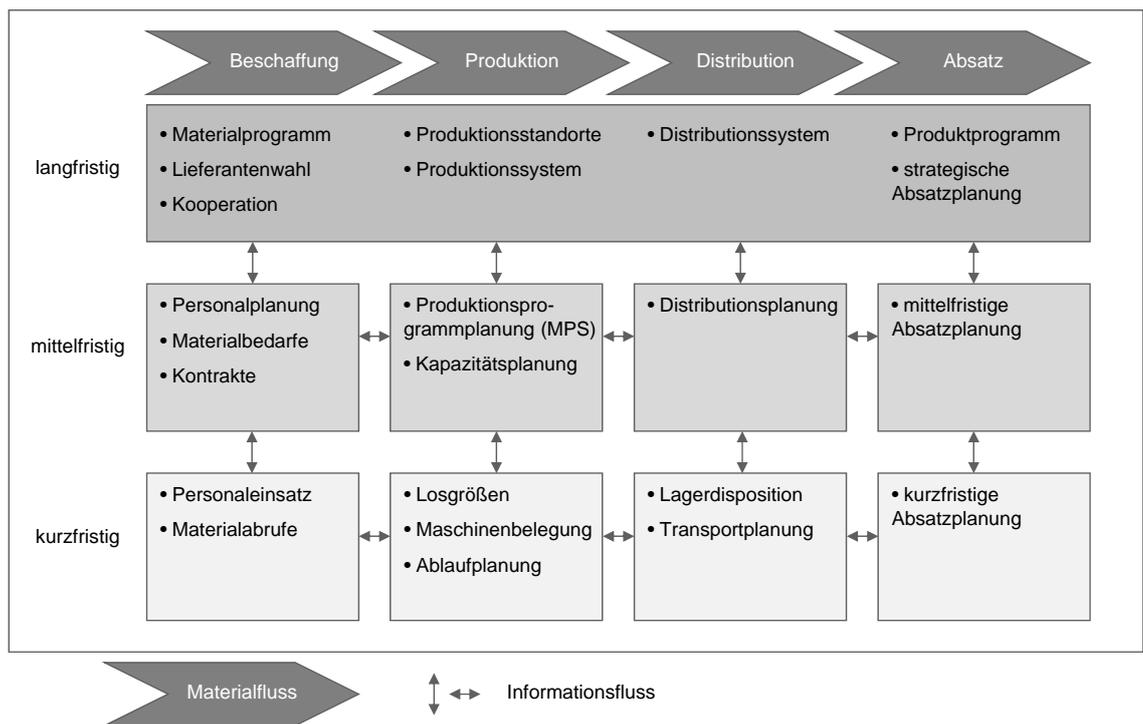


Abbildung 2.1: Supply Chain Planning Matrix mit Planungsaufgaben (in Anlehnung an Fleischmann et al., 2010, S. 97)

Aus den SC-Prozessen und Planungsebenen entstehen unterschiedliche Planungsaufgaben, die je nach Prozess und Planungsebene variieren. Die Supply Chain Planning (SCP) Matrix bietet eine Gesamtübersicht über die verschiedenen Aufgaben (siehe Abbildung 2.1). Die hier verwendete Version der Matrix stammt von Fleischmann et al. (2010), wobei diese erstmals in Rohde et al. (2000) veröffentlicht wurde. Sie enthält allerdings Software-Module anstatt Planungsaufgaben und soll dabei helfen, „die allgemeinen Aufgaben des SCP strukturiert darzustellen und die Module der SCP-Software bzw. der APSs einzuordnen“ (Rohde et al., 2000, S. 10).

Wie erwähnt, werden die dargestellten Planungsaufgaben durch die Dimensionen „Planungszeitraum“ und „SC-Prozess“ eingeteilt. Neben den langfristigen, mittelfristigen und kurzfristigen Planungszeiträumen werden die SC-Prozesse unterteilt in Beschaffung, Produktion, Distribution und Absatz. Um die Reichweite bzw. ganzheitliche Eigenschaft der langfristigen Planung zu unterstreichen sind auf dieser Planungsebene alle Planungsaufgaben in einem Rahmen zusammengefasst (vgl. Fleischmann et al., 2010, S. 97). Dies tritt auf den untergeordneten Planungsebenen nicht mehr auf, jedoch werden beispielsweise auf der mittelfristigen Planungsebene häufig die Bereiche Beschaffung, Produktion und Distribution als das sogenannte Master Planning (MP) zusammengefasst (vgl. Stadtler et al., 2012, S. 29).

Im Folgenden werden die einzelnen Planungsaufgaben genauer beschrieben. Die Erklärungen orientieren sich dabei an der Ausführung von Fleischmann et al. (2010).

Langfristige Planungsaufgaben

Die langfristige Planungsebene beschäftigt sich im Bereich Absatz mit dem Produktprogramm und der strategischen Absatzplanung. Um Entscheidungen über das zukünftige, langfristige Produktprogramm zu fällen, müssen voraussichtliche Absatzmengen sowohl der aktuellen Produkte, als auch der potentiellen neuen Produkte betrachtet werden. Zur Reduzierung der hohen Prognoseunsicherheit werden Produktdaten dabei üblicherweise aggregiert (z.B. ähnliche Produkte als Produktgruppen zusammengefasst) und auf jährlicher Basis betrachtet. Zusätzlich müssen Interdependenzen zwischen neuen und alten Produkten sowie neuen Märkten ebenso berücksichtigt werden, wie Abhängigkeiten von ökonomischen, politischen und wettbewerbsorientierten Faktoren sowie Lebenszyklen der Produkte (vgl. Fleischmann et al., 2010, S. 97-98).

Das Distributionssystem wird ebenfalls auf der langfristigen Planungsebene geplant. Hier wird darüber entschieden, welche physische Distributionsstruktur (Anzahl, Lage und Größe von Lagern und Umschlagplätzen, Transportrelationen, eigener Fuhrpark oder Logistikdienstleister) umzusetzen ist, um die langfristigen Kosten für Transport, Lagerhaltung, Umschlag und Betriebsmittel zu minimieren. Zu beachten sind dabei erneut voraussichtliche Absatzprognosen, das Produktprogramm sowie die Produktionskapazitäten und -kosten der Produktionsstandorte (vgl. Fleischmann et al., 2010, S. 98-99).

Im Bereich Produktion werden langfristig die Produktionsstandorte und das Produktionssystem festgelegt. Je nach Absatzprognosen und Produktprogramm müssen Produktionskapazitäten und -technologien angepasst werden. Dabei werden, um Unsicherheiten zu reduzieren, die Daten ebenso aggregiert betrachtet wie dies im Fall der Absatzprognosen geschieht. Die zu treffenden Strukturentscheidungen werden normalerweise gemeinsam mit den Entscheidungen des Distributionssystems getroffen, da sie stark voneinander abhängig sind (vgl. Fleischmann et al., 2010, S. 99). Detaillierte Ausführungen zu diesem Bereich werden in Kapitel 2.1.2 gegeben, da die Planung der Produktionsstandorte ein wichtiger Bestandteil dieser Arbeit ist.

Weitere langfristige Planungsaufgaben stellen das Materialprogramm, die Lieferantenauswahl und die Kooperation dar. Ziel dieser Planungsaufgaben ist die Auswahl geeigneter Materialien (z.B. Rohstoffe oder Vorprodukte), Lieferanten und eventueller Kooperationen mit Lieferanten, um die gestellten Anforderungen in den Kategorien Qualität, Verfügbarkeit und Service kostenminimal zu erfüllen und die benötigten Mengen bereit zu stellen (vgl. Fleischmann et al., 2010, S. 99-100).

Mittelfristige Planungsaufgaben

Um die vorgegebenen langfristigen Absatzpläne weiter zu verfeinern, werden die Absatzprognosen bei der mittelfristigen Absatzplanung typischerweise auf wöchentlicher oder monatlicher Basis durchgeführt. Zwar handelt es sich dabei weiterhin um aggregierte Daten, jedoch auf einem niedrigeren Niveau. Hierbei gilt es, absatzrelevante Effekte (z.B. mittelfristige Werbemaßnahmen oder Preisnachlässe) einzubeziehen und Prognosefehler durch kontinuierliche Überwachung permanent zu reduzieren, da die Absatzdaten als Input für die mittelfristige Produktionsprogrammplanung (PPP) dienen (vgl. Fleischmann et al., 2010, S. 100).

Im Distributionsbereich folgt die Distributionsplanung für das langfristig festgelegte System. Entschieden wird hier über die Transporte zwischen und zu den Lagern sowie über die in den Lagern zu haltenden Bestände. Ziel dabei ist die Minimierung der Kosten, insbesondere der Lager- und Transportkosten, wobei Lager- und Transportkapazitäten sowie die Kundennachfrage berücksichtigt werden müssen (vgl. Fleischmann et al., 2010, S. 100).

Die mittelfristige PPP (auch als Master Production Scheduling (MPS) oder Hauptproduktionsprogrammplanung bezeichnet) und die Kapazitätsplanung (zusammen im weiteren Verlauf als *mittelfristige Produktionsplanung* bezeichnet) bilden einen weiteren Kernbestandteil dieser Arbeit. An dieser Stelle wird analog zur Standortplanung nur ein kleiner Überblick gegeben. Weitere Details folgen in Kapitel 2.1.3. Die Aufgabe der mittelfristigen Produktion ist die effiziente und kostenminimale Einplanung der verfügbaren Produktionskapazitäten aller Produktionsressourcen, um die Nachfrage rechtzeitig zu befriedigen. Da auch hier auf Basis von Wochen oder Monaten geplant wird, werden weiterhin aggregierte Daten verwendet. In der Planung ist außerdem zu beachten, dass saisonale Nachfrageschwankungen auftreten können und diese beispielsweise durch Zu-

satzkapazitäten oder Lagerbestände abgefangen werden (vgl. Fleischmann et al., 2010, S. 100-101).

Im Bereich der Beschaffung finden mittelfristig die Planung des Personals, der Materialbedarfe und der Kontrakte statt. Durch die vorangegangene Kapazitätsplanung können die benötigten Arbeitszeiten des Personals abgeschätzt werden. Aufgabe der Personalplanung ist sicherzustellen, dass genügend Personal mit entsprechenden Qualifikationen und eventuell benötigte Zusatzkräfte in Form von Teilzeitkräften oder Leiharbeitern zur Verfügung stehen. Die Materialbedarfsplanung ermittelt anhand der Produktionsmengen der Endprodukte die benötigten Produktions- und Beschaffungsmengen der Vorprodukte. Ebenso werden Entscheidungen über Losgrößen und Bestelllose verschiedener Dispositionsstufen getroffen, um die Versorgung der Produktion mit Materialien zu gewährleisten. Nachdem die Materialbedarfe feststehen, können Kontrakte bzw. Verträge mit Lieferanten abgeschlossen werden, die die Preise, Mengen und weitere Konditionen im Planungszeitraum beinhalten (vgl. Fleischmann et al., 2010, S. 101-102).

Kurzfristige Planungsaufgaben

Im Bereich des Absatzes werden in einer Make-to-Stock Umgebung (welche hier Gegenstand der Betrachtung sein soll) einzig die Auslieferungen von Kundenaufträgen aus den vorhandenen Lagerbeständen geplant. Hierbei müssen bereits eingeplante Kundenaufträge beachtet und gegebenenfalls neue Produktionsaufträge veranlasst werden. Dies geschieht auf der niedrigsten Aggregationsstufe, so dass einzelne Produkte statt Produktgruppen in die Planung einfließen (vgl. Fleischmann et al., 2010, S. 102).

Die Lagerdisposition und die Transportplanung beschäftigen sich mit der kurzfristigen, also beinahe täglichen, kostenminimalen Planung der Ladungszusammenstellung und der Transporttouren. Dabei müssen die vorgeschlagenen Transportmengen der mittelfristigen Planung sowie die detaillierten Transportkapazitäten und Kundenaufträge berücksichtigt werden (vgl. Fleischmann et al., 2010, S. 102).

Um eine reibungslose und fristgerechte Produktion zu gewährleisten, findet im Produktionsbereich die Losgrößen-, Maschinenbelegungs- und Ablaufplanung statt. Die Losgrößenplanung legt fest, wie groß die Produktionslose verschiedener Produkte sind, wobei Abhängigkeiten zwischen einzelnen Produkten aufgrund von mehrstufigen Erzeugnisstrukturen oder gemeinsam genutzter Ressourcen zu beachten sind. Ziel dabei ist die Minimierung der Rüst- und Lagerhaltungskosten. Zur Einhaltung festgelegter Liefertermine werden diese Lose anschließend durch die Maschinenbelegungsplanung in eine zeitliche Reihenfolge gebracht, die auf den beschränkt verfügbaren Maschinen minutengenau eingehalten werden muss. Der so erstellte Ablaufplan wird kontinuierlich überwacht und muss gegebenenfalls situativ angepasst werden, da bei Produktionssystemen kurzfristig unvorhersehbare Störungen vorkommen können (vgl. Fleischmann et al., 2010, S. 102-103).

Die mittelfristig zur Verfügung gestellten Arbeitskräfte werden im kurzfristigen Bereich durch die Personaleinsatzplanung nochmals genauer eingeteilt. So müssen beispiels-

weise Tarifvereinbarungen oder persönliche Arbeitszeitkonten berücksichtigt werden. Im Materialbereich werden die abgeschlossenen Lieferverträge nun konkret genutzt, so dass das Material zeitnah abgerufen und möglichst kostenminimal zur Verfügung gestellt wird (vgl. Fleischmann et al., 2010, S. 103).

2.1.2 Langfristige Standortplanung

Grundsätzlich lassen sich die Ansätze zur Standortplanung in drei *Gruppen* einteilen. Die volkswirtschaftliche Standortplanung (auch als Raumwirtschaftstheorie bezeichnet) optimiert die Nutzung vorhandenen geografischen Raumes innerhalb eines Wirtschaftssektors. Als zweite Gruppe lässt sich die innerbetriebliche Standortplanung (auch als Layoutplanung oder Anordnungsplanung bezeichnet) definieren. Die Planungsaufgabe ist dabei die physische Anordnung von Betriebsmitteln innerhalb eines Betriebes. Da beide Planungsansätze im weiteren Verlauf nicht berücksichtigt werden, sei an dieser Stelle auf die Beschreibung und den Literaturüberblick z.B. bei Domschke und Drexl (1996, S. 1-3 und 12-18) verwiesen. Die letzte und für diese Arbeit relevante Gruppe wird als betriebliche Standortplanung bezeichnet. Diese beschäftigt sich mit der Wahl der Standorte für Produktionsstätten und Lager einzelner Unternehmen. Aber auch öffentliche Einrichtungen wie z.B. Krankenhäuser oder Schulen können Ziel der Planung sein (vgl. Domschke und Drexl, 1996, S. 1-3).

Lager werden häufig in Zentral- und Regionallager unterteilt (vgl. Günther und Tempelmeier, 2012, S. 63-67). Für die weitere Beschreibung soll jedoch die einfache Bezeichnung Lager ausreichen, welches sowohl ein Zentral- oder Regionallager sein kann.

Die Wahl und Planung der Standorte für Produktionsstätten und Lager bildet einen wichtigen Eckpfeiler der strategischen Unternehmensplanung. Dies basiert in erster Linie auf der Tatsache, dass durch die Standorte die nötige Infrastruktur zur Verfügung gestellt wird. Die getroffenen Entscheidungen haben zudem großen Einfluss auf die detaillierteren Planungen, bei denen die Standortentscheidungen als Rahmenbedingungen betrachtet werden müssen (vgl. Günther und Tempelmeier, 2012, S.63). Durch den langfristig hohen Kapitaleinsatz und das damit verbundene Investitionsrisiko steigt die Bedeutung der Standortplanung zusätzlich. Wird beispielsweise eine falsche Standortentscheidung getroffen, könnte dies unter Umständen die Existenz eines gesamten Unternehmens in Gefahr bringen (vgl. Günther und Tempelmeier, 2012, S. 67).

Um derartige Situationen zu vermeiden, ist es notwendig, sogenannte *Standortfaktoren* zur Entscheidungsfindung auszumachen. Diese Faktoren beschreiben die relevanten Eigenschaften eines Standortes und werden meist gesammelt als Kataloge dargestellt. Die folgende Übersicht zeigt einige Beispiele (vgl. z.B. Domschke und Drexl, 1996, S. 8-9; Neumann, 1996, S. 228).

- Grund und Boden (z.B. Lage und Größe, Expansionsmöglichkeiten)
- Verkehr und Transport (z.B. Straßen- oder Schienennetz)

- Produktion (z.B. Ersatz für Maschinen)
- Investition und Finanzierung (z.B. Bauunternehmen, Kreditinstitute)
- Allgemeine Infrastruktur (z.B. Wohnraum, Bildungseinrichtungen)
- Arbeitskräfte (z.B. Potential (Anzahl), Ausbildungsstand)
- Beschaffung und Entsorgung (z.B. Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe, Energie, Abfall)
- Absatz (z.B. Bevölkerungspotential, Kaufkraft)
- Öffentliche Hand (z.B. Steuervergünstigungen)
- Persönliche Präferenzen (z.B. Erholungs- und Urlaubsmöglichkeiten)

Einige Standortfaktoren lassen sich nur qualitativ bewerten, andere wiederum quantitativ. In Folge dieser Unterscheidung müssen auch verschiedene Werkzeuge zur Entscheidungsfindung herangezogen werden. Im Falle qualitativer Faktoren kann beispielsweise die Nutzwertanalyse verwendet werden (vgl. Günther und Tempelmeier, 2012, S. 70-73). Quantitative Faktoren lassen sich wertmäßig darstellen und können somit in konkrete Berechnungen oder mathematische Modelle einfließen. Da sich diese Arbeit insbesondere mit letztgenannten Modellen auseinandersetzt, werden im weiteren Verlauf nur quantitative Standortfaktoren behandelt.

Welche *Entscheidungen* durch die Standortplanung zu treffen sind, zeigen die folgenden Punkte. Diese wurden in Anlehnung an Simchi-Levi et al. (2008, S. 80) sowie Goetschalckx und Fleischmann (2010, S. 135-139) modifiziert übernommen.

- Anzahl und örtliche Lage der Produktionsstätten und Lager
- Kapazität der Produktionsstätten und Lager
- Allokationen der Produkte zu Produktionsstätten und Lagern
- Allokationen der Kunden zu Produktionsstätten und Lagern
- Produktionsmengen
- Liefermengen

Die Entscheidungen können dazu führen, dass Produktionsstätten oder Lager geöffnet oder geschlossen werden. Ebenso müssen Produktions- oder Lagerressourcen nach getroffenen Allokations- und Kapazitätsentscheidungen angepasst werden. Ziel dabei ist zumeist die Minimierung der Gesamtkosten, welche sich aus Kosten der Produktion und des Transports sowie Standortkosten (z.B. fixe Öffnungs- oder Schließungskosten) zusammensetzen können (vgl. Simchi-Levi et al., 2008, S. 80). Alternativ stellt die Maximierung

des Kapitalwertes des Cashflows eine Zielgröße dar (vgl. Fleischmann und Koberstein, 2014). Daneben müssen mehrere Restriktionen, wie die Befriedigung der Kundennachfrage, Budgetvorgaben oder Servicegrade eingehalten werden (vgl. Goetschalckx und Fleischmann, 2010, S. 136).

Infolge der langfristigen Planung besteht eine erhebliche Unsicherheit bezüglich der Nachfrage, Kosten oder Preise (vgl. Fleischmann et al., 2006, S. 198). Als Konsequenz wird die Standortplanung stark aggregiert durchgeführt (vgl. Goetschalckx und Fleischmann, 2010, S. 136). Dadurch sinkt die Unsicherheit und die Datenmengen werden reduziert. Nachteil dieser Vorgehensweise ist allerdings die gleichzeitige Abnahme des Detaillierungsgrades der Informationen. Eine *Aggregation* der Daten ist dabei in mehreren Dimensionen möglich und wird in der folgenden Auflistung verdeutlicht (vgl. Simchi-Levi et al., 2008, S. 82-83; Fleischmann et al., 2010, S. 94).

- Produkt (z.B. Produkte mit ähnlichen Produktionskoeffizienten, Bedarfen oder Rüstzeiten werden zu Produktgruppen aggregiert)
- Ressource (z.B. Betriebsmittel oder Personal werden zu Kapazitätsgruppen aggregiert)
- Zeit (z.B. Planung auf Jahresbasis)
- Kunde (z.B. Kunden, die örtlich in der gleichen Region ansässig sind, werden zu Märkten aggregiert)

Nachdem die zu treffenden Entscheidungen und Aggregationsniveaus bekannt sind stellt sich die Frage in welcher Form und wie oft eine Planung durchgeführt werden muss. Sind die Daten im Zeitablauf relativ konstant (z.B. Nachfrage) reicht meist eine *statische Planung* aus. Treten jedoch Schwankungen oder klare Veränderungen bei den verwendeten Daten im Zeitverlauf auf, so muss eine *dynamische Planung* durchgeführt werden (vgl. Erlenkotter, 1981, S. 133; Domschke und Scholl, 2008, S. 32-33). Da in realen Anwendungen zumeist der dynamische Fall vorliegt, soll diese Planung auch für die vorliegende Arbeit angenommen werden. Grundlegende und aktuelle Forschungsthemen zum Bereich der dynamischen Standortplanung finden sich in der folgenden Literatur: Wesolowsky (1973), Wesolowsky und Truscott (1975), Erlenkotter (1981), Kelly und Marucheck (1984), Daskin et al. (1992), Chardaire et al. (1996), Lim und Kim (1999), Melo et al. (2006), Thanh et al. (2008), Manzini und Gebennini (2008) sowie Torres-Soto und Üster (2011).

Unsichere Daten führen allerdings zu dem Ergebnis, dass eine einmal getroffene Entscheidung nach einer Periode, z.B. einem Jahr erneut überdacht werden muss. Dies geschieht mit Hilfe der *rollierenden Planung* (siehe Abbildung 2.2), welche innerhalb des Planungszeitraumes einen bestimmten Zeitraum als gefrorene Zone ansieht und die Entscheidungen für diesen Zeitraum auch umsetzt. Alle weiteren Perioden werden zwar geplant, aber noch nicht umgesetzt. In der folgenden Periode wird die rollierende Planung

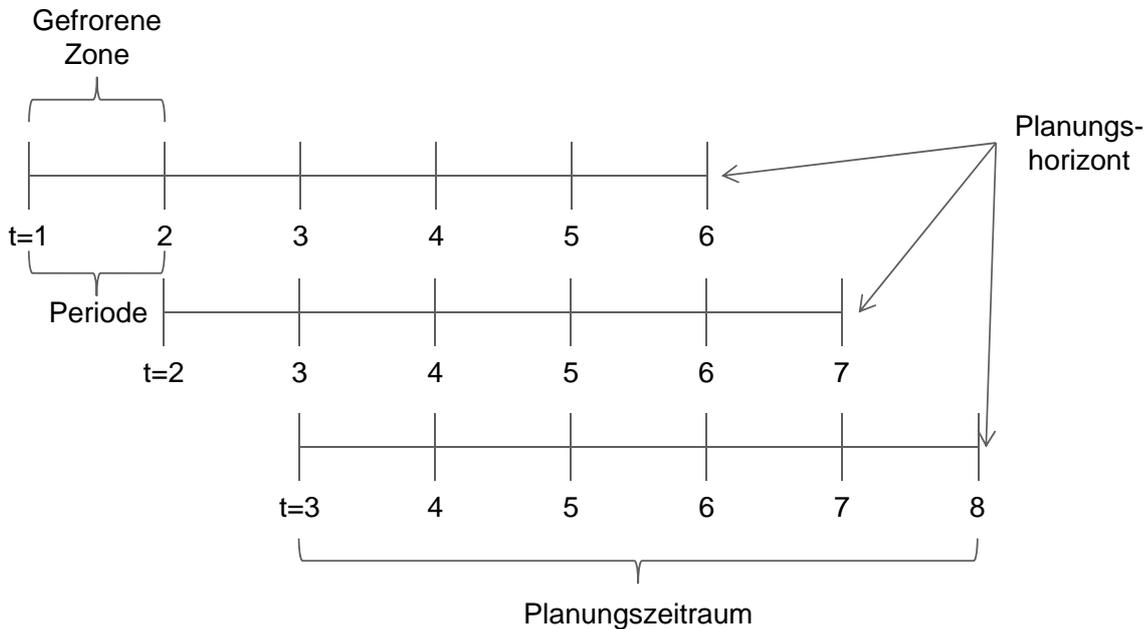


Abbildung 2.2: Rollierende Planung (in Anlehnung an Fleischmann et al., 2010, S. 92)

wiederholt, jedoch mit aktualisierten Prognosewerten und den Ergebnissen der letzten Planung. So können bereits getroffene Entscheidungen durch aktuellere Daten gegebenenfalls revidiert werden (vgl. Fleischmann et al., 2010, S. 92; Stadtler und Fleischmann, 2012, S. 26).

Wie erwähnt werden derartige quantitative Entscheidungssituationen üblicherweise durch mathematische Optimierungsmodelle unterstützt. Einen Überblick über diverse Anwendungsfälle und Modelle im Bereich der Standortplanung findet man bei Owen und Daskin (1998) oder Melo et al. (2009). Als grundlegendes Beispiel für die langfristige Standortplanung soll an dieser Stelle das dynamische, einstufige *Warehouse Location Problem (WLP)* mit beschränkten Kapazitäten (auch als Simple Plant oder Facility Location Problem bezeichnet) dienen (modifiziert übernommen aus Neumann (1996, S. 231)). Hierbei sei angemerkt, dass es sich um ein Mixed Integer Programming (MIP)-Modell handelt, welches neben reellwertigen Variablen auch ganzzahlige bzw. in diesem Fall binäre Variablen beinhaltet. Das Modell ist zudem ein *deterministisches Modell*, also ein Modell, welches eindeutige Ausprägungen der Daten verwendet, die zum Planungszeitpunkt gegeben sind. Liegen hingegen für die Daten Wahrscheinlichkeitsverteilungen vor, handelt es sich um ein stochastisches Modell. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird von deterministischen Modellen ausgegangen. Für das folgende Modell wird das nachstehende Symbolverzeichnis benötigt.

Indizes

s	Standort ($s \in S$)
k	Markt ($k \in K$)
t	Periode ($t = 1 \dots T$)

Daten

cd_{sk}	Transportkosten von Standort s zu Markt k
cy_s	Fixe Kosten für Standort s
d_{kt}	Nachfrage von Markt k in Periode t
k_s	Kapazität von Standort s

Variablen

XD_{skt}	Absatzmenge von Standort s für Markt k in Periode t
Y_{st}	1, wenn Standort s in Periode t geöffnet ist; 0, sonst

Mathematisches Modell

$$\min \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{t=1}^T cd_{sk} XD_{skt} + \sum_{s \in S} \sum_{t=1}^T cy_s Y_{st} \quad (2.1)$$

U.d.N.:

$$\sum_{k \in K} XD_{skt} \leq k_s Y_{st} \quad \forall s \in S, t = 1 \dots T \quad (2.2)$$

$$\sum_{s \in S} XD_{skt} = d_{kt} \quad \forall k \in K, t = 1 \dots T \quad (2.3)$$

$$Y_{st} \in \{0; 1\} \quad \forall s \in S, t = 1 \dots T \quad (2.4)$$

$$XD_{skt} \geq 0 \quad \forall s \in S, k \in K, t = 1 \dots T \quad (2.5)$$

Die Zielfunktion (2.1) minimiert die Transport- und Standortkosten über den gesamten Planungszeitraum. Die Nebenbedingungen (2.2) stellen sicher, dass die gegebene Kapazität eines Standortes durch die Absatzmengen in keiner Periode überschritten werden darf, sobald dieser geöffnet ist. Die Restriktionen (2.3) fordern, dass die Nachfrage eines Marktes in der jeweiligen Periode durch die Summe aller Absatzmengen für diesen Markt gedeckt wird. (2.4) und (2.5) definieren die Binär- bzw. Nichtnegativitätsbedingungen. Das Modell bildet zwar nur einen kleinen Teil der vorab genannten Entscheidungen und Eigenschaften ab, jedoch bauen viele Arbeiten auf dieser Grundform auf. So wird auch

in dieser Arbeit das vorliegende Modell in Kapitel 3 erweitert und zur Koordination mit der mittelfristigen Produktionsplanung verwendet.

Bei der Entscheidungsunterstützung, z.B. durch ein derartiges mathematisches Optimierungsmodell, müssen zusätzlich die langfristigen Investitionen betrachtet werden. Durch die dynamische Planung sollten getätigte Investitionen, beispielsweise beim Eröffnen eines Standortes, durch Einnahmen der weiteren Perioden bis zum Planungshorizont mindestens gedeckt werden, um ein positives Ergebnis zu erhalten. Zur Berücksichtigung von langfristigen alternativen Anlagemöglichkeiten oder Rückzahlungen von Zinsen für getätigte Investitionen bietet sich die Verwendung der *Kapitalwertmethode* an. Dabei wird der Kapitalwert (auch als Barwert oder Present Value bezeichnet) berechnet, welcher die langfristigen Ein- und Auszahlungen mit dem Kapitalzinssatz abzinst (vgl. Kohler, 2008, S. 26-33; Domschke und Scholl, 2008, S. 251-254).

Die Nutzung der Kapitalwertmethode innerhalb des WLPs wird in (2.6) dargestellt, indem die Zielfunktion über den gesamten Planungszeitraum mit dem Kapitalzinssatz abgezinst wird, unter der Prämisse, dass alle Zahlungen zu Periodenbeginn erfolgen.

Daten

z Kapitalzinssatz

Zielfunktion

$$\min \sum_{t=1}^T \left(\sum_{s \in S} \sum_{k \in K} cd_{sk} X D_{skt} + \sum_{s \in S} cy_s Y_{st} \right) (1+z)^{-t-1} \quad (2.6)$$

2.1.3 Mittelfristige Produktionsplanung

Aus den Vorgaben der übergeordneten Standortplanung und mittelfristigen Nachfrage-
daten resultieren die zu treffenden Entscheidungen über das mehrperiodige Produktions-
programm sowie die zugehörige Planung der vorhandenen Kapazitäten und Maßnahmen
zur Kapazitätsanpassung (vgl. z.B. Domschke und Scholl, 2008, S. 109-111; Günther und
Tempelmeier, 2012, S. 169). Insbesondere die detaillierteren Nachfragedaten können da-
zu führen, dass Nachfrageschwankungen auftreten, die eine genauere Planung der Pro-
duktion erfordern um die vorgegebenen Absatzzahlen einzuhalten (vgl. z.B. Rohde und
Wagner, 2010, S. 186; Günther und Tempelmeier, 2012, S. 146). Schneeweiß (2002, S.
143) spricht auch von einer sogenannten Kapazitätsglättung. Die konkreten *Entschei-
dungen* können sich aus den folgenden Punkten zusammensetzen.

- End- und Zwischenprodukte nach Art, Menge und zeitlichem Rahmen
- Zusatzkapazitäten / Überstunden
- Lagerbestände

- Rüstentscheidungen
- Transportmengen zu Distributionszentren
- Fehlmengen

Ziel kann dabei z.B. die Minimierung der Kosten aus Produktion, Lagerung, Transport und Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung (vgl. Rohde und Wagner, 2010, S. 191) oder, wie im weiteren Verlauf angenommen, die Maximierung des Deckungsbeitrages sein, der sich aus der Differenz der Umsatzerlöse und den entstandenen Produktionskosten zusammensetzt (vgl. z.B. Kistner und Steven, 2001, S. 193-198; Schneeweiß, 2002, S. 101). Wie erwähnt, sind die zuvor festgelegten langfristigen Vorgaben der Standortplanung und beispielsweise verfügbare und erweiterbare Kapazitäten sowie detaillierte Nachfragedaten zu beachten.

Eine wichtige Eigenschaft der mittelfristigen Produktionsplanung stellt das *niedrigere Aggregationsniveau* im Gegensatz zur langfristigen Planung dar. Die Vorgaben der Standortplanung müssen eingehalten werden, allerdings können die dafür verfügbaren Daten je nach Anwendungsfall in den Dimensionen Produkt, Ressource, Zeit und Kunde disaggregiert werden. Die Dimension Produkt kann beispielsweise von stark aggregierten Produktgruppen (langfristige Planung) über weniger aggregierte Produktfamilien (mittelfristige Planung) auf einzelne Produkte (kurzfristige Planung) disaggregiert werden (vgl. z.B. Hax und Meal, 1975). Für die vorliegende Arbeit sollen allerdings auf der langfristigen Planungsebene Produktgruppen und auf der mittelfristigen Planungsebene Produkte betrachtet werden. Die Aggregation der Dimensionen Ressource und Kunde ist ebenfalls vom Praxisfall abhängig, entspricht in diesem Fall aber weiterhin dem Aggregationsniveau der langfristigen Planung (Kapazitäten von Engpassmaschinen und Märkte). Für die verbleibende Dimension Zeit wird mittelfristig üblicherweise eine Periodenlänge von einer Woche oder, wie im weiteren Verlauf, einem Monat gewählt und der Planungshorizont beträgt zwölf Monate (vgl. z.B. Schneeweiß, 2002, S. 23; Rohde und Wagner, 2010, S. 188-189). Wichtig ist hierbei, dass der Planungszeitraum mindestens ein Mal einen Saisonzyklus abbildet, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten (vgl. Kistner und Steven, 2001, S. 192; Rohde und Wagner, 2010, S. 185).

Auch auf dieser Planungsebene können mathematische Optimierungsmodelle zur Unterstützung der Entscheidungsfindung zum Einsatz kommen. Als einfaches Beispiel soll das deterministische Modell der PPP mit Lagerhaltung und Losgrößen von Kistner und Steven (2001, S. 192-198) dienen, welches ebenfalls eine MIP-Modell ist. Es werden jedoch folgende Modifizierungen vorgenommen:

- Keine Berücksichtigung von Rohstoffen und Zwischenprodukten
- Nur eine Engpassmaschine, deshalb kein Index für verschiedene Maschinen
- Ein Rüstvorgang für ein Produkt findet höchstens einmal pro Periode statt

- Rüstentscheidung je Produkt statt Maschine

Für das abgewandelte Modell wird das folgende Symbolverzeichnis genutzt.

Indizes

i	Produkt ($i \in I$)
t	Periode ($t = 1 \dots T$)

Daten

a_i	Produktionskoeffizient für Produkt i
cl_i	Lagerkostensatz von Produkt i
cr_i	Rüstkosten für Produkt i
d_{it}	Nachfrage für Produkt i in Periode t
db_{it}	Deckungsbeitrag von Produkt i in Periode t
$dmin_{it}$	Mindestabsatzmenge für Produkt i in Periode t
k_t	Kapazität in Periode t
$L_{i,t=0}$	Lageranfangsbestand von Produkt i in Periode $t = 0$
$L_{i,T}$	Lagerendbestand von Produkt i in Periode $t = T$
M	Hinreichend große Zahl
ra_i	Rüstzeit von Produkt i

Variablen

L_{it}	Lagerbestand von Produkt i am Ende der Periode t
R_{it}	1, wenn für Produkt i in Periode t gerüstet wird; 0, sonst
X_{it}	Produktionsmenge von Produkt i in Periode t
XD_{it}	Absatzmenge von Produkt i in Periode t

Mathematisches Modell

$$\max \sum_{i \in I} \sum_{t=1}^T (db_{it}XD_{it} - cl_iL_{it} - cr_iR_{it}) \quad (2.7)$$

U.d.N.:

$$\sum_{i \in I} (a_iX_{it} + ra_iR_{it}) \leq k_t \quad \forall t = 1 \dots T \quad (2.8)$$

$$dmin_{it} \leq XD_{it} \leq d_{it} \quad \forall i \in I, t = 1 \dots T \quad (2.9)$$

$$L_{it} = L_{i,t-1} + X_{it} - XD_{it} \quad \forall i \in I, t = 1 \dots T \quad (2.10)$$

$$X_{it} \leq MR_{it} \quad \forall i \in I, t = 1 \dots T \quad (2.11)$$

$$L_{it}, X_{it}, XD_{it} \geq 0 \quad \forall i \in I, t = 1 \dots T \quad (2.12)$$

$$R_{it} \in \{0; 1\} \quad \forall i \in I, t = 1 \dots T \quad (2.13)$$

Als Ziel wird in (2.7) die Differenz aus dem Deckungsbeitrag und den Lager- und Rüstkosten maximiert. Die Nebenbedingungen (2.8) stellen sicher, dass die Kapazität durch die Kapazitätsbedarfe der produzierten Mengen und den zugehörigen Rüstzeiten nicht überschritten wird. Eine vollständige Befriedigung der Nachfrage ist nicht zwingend erforderlich, jedoch dürfen die Absatzmengen eine gewisse Mindestgrenze nicht unterschreiten. Diese Restriktion wird durch (2.9) eingehalten. (2.10) stellen die Lagerbilanzgleichungen dar, welche bewirken, dass sich der aktuelle Lagerbestand aus dem Lagerbestand der letzten Periode und den Produktionsmengen der aktuellen Periode abzüglich der Absatzmengen der aktuellen Periode zusammensetzt. Die Rüstbedingungen (2.11) setzen die Rüstvariable R_{it} auf 1 sobald in einer Periode die Produktionsmenge von Produkt i größer als 0 ist. Die Restriktionen (2.12) und (2.13) stellen die Nichtnegativitäts- bzw. Binärbedingungen dar.

2.2 Formalisierung der hierarchischen Planung nach Schneeweiß

Die Lösung eines Gesamtmodells (auch Simultanmodell genannt) mit allen Aufgaben des SCM wäre wünschenswert und stellte die Optimallösung dar, ist durch die Komplexität und Größe eines derartigen Modells sowie die organisatorische Struktur jedoch nicht möglich (vgl. z.B. Kistner und Steven, 2001, S. 209). Die Konsequenz daraus ist die beschriebene Aufteilung der Planung in verschiedene Planungsebenen und Bereiche innerhalb der SC. Allerdings müssen die einzelnen Planungsaufgaben dann so miteinander verknüpft werden, dass deren Lösungen der Lösung einer Gesamtplanung möglichst nahe kommen und wichtige Abhängigkeiten zwischen den Planungsebenen berücksichtigt werden. An diesem Punkt setzt das Konzept der *HP* an, mit dem Ziel, die Koordination zwischen Planungsebenen zu verbessern.

Die erste Entwicklung eines hierarchischen Planungskonzeptes stammt aus der Produktionsplanung und wurde von Hax und Meal (1975) veröffentlicht. In ihrem Konzept der *Hierarchische Produktionsplanung (HPP)* wird die gesamte Produktionsplanung auf mehrere Planungsebenen aufgeteilt und die so erstellten isolierten Modelle über vordefinierte Schnittstellen koordiniert. Weitere grundlegende Arbeiten dazu liefern beispielsweise Bitran und Hax (1977), Bitran et al. (1981) sowie Bitran et al. (1982), welche ein hierarchisches Produktionsplanungssystem bei einem Reifenhersteller beschreiben. In der

Folgezeit wurde das Konzept mehrfach aufgegriffen und weiterentwickelt. So beschäftigen sich Dempster et al. (1981) mit der Entwicklung einer Methode, die die Ergebnisse hierarchischer Planungssysteme evaluiert. Einen Lösungsansatz für ein gemischt-ganzzahliges Problem der HPP, der auf der Technik der Lagrange Relaxation basiert, stellt Graves (1982) vor. Axsäter und Jönsson (1984) beschreiben die Aggregation und Disaggregation in der HPP eines schwedischen Industrieunternehmens. Eine besonders umfangreiche Analyse über hierarchische Produktionsplanungssysteme findet man bei Stadtler (1988), der insbesondere die HPP bei losweiser Fertigung untersucht. Dazu analysiert der Autor 17 Systeme der HPP, welche die taktische und operative Produktionsplanung berücksichtigen. Darauf basierend entwickelt Stadtler ein Konzept zur HPP, das durch den Einsatz von effektiven Losgrößenbedarfen in der aggregierten Produktionsplanung, eine genauere Planung und Abschätzung der Loslagerbestände an den Periodengrenzen ermöglicht. De Kok (1990) erläutert die Anwendung der HPP in der Konsumgüterindustrie. Kistner und Steven (1991) stellen dar, wie der Einsatz der HPP auch das Operations Research allgemein unterstützt und zeigen Eigenschaften sowie Anwendungsgebiete auf, die viele klassische Modelle des Operations Research auf den Planungsebenen der HPP einsetzbar machen. Den praktischen Einsatz der HPP in der Möbelindustrie zeigen Lario Esteban et al. (1994). Steven (1994) zeigt mit ihrer Dissertation, welche später als Lehrbuch neu aufgelegt wurde, eine allgemeine Übersicht zur HPP, welche auf verschiedene theoretische und praktische Anwendungen eingeht.

Um das Konzept der HPP auch auf andere Fälle anwendbar zu machen, entwickelte Schneeweiß in mehreren Arbeiten (Schneeweiß und Schröder (1992), Schneeweiß (1994), Schneeweiß (1995), Söhner und Schneeweiß (1995), Schneeweiß (1998), Eichin und Schneeweiß (2001), Schneeweiß (2003a), Schneeweiß (2003b) sowie Schneeweiß und Zimmer (2004)) das allgemeine Konzept der HP, welches zwei Planungsebenen und deren spezielle Koordination betrachtet. Das Konzept wird im folgenden Abschnitt genauer beschrieben und soll im weiteren Verlauf der Arbeit als Basis zur Darstellung neu entwickelter hierarchischer Koordinationsformen dienen. Die Beschreibungen orientieren sich dabei größtenteils am Werk von Schneeweiß (2003b), worin die entwickelten Ansätze ausführlich zusammengefasst werden.

2.2.1 Klassifikation des Planungssystems

Um die Koordination durch eine HP gezielt zu unterstützen, unterscheidet Schneeweiß zwischen konstruierten und organisatorischen Planungssystemen (vgl. Schneeweiß, 2003b, S. 7). Je nach Typ des Planungssystems werden unterschiedliche Annahmen getroffen, welche in der späteren Umsetzung einer HP beachtet werden müssen.

Konstruierte Planungssysteme

Konstruierte Planungssysteme beschreiben Systeme, bei denen zumeist aufgrund von komplexen Planungssituationen eine Hierarchie konstruiert wird. Das kann beispielsweise

se die Aufteilung in eine vereinfachte und detaillierte Planungsebene sein, wobei die Lösung der vereinfachten Planungsebene eine Vorgabe für die weiteren Entscheidungen der detaillierten Planungsebene sein kann (vgl. Schneeweiß, 2003b, S. 11).

Generell herrscht ein *symmetrischer Informationsstatus* auf allen Planungsebenen. Dies ist begründet in der Tatsache, dass nur *ein Entscheidungsträger* zu *einem Zeitpunkt* die Planungen ausführt und eine Entscheidung zu treffen hat. Dabei kann die Anzahl an konstruierten Planungsebenen variieren (vgl. Schneeweiß, 2003b, S. 7).

Organisatorische Planungssysteme

Organisatorische Planungssysteme orientieren sich an den vorhandenen Strukturen in Unternehmen. Das unterstreicht auch die SCP Matrix. Unterschiedliche Planungsaufgaben auf verschiedenen Planungsebenen führen zu separaten Abteilungen in einem Unternehmen, die miteinander koordiniert werden müssen (vgl. Schneeweiß, 2003b, S. 11-13).

Daraus folgt, dass *mehrere Entscheidungsträger* zu *unterschiedlichen Zeitpunkten* Entscheidungen treffen. Das führt zu einem *asymmetrischen Informationsstatus* der Planungsebenen. Informationen sind nur auf den einzelnen Planungsebenen vorhanden und die unterschiedlichen Planungszeitpunkte führen zu verschiedenen Informationsstatus auf den jeweiligen Planungsebenen (vgl. Schneeweiß, 2003b, S. 8-9).

Sowohl konstruierte als auch organisatorische Planungssysteme gelten als konfliktfreie Planungssysteme, bei denen meist eine Team-basierte Ansicht vorherrscht, wie beispielsweise bei Zusammenarbeit einzelner Planungsabteilungen innerhalb eines Unternehmens. Schneeweiß definiert zwei weitere Klassen von Planungssystemen als koordinative und Prinzipal Agenten Planungssysteme, welche eine Nicht-Team-basierte Ansicht teilen und somit für den vorliegenden Fall nicht relevant sind (vgl. Schneeweiß, 2003b, S. 31).

2.2.2 Hierarchische Planungsstruktur

Die Struktur des hierarchischen Planungssystems nach Schneeweiß besitzt, der Einfachheit halber, zwei Planungsebenen, die vertikal angeordnet sind. Dies stellt Abbildung 2.3 dar. Weitere Planungsebenen sind sowohl vertikal als auch horizontal denkbar.

Das Planungssystem beinhaltet eine übergeordnete Planungsebene als *Top-Ebene* und eine untergeordnete Planungsebene als *Basis-Ebene*. Zusätzlich bindet die Top-Ebene eine *antizipierte Basis-Ebene* in ihre Entscheidungen ein. Top-Ebene und Basis-Ebene werden durch eine *Instruktion* von der Top- an die Basis-Ebene und eine *Reaktion* von der Basis- an die Top-Ebene verknüpft. Die Planung kann iterativ mit beiden Planungsebenen durchgeführt werden, bis eine hinreichend gute Lösung gefunden wird, die anschließend im Objektsystem implementiert wird. Das Objektsystem gibt nach der Umsetzung ein ex post Feedback an das Planungssystem zurück, das beispielsweise eine erneute HP im Sinne der rollierenden Planung auslöst.

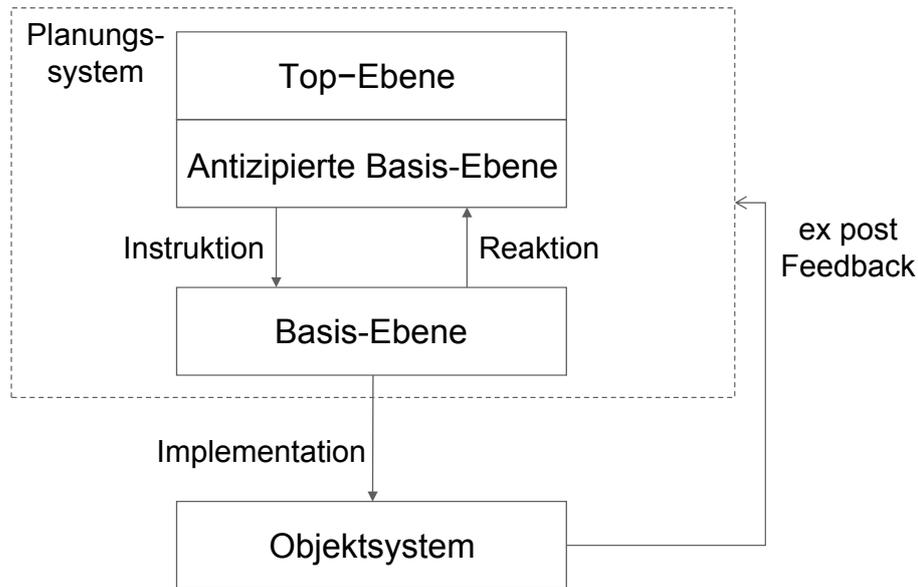


Abbildung 2.3: Hierarchische Planungsstruktur
(in Anlehnung an Schneeweiß, 2003b, S. 17)

Antizipation

Die Top-Ebene berücksichtigt bei der Entscheidungsfindung eine antizipierte Basis-Ebene. Damit sollen wichtige Aspekte der Basis-Ebene abgebildet und Auswirkungen der Entscheidungen der Top-Ebene auf die Basis-Ebene dadurch abgeschätzt werden. Beispielsweise ist es so mitunter möglich, unzulässige Lösungen direkt auszuschließen. Zudem wird die Top-Ebene durch die Antizipation dahingehend beeinflusst, eine Entscheidung zu fällen, die eine bessere Lösung für das gesamte System darstellt. Die Antizipation kann somit als Einfluss der Basis-Ebene vor der Instruktion gesehen werden (Feedforward-Einfluss der Basis-Ebene) (vgl. Schneeweiß, 2003b, S. 17-18).

Instruktion

Als Instruktion wird die Übergabe der Entscheidungen der Top-Ebene an die Basis-Ebene bezeichnet. Nachdem die Top-Ebene unter Berücksichtigung der antizipierten Basis-Ebene eine optimale Entscheidung gefällt hat, werden die für die reale Basis-Ebene wichtigen Informationen als Instruktion weitergegeben (vgl. Schneeweiß, 2003b, S. 18).

Reaktion

Nachdem die Basis-Ebene die Instruktion erhalten hat, fällt sie selbst eine Entscheidung und gibt diese als Reaktion meist in aggregierter Form an die Top-Ebene zurück, falls im Planungssystem eine Reaktion vorgesehen ist. Dies ist im Falle einer strikten Top-Down

Planung beispielsweise nicht der Fall, da dort nur Instruktionen existieren. Die Reaktion beschreibt die Auswirkungen der Instruktion der Top-Ebene auf die Basis-Ebene (Feedback-Einfluss der Basis-Ebene) (vgl. Schneeweiß, 2003b, S. 18).

2.2.3 Koordination und formales Modell

Zur Formalisierung der vorgestellten Bestandteile der HP hat Schneeweiß ein Modell aufgestellt, welches sowohl die Entscheidungsmodelle der Top- und Basis-Ebene als auch die Instruktion, Reaktion und Antizipation definiert (vgl. Schneeweiß, 2003b, S. 32-34). Die Antizipation wird in Abschnitt 2.2.4 genauer erläutert, da sie in dieser Arbeit besonders betrachtet wird.

Top-Ebene und Basis-Ebene

$$M^T = M^T(C^T, A^T, I^T) \quad (2.14)$$

$$C^T = C^T[C^{TT}(a^T), C^{TB}(AF(IN))] \quad (2.15)$$

$$M^B = M^B(C^B, A^B, I^B) \quad (2.16)$$

$$\widehat{M}^B = \widehat{M}^B(\widehat{C}^B, \widehat{A}^B, \widehat{I}^B) \quad (2.17)$$

Das Modell der Top-Ebene M^T wird in (2.14) beschrieben. Es besteht aus der Zielsetzung C^T , dem Entscheidungsfeld A^T und dem Informationsstatus I^T der Top-Ebene. In Verbindung mit mathematischen Modellen lassen sich die Zielsetzung mit der Zielfunktion und das Entscheidungsfeld mit den Nebenbedingungen eines mathematischen Modells gleichsetzen (vgl. Schneeweiß, 2003b, S. 32-33).

Schneeweiß fügt dem Informationsstatus im allgemeinen Fall einen Zeitindex hinzu, mit dem Hintergrund, dass bei einigen Planungssituationen die Entscheidungen der Top-Ebene zum Zeitpunkt $t = 0$ getroffen werden, die Entscheidungen der Basis-Ebene aber verzögert im Zeitpunkt $t = 1$ stattfinden. Dadurch entstehen unterschiedliche Informationsstatus, die nicht nur durch die verschiedenen Aggregationsniveaus der Planungsebenen (I^T bzw. I^B), sondern auch durch die abweichenden Zeitpunkte bedingt sind. Somit wählt Schneeweiß die Informationsstatus mit $I_{i=0}^T$ bzw. $I_{i=1}^B$ (vgl. Schneeweiß, 2003b, S. 28 und 33). Da im weiteren Verlauf allerdings ein iterativer Planungsansatz entwickelt wird, werden beide Planungsebenen zum gleichen Zeitpunkt gelöst und weisen damit den gleichen Informationsstatus bezüglich des Zeitpunktes auf. Schneeweiß betrachtet diese Situation im Rahmen eines Beispiels der symmetrischen Koordination durch Verhandlungen ebenfalls und bildet den Informationsstatus unabhängig von einem Zeitpunkt (vgl. Schneeweiß, 2003a, S. 245). Folglich wird für den Informationsstatus nur der Unterschied bezüglich der Aggregationsniveaus der Planungsebenen betrachtet (I^T bzw. I^B).

Die Zielsetzung der Top-Ebene C^T wird in (2.15) nochmals konkretisiert und setzt sich aus zwei Bestandteilen zusammen. Der erste Teil wird durch das *private Kriterium* $C^{TT}(a^T)$ gebildet, welches die Teile der Zielsetzung beinhaltet, die sich nur auf die Top-Ebene beziehen und von der Entscheidung der Top-Ebene a^T abhängen. Das *Top-Down Kriterium* $C^{TB}(AF(IN))$ beinhaltet die Zielsetzung der antizipierten Basis-Ebene und ist abhängig von der Antizipationsfunktion der Basis-Ebene $AF(IN)$ (vgl. Schneeweiß, 2003b, S. 33-34).

Wie in der Top-Ebene auch, so setzt sich das Modell der Basis-Ebene M^B aus der Zielsetzung C^B , dem Entscheidungsfeld A^B und dem Informationsstatus I^B der Basis-Ebene zusammen (siehe (2.16)) (vgl. Schneeweiß, 2003b, S. 32-33).

Da das Modell der Basis-Ebene in der Top-Ebene antizipiert werden soll, beschreibt (2.17) ein antizipiertes Modell der Basis-Ebene \widehat{M}^B . Die antizipierten Versionen der Zielsetzung \widehat{C}^B , des Entscheidungsfeldes \widehat{A}^B und des Informationsstatus \widehat{I}^B stellen das Modell dar und werden mit einem „ $\widehat{}$ “ als „antizipiert“ gekennzeichnet. Hierbei ist jedoch festzuhalten, dass mit dieser formalen Darstellung nicht festgelegt ist, inwieweit das antizipierte Modell dem tatsächlichen Modell der Basis-Ebene entspricht. Dies kann beispielsweise nur einzelne Bestandteile umfassen oder bis zum exakt gleichen Modell reichen (vgl. Schneeweiß, 2003b, S. 33).

Instruktion und Reaktion

Um eine Koordination zu ermöglichen, müssen die Planungsebenen miteinander verknüpft werden. Das wird durch die Instruktion und Reaktion realisiert (vgl. Schneeweiß, 2003b, S. 37).

$$a^{T*} = \arg \operatorname{opt}_{a^T \in A^T} E\{C^T[C^{TT}(a^T), C^{TB}(AF(IN))]|I^T\} \quad (2.18)$$

$$IN^* = IN(a^{T*}) \quad (2.19)$$

$$a^{B*} = \arg \operatorname{opt}_{a^B \in A_{IN^*}^B} E\{C_{IN^*}^B(a^B)|I_{IN^*}^B\} \quad (2.20)$$

$$RE^* = RE(a^{B*}) \quad (2.21)$$

Wie erläutert, muss die Top-Ebene zunächst eine Entscheidung fällen, um diese als Instruktion an die Basis-Ebene weiterzugeben. (2.18) beschreibt die optimale Entscheidung der Top-Ebene a^{T*} , die sowohl das private Kriterium der Top-Ebene $C^{TT}(a^T)$ als auch die Zielsetzung des Top-Down Kriteriums $C^{TB}(AF(IN))$ optimiert und dabei den aktuellen Informationsstatus I^T sowie das Entscheidungsfeld A^T berücksichtigt. Die optimale Entscheidung a^{T*} wird anschließend in die optimale Instruktion IN^* transformiert und an die Basis-Ebene weitergegeben (siehe (2.19)) (vgl. Schneeweiß, 2003b, S. 34-37).

Die Basis-Ebene wiederum nutzt die optimale Instruktion IN^* um ihre eigene Entscheidung zu treffen. Dabei beeinflusst die Instruktion die Zielsetzung $C_{IN^*}^B$, das Entscheidungsfeld $A_{IN^*}^B$ und den Informationsstatus $I_{IN^*}^B$. Die Basis-Ebene optimiert die Zielsetzung der Basis-Ebene $C_{IN^*}^B(a^B)$ anschließend unter der Berücksichtigung des Entscheidungsfeldes $A_{IN^*}^B$ und des Informationsstatus $I_{IN^*}^B$ der Basis-Ebene und liefert die optimale Entscheidung der Basis-Ebene a^{B*} (siehe (2.20)) (vgl. Schneeweiß, 2003b, S. 34-37). Die getroffene Entscheidung führt danach zur optimalen Reaktion RE^* und wird an die Top-Ebene zurückgegeben (siehe (2.21)).

2.2.4 Antizipation

Der letzte Bestandteil der HP ist die Antizipation. Sie soll die Entscheidungen der Basis-Ebene schon auf der Top-Ebene so abschätzen, dass die Top-Ebene eine bessere Entscheidung hinsichtlich des gesamten Systems fällt.

$$AF(IN) = \hat{a}^{B*} = \arg \underset{\hat{a}^B \in \hat{A}_{IN}^B}{\text{opt}} E\{\hat{C}_{IN}^B(\hat{a}^B) | \hat{I}_{IN}^B\} \quad (2.22)$$

(2.22) stellt die formale Darstellung der Antizipationsfunktion $AF(IN)$ dar. Diese basiert auf dem vorgestellten antizipierten Modell der Basis-Ebene weshalb die optimale Entscheidung der Antizipationsfunktion der antizipierten optimalen Entscheidung der Basis-Ebene \hat{a}^{B*} entspricht. Als wichtiger Inputfaktor für die Antizipationsfunktion gilt die Instruktion der Top-Ebene IN . Die Instruktion wird innerhalb der Planung der Top-Ebene als vorläufige Entscheidung an die Antizipationsfunktion übergeben, um damit die Zielsetzung, das Entscheidungsfeld und den Informationsstatus der antizipierten Basis-Ebene zu beeinflussen. Die antizipierte Basis-Ebene optimiert letztendlich die antizipierte Zielsetzung $\hat{C}_{IN}^B(\hat{a}^B)$ unter Berücksichtigung des antizipierten Entscheidungsfeldes \hat{A}_{IN}^B sowie antizipierten Informationsstatus \hat{I}_{IN}^B und erhält die optimale Entscheidung \hat{a}^{B*} (vgl. Schneeweiß, 2003b, S. 35).

Da die rein formale Darstellung der Antizipationsfunktion nichts darüber aussagt, inwieweit die Antizipation das tatsächliche Modell der Basis-Ebene abbildet, hat Schneeweiß vier Typen der Antizipation definiert, welche das Modell der Basis-Ebene unterschiedlich stark abbilden. Grundsätzlich wird zwischen einer reaktiven und nicht-reaktiven Antizipation unterschieden. Eine reaktive Antizipation berücksichtigt die Auswirkungen der Entscheidung der Top-Ebene auf die Basis-Ebene innerhalb der Planung der Top-Ebene, die nicht-reaktive Antizipation beachtet derartige Auswirkungen demnach nicht (vgl. Schneeweiß, 2003b, S. 41-42).

Explizit exakt reaktive Antizipation (perfekte Antizipation)

Die explizit exakt reaktive Antizipation bildet die Basis-Ebene exakt ab. Explizit bedeutet in diesem Fall, dass sowohl die Zielsetzung als auch das Entscheidungsfeld der Basis-Ebene durch die Antizipationsfunktion vollständig abgebildet werden (\hat{C}_{IN}^B bzw.

\hat{A}_{IN}^B). Zudem steht der Informationsstatus der Basis-Ebene eins-zu-eins zur Verfügung. Durch die exakte Übernahme der Basis-Ebene wird auch von einer perfekten Antizipation gesprochen, wobei die Umsetzung der perfekten Antizipation zu einem Simultanmodell der Top- und Basis-Ebene führt (vgl. Schneeweiß, 2003b, S. 42-43).

Explizit approximiert reaktive Antizipation

Eine geringere Antizipation der Basis-Ebene stellt die explizit approximiert reaktive Antizipation dar. Es werden weiterhin Zielsetzung und Entscheidungsfeld sowie Informationsstatus der Basis-Ebene in der Antizipationsfunktion abgebildet, jedoch in approximierter Art. Beispielsweise könnte eine explizit approximiert reaktive Antizipationsfunktion ein deterministisches Modell mit Erwartungswerten darstellen, wenn auf der Basis-Ebene ein stochastisches Modell vorliegt (vgl. Schneeweiß, 2003b, S. 43).

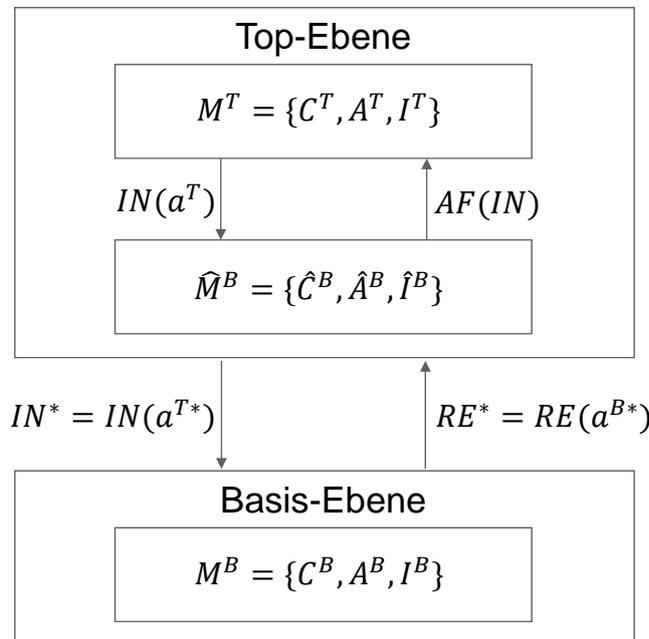


Abbildung 2.4: Hierarchisches Planungssystem nach Schneeweiß
(in Anlehnung an Schneeweiß, 2003b, S. 27 und 34)

Implizit reaktive Antizipation

Die implizit reaktive Antizipation berücksichtigt weiterhin eine Antizipationsfunktion, jedoch nur noch in geringem Umfang. Während bei den expliziten Antizipationen versucht wird, die Basis-Ebene möglichst genau wiederzugeben, berücksichtigt die implizite Antizipation nur einige Bestandteile der Basis-Ebene, die beispielsweise verhindern, dass die Top-Ebene eine, für die Basis-Ebene, unzulässige Entscheidung gene-

riert. Dementsprechend kann nicht mehr von einer Beschreibung der möglichen Reaktion der Basis-Ebene durch die Antizipationsfunktion gesprochen werden ($AF(IN) \neq \hat{a}^{B*}$). Die implizite Antizipation beeinflusst vielmehr das Entscheidungsfeld der Top-Ebene ($A^T = A_{AF(IN)}^T$) und nicht mehr die Zielsetzung ($C^T = C^{TT}$) (vgl. Schneeweiß, 2003b, S. 43-44; Volling, 2009, S. 158).

Nicht-reaktive Antizipation

Als nicht-reaktive Antizipation wird der Fall bezeichnet, bei dem keine Antizipationsfunktion mehr existiert. Die Top-Ebene fällt eine Entscheidung ohne Antizipation und gibt diese weiter an die Basis-Ebene. Allerdings können grundlegende Eigenschaften der Basis-Ebene in der Zielsetzung C^T und dem Entscheidungsfeld A^T der Top-Ebene berücksichtigt werden. Dies wären beispielsweise aggregierte Daten der Basis-Ebene, die im Zuge einer iterativen Planung aktualisiert werden (vgl. Schneeweiß, 2003b, S. 41-42).

Abbildung 2.4 stellt die zuvor erläuterten Bestandteile der HP als hierarchisches Planungssystem mit den zugehörigen formalen Modellen und Verbindungen dar.

2.2.5 Aggregation und Disaggregation

Das hierarchische Planungskonzept nach Schneeweiß bietet nun die Möglichkeit mehrere Planungsebenen zu koordinieren. Sollten die betrachteten Planungsebenen unterschiedliche Aggregationsniveaus aufweisen, wird dies durch die unterschiedlichen Informationsstatus I^T und I^B berücksichtigt, welche aber nur den formalen Unterschied der Aggregationsniveaus beider Planungsebenen und eventuell asymmetrische Informationen beschreiben. Insbesondere Instruktion und Reaktion müssen die zu übermittelnden Informationen im richtigen Aggregationszustand an die Basis- bzw. Top-Ebene übergeben, damit eine Koordination reibungslos funktioniert. Deshalb werden in diesem Abschnitt Vorgehensweisen zur Aggregation und Disaggregation vorgestellt, die eine möglichst genaue und fehlerarme Verwendung der Informationen für die jeweiligen Planungsebenen ermöglichen.

Grundlegende Arbeiten zum Thema der Aggregation und Disaggregation in Verbindung mit mathematischen Modellen wurden beispielsweise von Zipkin (1978) sowie Axsäter et al. (Axsäter (1979), Axsäter (1981), Axsäter et al. (1983) sowie Axsäter und Jönsson (1984)) erstellt. Die nachfolgenden Erläuterungen zum Thema der Aggregation und Disaggregation orientieren sich größtenteils an den Arbeiten von Switalski (1988), Steven (1994) sowie Leisten (1996), welche die Forschungen von Zipkin und Axsäter et al. jedoch beinhalten.

Das hier vorliegende hierarchische Planungssystem plant auf der übergeordneten Planungsebene zumeist mit aggregierten Daten. Das erfordert, dass detaillierte Daten der untergeordneten Planungsebene sinnvoll aggregiert werden müssen.

Die bestmögliche Variante der Aggregation wird als *perfekte Aggregation* bezeichnet. Werden detaillierte Daten aggregiert, Planungen für die aggregierten Daten durchgeführt und die optimalen Ergebnisse anschließend so disaggregiert, wie sie zuvor aggregiert wurden, so würden, im Sinne der perfekten Aggregation, die disaggregierten Ergebnisse den optimalen Ergebnissen einer detaillierten Planung genau entsprechen. Da ein solcher Fall in der Regel nicht existiert, müssen andere Verfahren zur Aggregation und Disaggregation verwendet werden (vgl. Switalski, 1988, S. 385).

Switalski (1988, vgl. S. 383-391) bzw. Steven (1994, vgl. S. 43-55) schlägt drei mögliche Aggregationskonzepte vor, die insbesondere für die HPP nützlich sind.

Approximative Aggregation

Die approximative Aggregation bildet die perfekte Aggregation weitestmöglich nach. Weil eine perfekte Aggregation in der Regel nicht umsetzbar ist, wird in diesem Fall angestrebt, die disaggregierten Ergebnisse der aggregierten Planung und die Ergebnisse der detaillierten Planung im Mittel in Übereinstimmung zu bringen (vgl. Switalski, 1988, S. 385-387; Steven, 1994, S. 46). Axsäter et al. (1983, vgl. S. 121-123) erstellen beispielsweise einen Ansatz, der die quadratische Abweichung der Ergebnisse minimiert. Problematisch ist jedoch, dass bei der Wahl dieser Aggregation eine passende Funktion zur Disaggregation gegeben sein muss, welche sich nicht immer aus einer Funktion zur Aggregation ableiten lässt (vgl. Switalski, 1988, S. 387; Steven, 1994, S. 46).

LP-Aggregation

Einen anderen Ansatz beschreibt die LP-Aggregation. Zur besseren Handhabbarkeit und zur Komplexitätsvermeidung verwendet die übergeordnete Planungsebene meist aggregierte Daten für Produkt- oder Maschinengruppen und für umfassendere Planungsperioden. Diese müssen vorab als Gruppen für die Aggregation gebildet werden. Zur Aggregation der detaillierten Daten ist je Gruppe anschließend festzulegen, welche detaillierten Werte in welchem Maße in die aggregierten Werte eingehen. Steven macht dazu die folgenden drei Vorschläge (vgl. Switalski, 1988, S. 387-389; Steven, 1994, S. 47-49):

Die *Projektion* wählt einen Repräsentanten aus der Gruppe aller detaillierten Werte. Dieser Wert kann beispielsweise ein Minimum oder Maximum der Gruppe sein und wird als aggregierter Wert übernommen. Mit einer Projektion ist in vielen Fällen jedoch ein hoher Informationsverlust verbunden.

Als *Addition* wird die Aufsummierung bzw. die Gleichgewichtung der Werte einer Gruppe bezeichnet. Die Addition stellt somit eine sehr einfache Variante dar, um detaillierte Daten einer Gruppe zu aggregieren.

Eine Konvexkombination der detaillierten Werte wird mit der *Gewichtung* erreicht. Dabei geht jeder Wert mit einem eigenen Gewicht in den aggregierten Wert ein. Anhand welcher Informationen und mit welcher Methode eine Gewichtung vollzogen wird, zeigt Leisten (1996, vgl. S. 119-126) auf. Die *Gewichtung anhand des relativen Variablenwertes* verwendet zur Berechnung der Gewichtung eines detaillierten Wertes einen

zugehörigen Variablenwert. Die Relation des Variablenwertes zur Summe der Variablenwerte der Gruppe bestimmt die Gewichtung für den detaillierten Wert. Als Beispiel kann die Aggregation eines Produktionskoeffizienten (a_i) angenommen werden, der detailliert für jedes Produkt i besteht und im aggregierten Zustand für eine Produktgruppe p (a_p) gelten soll. Die Gewichtung der Produktionskoeffizienten je Produkt der Produktgruppe kann anhand der Produktionsmenge der einzelnen Produkte (X_i) vorgenommen werden. Der Anteil eines Produktes an der gesamten Produktionsmenge der Produktgruppe ($\sum_{i \in PG_p} X_i$) ist auch gleichzeitig die Gewichtung des Produktionskoeffizienten des Produktes ($g_i = \frac{X_i}{\sum_{i \in PG_p} X_i}$). Leisten weist darauf hin, dass die Gefahr einer 0 im Nenner besteht, also in dem genannten Beispiel überhaupt keine Produktion für die Produktgruppe stattgefunden hat. In solch einem Fall bietet sich eine Gleichgewichtung an (vgl. Leisten, 1996, S. 120-121).

Als weitere Gewichtungsmethoden stellt der Autor die *Gewichtung mittels gewichtsorientierter Gradienten* und *Gewichtung mittels variablenorientierter Gradienten* vor, die neue Gewichte mit Subgradientenansätzen berechnen und dabei bisherige Gewichte einbeziehen. Da die beiden letztgenannten Ansätze im weiteren Verlauf der Arbeit allerdings nicht angewandt werden, sei auf weitere Ausführungen bei Leisten (1996, S. 121-126) verwiesen.

Heuristische Aggregation

Das letzte Aggregationskonzept stellt die heuristische Aggregation dar. In einigen Fällen, insbesondere bei veröffentlichten Fallstudien zur HPP, lässt sich kein formalisierbares Vorgehen zur Aggregation angeben. Je nach Problemstellung wird eine fallspezifische Aggregation anhand von verschiedenen Ansatzpunkten durchgeführt. Weitere Ausführungen finden sich bei Switalski (1988, vgl. S. 389-390).

Nachdem die Aggregation beschrieben wurde und umgesetzt werden kann, müssen die Vorgaben der übergeordneten Top-Ebene für die untergeordnete Basis-Ebene sinnvoll disaggregiert werden, um diese in die Planung der Basis-Ebene einzubeziehen. Leisten (1996, vgl. S. 60-63) schlägt dazu zwei Varianten vor.

Fixed-weight Disaggregation

Die fixed-weight Disaggregation verwendet als Gewichte zur Disaggregation diejenigen der Aggregation. Wurde bei der Aggregation beispielsweise eine Gleichgewichtung angenommen, so werden die aggregierten Daten ebenfalls gleichgewichtet disaggregiert (vgl. Leisten, 1996, S. 60-62). Dies kann jedoch zu Problemen führen. Werden z.B. aggregierte Produktionsmengen anhand der Gewichtungen der detaillierten Nachfragedaten disaggregiert, werden Vor- oder Nachproduktionen nicht berücksichtigt, was zu Engpässen in der Produktion führen kann.

Optimale Disaggregation

Eine mindestens genau so gute Lösung wie die fixed-weight Disaggregation liefert die optimale Disaggregation (vgl. Leisten, 1996, S. 63). Im Gegensatz zur fixed-weight Disaggregation werden die aggregierten Daten nicht direkt disaggregiert, sondern der Basis-Ebene im aggregierten Zustand zur Verfügung gestellt, mit der Bedingung, dass die detaillierten Ergebnisse der Basis-Ebene den aggregierten Daten insgesamt entsprechen müssen (vgl. Leisten, 1996, S. 62-63). Dies bedeutet beispielsweise, dass die Produktionsmenge einer Produktgruppe der Basis-Ebene vorgegeben wird, diese die Produktionsmengen der zugehörigen Produkte aber frei wählen und optimieren kann. Als Bedingung gilt lediglich, dass die Summe der Produktionsmengen der Produkte, der vorgegebenen Produktionsmenge der Produktgruppe entsprechen muss.

Weitere Literatur zum Thema Aggregation und Disaggregation in Verbindung mit mathematischen Modellen findet sich u.a. bei Jörnsten und Leisten (1990), Rogers et al. (1991), Jörnsten und Leisten (1995), Leisten (1997) sowie Jörnsten et al. (1999).

2.2.6 Literaturüberblick

Im folgenden Abschnitt werden einige Arbeiten zur HP und HPP vorgestellt, die sich theoretisch oder praktisch mit den Themen auseinandersetzen. Zunächst werden vorwiegend theoretische Arbeiten betrachtet.

Theorie

Zimmer (2001) stellt einen hierarchischen Ansatz zur Koordination im SCM unter besonderer Beachtung einer unternehmensübergreifenden Planung vor. Dazu werden verschiedene Kontraktmodelle im SCM analysiert. Anschließend entwickelt die Autorin ein System der HP in der Darstellung nach Schneeweiß und wendet es auf die Koordination einer ein- und mehrperiodigen Bestell- und Liefermengenplanung an. Dabei nimmt der Hersteller die Top- und der Lieferant die Basis-Ebene an. Es werden sowohl explizit approximiert reaktive (mit Erwartungswerten für Kosten und Kapazitäten) als auch nicht-reaktive Antizipationen (mit konstanten Werten) aufgestellt, um die Reaktion des Lieferanten abzuschätzen. Zur Steuerung der Antizipation werden zusätzlich Konventionalstrafen und Prämien eingeführt. Eine numerische Analyse anhand eines Fallbeispiels zeigt, dass das Gesamtergebnis durch die Anwendung des hierarchischen Ansatzes mit Antizipation gegenüber einer Top-Down Planung verbessert werden kann.

Die Anwendung von künstlichen neuronalen Netzen als Antizipation zeigt Rohde (2004). Der Autor nutzt die HP in der Darstellung nach Schneeweiß für die mittel- und kurzfristige Produktionsplanung. Die mittelfristige Produktionsplanung stellt die Top-Ebene dar und berechnet Lagerbestände und Überstunden. Die Losgrößen- und Terminplanung sind Aufgaben der kurzfristigen Produktionsplanung, die in diesem Modell als Basis-Ebene fungiert. Die Top-Ebene antizipiert die Losgrößenlagerbestände und

Rüstzeiten der Basis-Ebene. Insgesamt werden vier verschiedene Antizipationsfunktionen vorgestellt und in einem Fallbeispiel analysiert. Die Antizipationsfunktionen setzen sich aus einer nicht-reaktiven Antizipation (mit konstanten Werten) und drei explizit approximiert reaktiven Antizipationen (Klassische wirtschaftliche Losgröße (EOQ) / künstliche neuronale Netze / lineare Regression) zusammen.

Betge und Leisten (2005) sowie Betge (2006) entwickeln einen iterativen Koordinationsansatz für ausgewählte APS-Module. Dabei wenden die Autoren die HP in der Darstellung nach Schneeweiß auf drei Planungsebenen an. Als oberste Planungsebene wird das Modul MP eingeordnet, welches die mittelfristige Abstimmung des Materialflusses in den Bereichen Beschaffung, Produktion und Distribution betrachtet. Die untergeordneten Planungsebenen sind die Module Production Planning und Scheduling, die die Losgrößen- und Ablaufplanung beinhalten. Auf allen Planungsebenen wird der gleiche Planungszeitraum und eine identische Periodenlänge angenommen. Das MP antizipiert die beiden untergeordneten Planungsebenen explizit approximiert reaktiv durch Produktionskoeffizienten und Rüstintensitäten, die bei jeder Iteration neu aggregiert werden, sowie Gewichtungsfaktoren. Die iterative Koordination setzt sich letztendlich aus drei Schritten zusammen. Im ersten Schritt, der „Initialisierung“, werden die Planungsebenen Top-Down geplant, um aktuelle Daten der untergeordneten Planungsebenen zu erhalten. Die „Kalibrierung“ gibt im zweiten Schritt die aktuellen Daten an die übergeordneten Planungsebenen zurück. Als letzten Schritt führt die „Validierung“ erneut eine Top-Down Planung mit den aktualisierten Daten durch. Im iterativen Vorgang werden nur die Schritte Kalibrierung und Validierung abwechselnd ausgeführt, bis eine hinreichend gute und zulässige Lösung gefunden wird. Die Initialisierung wird nur zu Beginn der iterativen Koordination einmalig ausgeführt. Ein Rechenbeispiel zeigt abschließend die Verbesserungen durch den Koordinationsansatz im Vergleich zur herkömmlichen Planung.

Kremer et al. (2006) beschäftigen sich mit dem Design unternehmensübergreifender Kontrakte zur Koordination innerhalb der SC, wobei die HP in der Darstellung nach Schneeweiß angewendet wird und aggregierte Modelle betrachtet werden. Auf der Top-Ebene befindet sich die Planung des Designs für einen Kontrakt zwischen einem Lieferanten und Hersteller. Die Beziehung zwischen dem Lieferanten und Hersteller befindet sich auf der Basis-Ebene. Es werden explizit exakt reaktive und explizit approximiert reaktive Antizipationsfunktionen zur Abschätzung der Auswirkungen eines Kontraktes auf die Beziehung zwischen dem Lieferanten und Hersteller vorgestellt, die die Lieferanten- und Hersteller-Modelle exakt und aggregiert betrachten. Letztendlich wird ein hierarchischer Koordinationsansatz vorgestellt, der in einem Rechenbeispiel mit bisherigen Ansätzen verglichen wird.

Boysen et al. (2007) beschreiben die HP für die Variantenfließfertigung. Dabei wird die HP in der Darstellung nach Schneeweiß auf die Koordination der Fließbandabstimmung, Produktionsprogramm- und Reihenfolgeplanung sowie Resequencing speziell für eine Variantenfließfertigung angewendet. Je Planungsebene werden unterschiedliche Ag-

gregationsniveaus sowohl zeitlich, als auch ressourcen- und produktbezogen betrachtet. Um die untergeordneten Planungsebenen abzuschätzen, werden antizipative Zielkriterien zur Vermeidung von Überlastungen fallspezifisch angewandt.

Timm entwickelt in seinen Arbeiten (Timm (2008) sowie Timm und Blecken (2011)) ein Verfahren zur Koordination der Struktur-, Dimensions- und Materialbedarfsplanung von Fertigungssystemen. Dabei wendet der Autor die HP in der Darstellung nach Schneeweiß, allerdings ohne Antizipation, an. Ein ähnliches Verfahren stellt Dürksen (2011) mit einem hierarchischen Vier-Ebenen-Planungsansatz für ein Produktionsnetzwerk vor. Dieser Ansatz nutzt ebenfalls die Darstellung der HP nach Schneeweiß und verwendet nicht-reaktive Antizipationsfunktionen auf den jeweils übergeordneten Planungsebenen zur Abschätzung der detaillierteren Kapazität auf den untergeordneten Planungsebenen. Beide Arbeiten werden in Kapitel 3.6 genauer beschrieben, da die betrachteten Planungsebenen auch eine Standort- und Produktionsplanung beinhalten.

Eine Verknüpfung zwischen der HPP und der robusten Planung als Einsatz in APS findet sich bei Gebhard (2009). Um Unsicherheiten und Störungen der Planung zu reduzieren, entwickelt die Autorin ein Konzept zur robusten HPP, das die Vorzüge einer robusten Optimierung nutzt. Als beispielhafte Planungsebenen werden eine aggregierte Produktionsplanung als übergeordnete Planungsebene und ein Capacitated Lot Sizing Problem (CLSP) als untergeordnete Planungsebene verwendet. Anschließend wird das entwickelte robuste hierarchische Konzept auf die Modelle angewendet und eine nicht-reaktive Antizipation mit Rüstabschlägen verwendet. Eine sehr umfangreiche Fallstudie zeigt abschließend die Vorteile des Konzeptes bei Unsicherheiten auf.

Ebadian et al. (2009) nutzen das Konzept der HPP um kurzfristige und zuverlässige Liefertermine bei Make-to-Order Fertigungen zu generieren. Dazu wird ein System mit drei Planungsebenen entworfen. Auf der obersten Planungsebene befindet sich der Auftragseingang und die zugehörige Planung, die den Auftrag einplant und einen ersten Liefertermin abschätzt. Die mittlere Planungsebene detailliert die Produktionsplanung für den Auftrag und gibt ihn zur Produktion frei, wohingegen die untere Planungsebene die kurzfristige Ablaufplanung betrachtet. Das entwickelte System wird anschließend mit Simulationsexperimenten getestet. Es wird keine Antizipation verwendet.

Albey und Bilge (2011) entwickeln ein dreistufiges hierarchisches Produktionsplanungs- und Kontrollsystem für flexible Fertigungssysteme. Für die oberste Planungsebene wird ein aggregiertes Produktionsplanungsmodell aufgestellt. Die mittlere Planungsebene wird durch ein Modell der kurzfristigen Belegungsplanung gebildet. Auf der untersten Planungsebene befindet sich die Werkstattsteuerung, die allerdings nicht explizit als Modell vorgestellt wird. Um die Auswirkungen der beiden oberen Planungsebenen auf die Werkstattsteuerung abzuschätzen, wird diese durch eine Simulation mit den aktuellen Produktionsplänen explizit approximiert reaktiv antizipiert und gibt aktualisierte Koeffizienten für Kapazitätsbedarfe zurück. Abschließende Testrechnungen machen deutlich, dass die entwickelte Antizipation bessere Ergebnisse erzeugt als bisherige Ansätze.

Jansen et al. (2013) antizipieren Vorlaufzeiten für die Ablaufplanung implizit reaktiv. Die Autoren nutzen die HP in der Darstellung nach Schneeweiß und besetzen die Top-Ebene mit der Ablaufplanung, während die Planung einzelner Produktionseinheiten die Basis-Ebene bildet. Die Ablaufplanung gibt Auftragsfreigaben an die Produktionseinheiten weiter und antizipiert dabei die Vorlaufzeiten der Produktionseinheiten bereits auf der Top-Ebene, um unzulässige Lösungen auszuschließen. Es wird eine deterministische und eine stochastische Version der Antizipationsfunktion vorgestellt, wobei die stochastische Antizipationsfunktion durch Glättungsheuristiken unterstützt wird, um ein nicht-lineares Optimierungsmodell zu umgehen. Letztlich werden die vorgestellten Antizipationsfunktionen durch verschiedene Testrechnungen verglichen.

Praxis

Carravilla und de Sousa (1995) analysieren die Produktion in einem Make-to-Order-Unternehmen der Schuh-Industrie und erstellen ein dreistufiges System zur HPP. Die oberste Stufe beschreibt eine aggregierte Planung der Kapazitäten mit einem Planungszeitraum von zehn bis zwölf Monaten. Auf der mittleren Stufe wird die PPP für einen Planungszeitraum von zwei bis drei Monaten ausgeführt. Die untere Planungsebene behandelt die kurzfristige Ablaufplanung für die nächsten ein bis drei Wochen. Abschließend werden die entwickelten Modelle in eine Optimierungssoftware des Unternehmens implementiert und formal in die Darstellung der HP nach Schneeweiß überführt, wobei keine Antizipationsfunktion existiert.

Omar und Teo (2007) sowie Omar und Bennell (2009) beschäftigen sich mit einer zweistufigen HPP eines asiatischen Chemieunternehmens. Dabei wird von einer aggregierten Produktionsplanung auf der oberen Planungsebene und dem MPS auf der unteren Planungsebene ausgegangen. Anschließend wird durch Testrechnungen untersucht, wie sich Nachfragemuster, die Zeitspanne zwischen zwei Planungsdurchgängen im Sinne der rollierenden Planung sowie Strukturen der Produktionskosten auf die vorliegende HPP auswirken. Eine Antizipationsfunktion wird nicht vorgestellt.

Christou et al. (2007) zeigen die Anwendung der HPP mit Mehrproduktlinien in der Getränkeindustrie in Griechenland. Das Planungssystem beinhaltet drei Planungsstufen, die von der obersten bis zur untersten Planungsebene einen monatlichen, einen wöchentlichen und einen tagesbasierten Produktionsplan erstellen. Anschließend werden Lösungsmethoden und die Anwendung des Systems im Unternehmen erläutert. Es wird keine Antizipation verwendet.

Volling (2009) betrachtet eine Make-to-Order Fertigung bei variantenreicher Serienproduktion in der Automobilindustrie und entwickelt dazu ein HP-System. Der Autor nutzt die HP in der Darstellung nach Schneeweiß, wobei die Auftragsannahme die Top-Ebene und die PPP die Basis-Ebene bildet. Die Auftragsannahme antizipiert dabei die PPP bereits in der Top-Ebene, um Terminabweichungen und damit zusammenhängende Kosten abzuschätzen. Für alle vier Typen der Antizipation wird jeweils eine Antizipationsfunktion für diesen speziellen Fall vorgestellt, wobei nur die explizit approximiert

reaktive Antizipationsfunktion letztendlich angewandt wird. Eine numerische Analyse stellt die Vorteile des entwickelten Systems heraus.

Zäpfel und Mitter (2010) wenden die Darstellung der HP nach Schneeweiß für die Planung eines industriellen Logistikdienstleisters an. Dabei spielt insbesondere die Flexibilität eine Rolle. Aufgestellt wird ein Planungssystem mit vier Stufen. Die Ressourcenbedarfsplanung findet auf der obersten Planungsebene als Jahresplanung statt. Die Personaleinsatzplanung für Monate folgt auf der zweiten Planungsebene. Die Prozessplanung, welche Schichten plant, bildet die dritte Planungsebene. Die unterste Planungsebene beinhaltet die Ressourcenbelegungsplanung, welche beispielsweise einzelne Stunden in der Planung betrachtet. Die Koordination der Planungsebenen wird über Instruktionen und Reaktionen gewährleistet. Es wird eine nicht-reaktive Antizipation für durchschnittliche Prozess-, Rüst- und Wartezeiten verwendet. Das System wird abschließend bei dem genannten Logistikdienstleister als Fallstudie angewandt und zeigt eine deutliche Verbesserung im Vergleich zu der vorherigen Planung des Logistikdienstleisters.

Ortiz-Araya und Alborno (2012) zeigen die Anwendung der HPP bei einem Unternehmen, welches wiederverwendbare Einkaufstaschen in Chile und Peru produziert. Es werden drei Planungsebenen betrachtet, die jeweils ein Produktionsplanungsmodell betrachten, wobei das Aggregationsniveau je Planungsebene abnimmt. Abschließend wird die Anwendung des entwickelten Systems beim vorgestellten Unternehmen beschrieben. Eine Antizipation wird nicht verwendet.

Erromdhani et al. (2012) erläutern den Einsatz der HPP mit Flexibilität in der Nahrungsmittelindustrie mit einer Fallstudie über eine Fleischerei. Es werden zwei Linear Programming (LP)-Modelle der Produktionsplanung vorgestellt, die jeweils unterschiedliche Aggregationsniveaus besitzen. Die Anwendung im Rahmen der Fallstudie zeigt, dass die Nachfrage vollständig befriedigt wird und Lagerhaltungskosten deutlich reduziert werden. Auch in dieser Arbeit werden keine Antizipationsfunktionen genutzt.

Die Antizipationsfunktionen der vorgestellten Arbeiten werden in den folgenden Tabellen 2.1 und 2.2 zusammengefasst dargestellt.

Autor	Typ der Antizipation	Inhalt der Antizipation	Anwendungsgebiet
Zimmer (2001)	Explizit approximiert reaktiv / Nicht-reaktiv	Erwartungswerte mit Entscheidungen / Konstante Werte, Antizipation der Kosten und Kapazitäten, Anwendung von Konventionalstrafen und Prämien	Hersteller-Lieferanten-Beziehung
Rohde (2004)	Explizit approximiert reaktiv / Nicht-reaktiv	EOQ, künstliche neuronale Netze, lineare Regression / Konstante Werte, Antizipation der Losgrößenlagerbestände und Rüstzeiten	Mittel- und kurzfristige Produktionsplanung
Bette und Leisten (2005) bzw. Bette (2006)	Explizit approximiert reaktiv	Aggregierte Parameter und Gewichtungsfaktoren, Antizipation der Produktions- und Rüstzeiten	MP und Losgrößen- sowie Ablaufplanung
Kremer et al. (2006)	Explizit exakt reaktiv / Explizit approximiert reaktiv	Exakte / Aggregierte Lieferanten- und Hersteller-Modelle, Antizipation der Auswirkungen eines Kontraktes auf die Hersteller-Lieferanten-Beziehung	Kontraktdesign und Hersteller-Lieferanten-Beziehung
Boysen et al. (2007)	Explizit approximiert reaktiv	Fallspezifische Zielkriterien, Antizipation verschiedener Bearbeitungszeiten um Überlastungen zu vermeiden	Fließbandabstimmung, PPP und Reihenfolgeplanung
Gebhard (2009)	Nicht-reaktiv	Rüstabschläge als konstante Werte, Antizipation der Rüstzeiten	Aggregierte Produktionsplanung und CLSP

Tabelle 2.1: Literaturüberblick zu verwendeten Antizipationsfunktionen - Teil 1

Autor	Typ der Antizipation	Inhalt der Antizipation	Anwendungsgebiet
Volling (2009)	Explizit approximiert reaktiv	Aggregierte Parameter und Gewichtungsfaktoren, Antizipation von Terminabweichungen und damit zusammenhängenden Kosten	Auftragsannahme und PPP
Zäpfel und Mitter (2010)	Nicht-reaktiv	Durchschnittliche Prozess-, Rüst- und Wartezeiten als konstante Werte, Antizipation der Prozess-, Rüst- und Wartezeiten	Ressourcenbedarfs-, Personaleinsatz-, Prozess- und Ressourcenbelegungsplanung
Albey und Bilge (2011)	Explizit approximiert reaktiv	Simulation mit aktuellen Produktionsplänen, Antizipation der Kapazitätsbedarfe	Aggregierte Produktionsplanung, kurzfristige Belegungsplanung und Werkstattsteuerung
Dürksen (2011)	Nicht-reaktiv	Konstante Werte, Antizipation der detaillierteren Kapazität	Kapazitätsplanung für gesamtes Netzwerk und einzelne Maschinenparks sowie Personalplanung
Jansen et al. (2013)	Implizit reaktiv	Deterministische und stochastische Antizipationsfunktionen um unzulässige Lösungen auszuschließen, Antizipation der Vorlaufzeiten	Ablaufplanung und Planung einzelner Produktionseinheiten

Tabelle 2.2: Literaturüberblick zu verwendeten Antizipationsfunktionen - Teil 2

3 Koordination der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung

Wie in Kapitel 2.1 erwähnt, sind Verbindungen zwischen Planungsebenen notwendig, um eine aufeinander abgestimmte Planung entlang der SC und innerhalb eines Unternehmens zu realisieren. Dies gilt auch für die Koordination zwischen der langfristigen Standortplanung und der mittelfristigen Produktionsplanung.

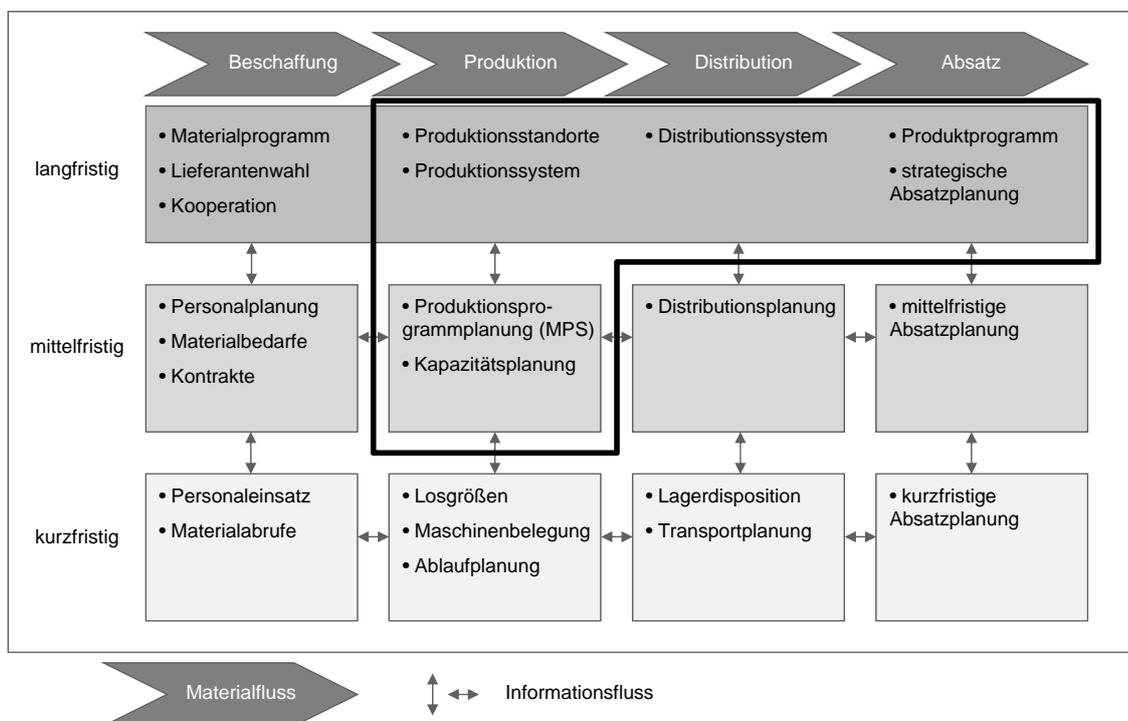


Abbildung 3.1: Einordnung in die Supply Chain Planning Matrix (in Anlehnung an Fleischmann et al., 2010, S. 97)

Die in dieser Arbeit betrachteten Planungsaufgaben der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung sowie die Einordnung dieser in die SCP Matrix wird durch den Rahmen in Abbildung 3.1 deutlich gemacht. Zum besseren Verständnis der

Notwendigkeit einer Koordination, werden in den folgenden Abschnitten die Eigenschaften und mathematischen Optimierungsmodelle der betrachteten Planungsebenen vorgestellt. Zudem wird das mathematische Gesamtmodell aufgestellt und ein Praxisbeispiel erläutert. Ein anschließender Literaturüberblick zeigt bisherige Koordinationsansätze auf, bevor im letzten Abschnitt Voraussetzungen und Anforderungen an ein Koordinationskonzept aufgestellt werden.

3.1 Eigenschaften und mathematisches Modell der betrachteten langfristigen Standortplanung

Die vorliegende langfristige Standortplanung setzt sich aus den Planungsaufgaben der Produktionsstandorte und des Produktionssystems sowie Teilen der Distribution und des Absatzes zusammen. Die Teilplanung des Distributionssystems bezieht sich darauf, dass die Wahl der Standorte auch in Abhängigkeit von Transportkosten und zur Verfügung stehenden Lagerkapazitäten getroffen wird und Allokationen von Märkten zu Standorten festgelegt werden. Durch das vorgegebene Produktprogramm und die strategischen Absatzpläne wird auch der Bereich Absatz berücksichtigt.

Planungszeitraum

Klassischerweise wird bei der Standortplanung ein langfristiger Planungszeitraum betrachtet. Dies ist begründet durch die Tatsache, dass wichtige strukturelle Entscheidungen für das Unternehmen getroffen und die Weichen für die zukünftige Ausrichtung des Unternehmens gestellt werden. Wie beispielsweise Günther und Tempelmeier (2012, S. 67) darstellen, sind derartige Entscheidungen mit größeren Investitionen verbunden. Um diese Investitionen durch Einnahmen im gesamten Planungszeitraum zu decken und langfristige Entwicklungen, beispielsweise der Nachfrage, einzubeziehen, wird die vorliegende Planung über einen Zeitraum von bis zu zehn Jahren betrachtet.

Dimension einer Periode

Zur Klärung der Periodenlänge ist zunächst festzuhalten, dass die vorliegende Planungssituation variierende und schwankende Werte über den gesamten Planungszeitraum besitzt. Dementsprechend ist eine dynamische Betrachtung der Standortplanung notwendig, um auf unterschiedliche Periodenwerte reagieren zu können.

Die konkrete Periodenlänge ist jedoch von mehreren Faktoren abhängig (vgl. Stadler, 1988, S. 57-58). Aufgrund der essentiellen Wichtigkeit der Standortplanung für das Unternehmen sollten möglichst viele Daten möglichst genau abgebildet werden. Dies stellt jedoch ein Problem in zweierlei Hinsicht dar. Einige Informationen, beispielsweise Nachfrageprognosen, lassen sich für kurzfristig anstehende Zeitpunkte relativ genau und zeitlich differenziert abschätzen, nehmen über den gesamten langfristigen Planungszeitraum jedoch an Genauigkeit ab. Ein weiteres Problem bei einer zu genauen Abbildung

der Daten ist, dass eine geringe Periodenlänge (z.B. eine Woche) die Dimensionen eines Optimierungsmodells derart erhöht, dass ein Standortplanungsmodell zu groß würde. Neben diesen Faktoren muss zu guter Letzt die Verbindung zur untergeordneten Ebene der mittelfristigen Produktionsplanung beachtet werden. Wie in Kapitel 2.1.3 bereits erwähnt, sollte der dortige Planungszeitraum mindestens einen Saisonzyklus abbilden. Unter der Annahme, dass ein Saisonzyklus im betrachteten Beispiel ein Jahr beträgt, erscheint für die vorliegende Standortplanung eine Periodenlänge von ebenfalls einem Jahr als sinnvoll. Somit lassen sich Daten und Entscheidungen in der zeitlichen Dimension sowohl leichter aggregieren (von der mittelfristigen Produktionsplanung zur langfristigen Standortplanung) als auch leichter disaggregieren (von der langfristigen Standortplanung zur mittelfristigen Produktionsplanung).

Dimension der Produkte

Analog zur Periodenlänge wird auch die Dimension der Produkte aggregiert in Form von Produktgruppen betrachtet. Gründe dafür sind ebenfalls die Reduzierung der Unsicherheit und Komplexität. Die Aggregation wird anhand von ähnlichen Produktionskoeffizienten, Bedarfen oder Rüstzeiten vorgenommen.

Dimension der Ressourcen

Ressourcen lassen sich in mehrere Gruppen unterteilen, die beispielsweise nur Personal oder Maschinen betrachten. Da auf der Ebene der Standortplanung auf Jahresbasis geplant wird, sind detailliert geplante Einsatzzeiten aller Ressourcen unpräzise und unsicher. Folglich werden nur Ressourcen betrachtet, die die Produktion einschränken. Üblicherweise sind dies Engpassmaschinengruppen. Zur Vereinfachung werden im vorliegenden Fall nur Kapazitäten von einer Engpassmaschine betrachtet.

Dimension der Kunden

Eine weitere Reduzierung der Unsicherheit und Größe der zu betrachtenden Datenbasis wird durch die Bündelung von Kunden erreicht. Als aggregierte Form entstehen Märkte, die Kunden einzelner Regionen zusammenfassen. Die Aggregation kann auch durch die Zuordnung von Kunden zu einem Regionallager geschehen, so dass dieses Lager den Markt bzw. die Nachfrage einer gesamten Region widerspiegelt. Somit handelt es sich bei der betrachteten Planungssituation um ein einstufiges Netzwerk, bei dem nur Transportrelationen zwischen den potentiellen Standorten und Märkten zu betrachten sind.

Entscheidungen

Wie in Kapitel 2.1.2 bereits erläutert, wird die vorliegende Standortplanung als betriebliche, quantitative und deterministische Planung durchgeführt. Dies ist damit begründet, dass die betrachtete Planung optimale Entscheidungen über Produktionsstandorte mithilfe eines mathematischen Optimierungsmodells treffen soll und die verwendeten Daten

zum Planungszeitpunkt bekannt sind sowie der Einfachheit halber keiner Unsicherheit unterliegen.

Im Detail bedeutet dies, dass darüber zu entscheiden ist, welche geografischen Standorte erschlossen werden sollen und welche Standortkonfiguration dort zu errichten ist. Eine Standortkonfiguration variiert größtenteils über die verfügbare Produktionskapazität sowie die Fähigkeit bestimmte Produktgruppen zu fertigen. So kann beispielsweise zwischen einer kleinen (geringe Kapazität, diese kann evtl. nur einen Teil der Produktgruppen fertigen, geringe Investitionen) und einer großen Konfiguration (große Kapazität, kann alle Produktgruppen fertigen, höhere Investitionen) unterschieden werden, wobei nur eine Konfiguration gewählt werden darf. Zu beachten sind hierbei jedoch Anlaufkurven neu eröffneter Standorte. Diese bewirken, dass die geplante volle Produktionskapazität erst nach einer gewissen Zeit zur Verfügung steht. Wurde ein Standort eröffnet, so muss in den weiteren Perioden entschieden werden, ob der Standort weiter geöffnet bleibt oder unter Umständen geschlossen wird.

Zusätzliche Entscheidungen sind die Produkt-Werk-Allokationen. Je nach geöffnetem Standort muss beschlossen werden, welche Produktgruppen an diesem Standort produziert werden, was zudem abhängig von der vorhandenen Standortkonfiguration ist. In diesem Zusammenhang ist der Begriff Flexibilität nicht zu vernachlässigen. Jordan und Graves (1995) zeigen, wie die Wahl von Produkt-Werk-Allokationen optimiert werden kann. Während die Idealvorstellung, an jedem Standort alle Produkte herzustellen, die teuerste aber auch sicherste Alternative bei Nachfrageschwankungen darstellt, wird deutlich, dass mit einer geschickten Verkettung von Produkt-Werk-Allokationen (fast) die gleiche Absicherung gegenüber Schwankungen erreicht werden kann, jedoch mit deutlich geringeren Investitionen. Im vorliegenden Fall beeinflussen die Produkt-Werk-Allokationen dementsprechend die Investitionen für Standortkonfigurationen, aber auch die möglichen Folgekosten durch Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung auf der untergeordneten Ebene der mittelfristigen Produktionsplanung. Dies folgt aus der Tatsache, dass erst dort unterjährige Schwankungen der Nachfrage modelliert werden und durch Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung ausgeglichen werden müssen. Dabei hängen die zur Verfügung stehenden Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung auch von der Produkt-Werk-Allokation ab. Beispielsweise sind Produktionsverlagerungen einer bestimmten Produktgruppe in andere Werke nur möglich, wenn in diesen Werken ebenfalls eine entsprechende Produkt-Werk-Allokation für die Produktgruppe vorhanden ist. An dieser Stelle ist jedoch festzuhalten, dass im Modell keine explizite Modellierung der Verkettung vorgenommen wird. Beispielhafte Implementierungen für die optimierte Verkettung von Produkt-Werk-Allokationen nach dem Vorschlag von Jordan und Graves (1995) finden sich unter anderem bei Kauder (2008) und Wittek (2013).

Zuletzt muss über Jahresabsatzmengen je Markt entschieden werden. Diese beinhalten nicht nur die Mengenentscheidungen sondern auch die Werk-Markt-Allokationen. Je Produktgruppe wird festgelegt, welcher Standort welche Menge an welchen Markt liefert. Dabei wird aus Komplexitätsgründen von einer einstufigen Produktion ausgegangen.

Restriktionen

Die größten Einschränkungen für das vorliegende Planungsproblem stellen die vorhandenen (Maschinen-)Kapazitäten dar. Diese begrenzen die jährlichen Absatzmengen in Abhängigkeit davon, welche Standortkonfiguration gewählt wird und welche Produkt-Werk-Allokation vorliegt. Die bereits erwähnten Anlaufkurven beim Eröffnen eines neuen Standortes werden durch schrittweise aufgebaute Kapazitäten dargestellt.

Die Nachfrage eines Marktes muss nicht vollständig befriedigt werden, die Absatzmengen dürfen jedoch einen festgelegten Mindestanteil nicht unterschreiten. Dies soll dazu dienen, dass bei Kapazitätsengpässen die Nachfrage auf attraktiveren Märkten eher erfüllt wird.

Weitere Restriktionen stellen die Minstdauern von Standortöffnungen und Produkt-Werk-Allokationen dar, welche aus rechtlich-politischen Gründen sinnvoll erscheinen. Die geforderten Dauern sollten mindestens so lang sein, bis der Standort seine volle Kapazität (Anlaufkurve) erreicht hat.

Als letzte Eigenschaft soll die betrachtete Planung sowohl als Greenfield- (keine vorhandenen Standorte, Planung von „Null an“) als auch Brownfield-Planung (bereits vorhandene Standorte, Planung im „laufenden Betrieb“) möglich sein. Dies ist besonders für die ersten Perioden relevant, da unter Umständen keine Standorte neu eröffnet werden müssen. Zudem erleichtert es die Durchführung einer rollierenden Planung, welche selbst bei einer Greenfield-Planung im ersten Planungsdurchlauf ($t = 1 \dots T$), ab dem zweiten Planungsdurchlauf ($t = 2 \dots T + 1$) als Brownfield-Planung ausgeführt werden muss.

Zielsetzung

Das Ziel der Planung ist die Maximierung des Kapitalwertes der entscheidungsrelevanten Kosten und Erlöse vor Steuern. Dabei werden von den Erlösen die variablen Kosten abgezogen. Zudem müssen Kosten für geografische Standorte und die gewählten Standortkonfigurationen beachtet werden. Da es sich hier um langfristige Investitionen über einen mehrjährigen Planungszeitraum handelt, müssen die jährlichen entscheidungsrelevanten Kosten und Erlöse durch die Verwendung der Kapitalwertmethode mit einem Kapitalzinssatz abgezinst werden, um den Kapitalwert zu erhalten. Zur Vereinfachung werden mögliche Restwerte der Investitionen am Ende des Planungszeitraumes nicht berücksichtigt.

Mathematisches Modell der langfristigen Standortplanung

Die beschriebenen Eigenschaften der Standortplanung werden nun in einem mathematischen Optimierungsmodell abgebildet, welches grundsätzlich auf dem in Kapitel 2.1.2 vorgestellten WLP basiert und somit ebenfalls ein MIP-Modell ist. Das folgende Symbolverzeichnis gibt die verwendeten Indizes, Daten und Variablen wieder. Diese sind mit einem TM gekennzeichnet, was die Zugehörigkeit zur Standortplanung bzw. zum Modell der Top-Ebene aus hierarchischer Perspektive darstellen soll. Dies hat auch zur Folge, dass die Informationen auf Basis der angegebenen Dimensionen der Standortplanung

beruhen, also z.B. für Jahre und Produktgruppen. Der Index s gibt eine Standortkonfiguration an einem geografischen Standort an, wird im weiteren Verlauf der Einfachheit halber jedoch häufig als Standort bezeichnet. Lediglich bei der Verknüpfung mit geografischen Standorten wird konkret von einer Standortkonfiguration gesprochen.

Indizes

G	Menge der geografischen Standorte
g	Geografischer Standort aus G
K	Menge der Märkte
k	Markt aus K
P	Menge der Produktgruppen
p	Produktgruppe aus P
S	Menge der Standorte / Standortkonfigurationen
s	Standort / Standortkonfiguration aus S
SG_g	Menge der Standorte / Standortkonfigurationen am geografischen Standort g ($SG_g \subset S$)
T	Planungshorizont der Standortplanung
t	Periode der Standortplanung (Jahr)

Daten

a_{sp}^{TM}	Produktionskoeffizient für Produktgruppe p an Standort s
cx_{skp}^{TM}	Produktions- und Transportkosten für Absatzmenge von Standort s zu Markt k für Produktgruppe p
cy_s^{TM}	Fixe Kosten für Standort s
cyg_g^{TM}	Öffnungskosten für geografischen Standort g
cyo_s^{TM}	Öffnungskosten für Standort s
cys_s^{TM}	Schließungskosten für Standort s
d_{kpt}^{TM}	Nachfrage von Markt k für Produktgruppe p in Periode t
$dmin_{kp}^{TM}$	Prozentualer Mindestanteil der zu liefernden, langfristigen Nachfrage für Markt k für Produktgruppe p
k_s^{TM}	Jährliche Kapazität von Standort s

3.1 Eigenschaften und mathematisches Modell der betrachteten langfristigen Standortplanung

ko_{st}^{TM}	Reduktion des Kapazitätsanteils, wenn 100%ige Verfügbarkeit noch t Perioden am Standort s benötigt (z.B. $\tau_s^{TM} = 3 : ko_{s,t=1}^{TM} = 0,1 ko_{s,t=2}^{TM} = 0,3 ko_{s,t=3}^{TM} = 0,4$ d.h. im Jahr der Eröffnung (zu Beginn der Periode) stehen 100%-40% = 60% der Maximalkapazität zur Verfügung), $t = 1 \dots \tau_s^{TM}$
kp_{sp}^{TM}	Kapazität von Standort s für Produktgruppe p ($0 \dots k_s^{TM}$)
p_{kp}^{TM}	Absatzpreis auf Markt k für Produktgruppe p
$Y_{s,t=0}^{TM}$	Bestehende Standorte s in Periode $t = 0$
$YP_{sp,t=0}^{TM}$	Bestehende Produkt-Werk-Allokationen von Produktgruppe p an Standort s in Periode $t = 0$
$y_start_{st}^{TM}$	1, wenn Standort s zu Beginn der Periode t geschlossen werden darf; 0, sonst ($t = 1 \dots \delta^{TM}$)
$yo_start_{st}^{TM}$	1, wenn Standort s in der Vergangenheit in Periode t geöffnet wurde; 0, sonst ($-\tau_s^{TM} + 1 \leq t \leq 0$)
$yp_start_{spt}^{TM}$	1, wenn Produkt-Werk-Allokation von Produktgruppe p an Standort s zu Beginn der Periode t aufgegeben werden darf; 0, sonst ($t = 1 \dots \mu^{TM}$)
z	Kapitalzinssatz
δ^{TM}	Mindestdauer einer Standortöffnung
μ^{TM}	Mindestdauer einer Produkt-Werk-Allokation
τ_s^{TM}	Dauer bis Standortöffnung von s komplett vollzogen (falls $\tau_s^{TM} = 0$, ist der Standort bereits in der Periode der Eröffnung zu 100% verfügbar)

Variablen

XD_{skpt}^{TM}	Absatzmenge von Produktgruppe p an Standort s für Markt k in Periode t
Y_{st}^{TM}	1, wenn Standort s in Periode t geöffnet ist; 0, sonst
YG_{gt}^{TM}	1, wenn geografischer Standort g in Periode t geöffnet wird; 0, sonst
YK_{st}^{TM}	Standortkapazität als Anteil zwischen 0 und 1 von Standort s in Periode t
YO_{st}^{TM}	1, wenn Standort s zu Beginn der Periode t geöffnet wird; 0, sonst
YP_{spt}^{TM}	1, wenn Produktgruppe p an Standort s in Periode t produziert wird; 0, sonst
YS_{st}^{TM}	1, wenn Standort s zu Beginn der Periode t geschlossen wird; 0, sonst

Mathematisches Modell

$$\max \sum_{t=1}^T \left(\sum_{s \in S} \left(\sum_{k \in K} \sum_{p \in P} (p_{kp}^{TM} - cx_{skp}^{TM}) X D_{skpt}^{TM} - cy_s^{TM} Y_{st}^{TM} - cyo_s^{TM} Y O_{st}^{TM} - cy_s^{TM} Y S_{st}^{TM} \right) - \sum_{g \in G} cyg_g^{TM} Y G_{gt}^{TM} \right) (1+z)^{-(t-1)} \quad (3.1)$$

U.d.N.:

$$\sum_{k \in K} \sum_{p \in P} a_{sp}^{TM} X D_{skpt}^{TM} \leq k_s^{TM} Y K_{st}^{TM} \quad \forall s \in S, t = 1 \dots T \quad (3.2)$$

$$Y K_{st}^{TM} = Y_{st}^{TM} - \sum_{t'=0 | \tau_s^{TM} \geq 1}^{\tau_s^{TM}-1} k_{s, \tau_s^{TM}-t'}^{TM} Y O_{s, t-t'}^{TM} \quad \forall s \in S, t = \max\{1, \tau_s^{TM}\} \dots T \quad (3.3)$$

$$Y K_{st}^{TM} = Y_{st}^{TM} - \sum_{t'=0}^{t-1} k_{s, \tau_s^{TM}-t'}^{TM} Y O_{s, t-t'}^{TM} - \sum_{t'=t}^{\tau_s^{TM}-1} k_{s, \tau_s^{TM}-t'}^{TM} yo_start_{s, t-t'}^{TM} \quad \forall s \in S, t = 1 \dots \tau_s^{TM} - 1 | \tau_s^{TM} \geq 2 \quad (3.4)$$

$$\sum_{k \in K} a_{sp}^{TM} X D_{skpt}^{TM} \leq k_p^{TM} Y P_{spt}^{TM} \quad \forall s \in S, p \in P, t = 1 \dots T \quad (3.5)$$

$$Y P_{spt}^{TM} \leq Y_{st}^{TM} \quad \forall s \in S, p \in P, t = 1 \dots T \quad (3.6)$$

$$yp_start_{spt}^{TM} \geq (Y P_{sp, t-1}^{TM} - Y P_{spt}^{TM}) \quad \forall s \in S, p \in P, t = 1 \dots \mu^{TM} \quad (3.7)$$

$$Y P_{spt'}^{TM} \geq (Y P_{sp, t-1}^{TM} - Y P_{spt}^{TM}) \quad \forall s \in S, p \in P, t = \mu^{TM} + 1 \dots T, t' = t - \mu^{TM} \dots t - 1 \quad (3.8)$$

$$\sum_{s \in S} X D_{skpt}^{TM} \leq d_{kpt}^{TM} \quad \forall k \in K, p \in P, t = 1 \dots T \quad (3.9)$$

$$\sum_{s \in S} X D_{skpt}^{TM} \geq d_{kpt}^{TM} dmin_{kp}^{TM} \quad \forall k \in K, p \in P, t = 1 \dots T \quad (3.10)$$

3.1 Eigenschaften und mathematisches Modell der betrachteten langfristigen Standortplanung

$$Y_{st}^{TM} + YS_{st}^{TM} = Y_{s,t-1}^{TM} + YO_{st}^{TM} \quad \forall s \in S, t = 1 \dots T \quad (3.11)$$

$$y_start_{st}^{TM} \geq YS_{st}^{TM} \quad \forall s \in S, t = 1 \dots \delta^{TM} \quad (3.12)$$

$$Y_{st}^{TM} \geq \sum_{t'=t+1}^{t+\delta^{TM}} YS_{st'}^{TM} \quad \forall s \in S, t = \delta^{TM} \dots T - \delta^{TM} \quad (3.13)$$

$$YG_{gt}^{TM} \geq (1 - \sum_{s' \in SG_g} Y_{s',t-1}^{TM}) + (YO_{st}^{TM} - 1) \quad \forall g \in G, s \in SG_g, t = 1 \dots T \quad (3.14)$$

$$\sum_{s \in SG_g} Y_{st}^{TM} \leq 1 \quad \forall g \in G, t = 1 \dots T \quad (3.15)$$

$$XD_{skpt}^{TM} YK_{st}^{TM} \geq 0 \quad \forall s \in S, k \in K, p \in P, t = 1 \dots T \quad (3.16)$$

$$Y_{st}^{TM}, YO_{st}^{TM}, YS_{st}^{TM}, YP_{spt}^{TM}, YG_{gt}^{TM} \in \{0; 1\} \quad \forall g \in G, s \in S, p \in P, t = 1 \dots T \quad (3.17)$$

Die Zielfunktion (3.1) maximiert den Kapitalwert der entscheidungsrelevanten Kosten und Erlöse vor Steuern über den gesamten Planungszeitraum. Dabei werden im ersten Teil der Zielfunktion die Produktions- und Transportkosten von den Erlösen subtrahiert. Weitere Abzüge bilden die fixen Kosten, die durch den laufenden Betrieb bestehender, die Eröffnung neuer oder die Schließung bestehender Standorte bzw. Standortkonfigurationen verursacht werden. Zusätzlich werden die Kosten für die Erschließung des geografischen Standortes fällig. Um der langfristigen Betrachtung gerecht zu werden, werden die gesamten entscheidungsrelevanten Kosten und Erlöse im Planungszeitraum mit dem Kapitalzinssatz abgezinst.

(3.2) stellen die allgemeinen Kapazitätsnebenbedingungen je Standort und Periode dar. Die Kapazität ist hierbei vom verfügbaren Kapazitätsanteil YK_{st}^{TM} abhängig, der, wie beschrieben, in den ersten Perioden nach einer Standortöffnung einer Anlaufkurve unterliegt und somit nur schrittweise die Kapazität erhöht.

Die Nebenbedingungen (3.3) und (3.4) bestimmen den angesprochenen Kapazitätsanteil. Für spätere Perioden (beginnend ab Periode τ_s^{TM}) legen (3.3) fest, dass der Anteil der Kapazität eines neu errichteten Standortes erst τ_s^{TM} Perioden nach der Eröffnung 100% beträgt. Vorher wird der Anteil um ko_{st}^{TM} reduziert, wenn die volle Kapazitätsverfügbarkeit noch eine bestimmte Anzahl an Perioden benötigt. In den ersten Perioden (bis Periode $\tau_s^{TM} - 1$) können Standorte noch keine 100%ige Kapazitätsverfügbarkeit aufweisen, es sei denn die Standorte bestehen bereits vor der ersten Periode. Dies wird durch (3.4) berücksichtigt, indem $yo_start_{s,t}^{TM}$ angibt, in welcher Periode vor Beginn des Planungszeitraumes der Standort eröffnet wurde. Dies ist besonders im Fall einer rol-

lierenden Planung wichtig und zeigt die mögliche Anwendung einer Brownfield-Planung auf.

Weitere Kapazitätsrestriktionen stellen (3.5) dar. Hier wird jedoch im Unterschied zu (3.2) die Kapazität in Abhängigkeit von der gewählten Produkt-Werk-Allokation YP_{spt}^{TM} festgelegt. Wird eine Produktgruppe einem Standort nicht zugewiesen, so entspricht die Kapazität null. Andernfalls wird die 100%ige Kapazität als obere Grenze gesetzt. In diesem Fall dienen (3.5) als Big M Restriktionen, da die tatsächlich verfügbare Kapazität durch (3.2) aufgrund der Anlaufkurven genauer gegeben ist.

(3.6) stellen sicher, dass eine Produkt-Werk-Allokation nur bei einem geöffneten Standort stattfindet.

Die Einhaltung einer Mindestdauer für Produkt-Werk-Allokationen wird durch die Restriktionen (3.7) und (3.8) abgebildet. (3.7) erzwingen die Allokation für die ersten Perioden (bis Periode μ^{TM}), wobei $yp_start_{spt}^{TM}$ angibt, ab wann eine Zuordnung, aufgrund bereits vor der ersten Periode bestehender Produkt-Werk-Allokationen, aufgegeben werden darf. Auch dies lässt erneut eine Brownfield-Planung zu. Die Nebenbedingungen (3.8) sorgen für die Einhaltung der Mindestdauer in späteren Perioden (beginnend ab Periode $\mu^{TM} + 1$).

(3.9) und (3.10) stellen die Ober- bzw. Untergrenzen der Absatzmengen dar. Dabei bewirken (3.9), dass die Absatzmengen aller Standorte die jeweilige Jahresnachfrage eines Marktes für eine Produktgruppe nicht übersteigen dürfen. Die Restriktionen (3.10) stellen sicher, dass der festgelegte prozentuale Mindestanteil der Nachfrage auf jeden Fall geliefert werden muss.

Die Standortbilanzgleichungen werden durch (3.11) dargestellt. Durch diese wird erzwungen, dass ein Standort erst eröffnet werden muss, um dauerhaft geöffnet zu sein. Ebenso wird eine Schließung erzwungen, wenn der Standort nicht mehr geöffnet ist.

Analog zur Mindestdauer der Produkt-Werk-Allokationen stellen (3.12) und (3.13) sicher, dass die Mindestdauer für Standortöffnungen einzuhalten ist. Für die ersten Perioden (bis Periode δ^{TM}), und somit erneut geeignet für eine Brownfield-Planung, regeln dies (3.12), indem ein Standort nur geschlossen werden darf, wenn er bereits genügend Perioden vor der ersten Periode geöffnet war (wird durch $y_start_{st}^{TM}$ angegeben). Die Einhaltung der Mindestdauer in späteren Perioden (beginnend ab Periode $\delta^{TM} + 1$) sichern (3.13).

Die Verknüpfung zwischen geografischen Standorten und geöffneten Standorten bzw. Standortkonfigurationen stellen die Nebenbedingungen (3.14) und (3.15) sicher. (3.14) führen dazu, dass ein geografischer Standort eröffnet wird, sobald ein Standort bzw. eine Standortkonfiguration eröffnet wird. Sollte in späteren Perioden ein Wechsel zu einer anderen Standortkonfiguration am gleichen geografischen Standort erfolgen, so muss der geografische Standort nicht erneut eröffnet werden. Mit (3.15) wird sichergestellt, dass in jeder Periode nur eine Standortkonfiguration je geografischem Standort geöffnet sein darf.

Die Nichtnegativitäts- und Binärbedingungen der Variablen werden durch (3.16) und (3.17) dargestellt.

3.2 Eigenschaften und mathematisches Modell der betrachteten mittelfristigen Produktionsplanung

Die betrachtete mittelfristige Produktionsplanung beinhaltet die PPP und die Kapazitätsplanung. Als Abgrenzung zum oft verwendeten Begriff MP, welcher neben dem mittelfristigen Bereich Produktion auch die Bereiche Beschaffung und Distribution beinhaltet, werden hier vorrangig Aspekte des Bereichs Produktion geplant. Teile der Distribution finden sich in Lager- und Transportmengen wieder.

Planungszeitraum

Wie in 2.1.3 erwähnt, sollte der Planungszeitraum der mittelfristigen Planungsebene einen Saisonzyklus abbilden, um Schwankungen mit geeigneten Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung abzufangen. Im vorangegangenen Abschnitt wurde für die Periodenlänge der Standortplanung angenommen, dass ein Saisonzyklus und folglich der mittelfristige Planungszeitraum im vorliegenden Planungsproblem eine Länge von einem Jahr besitzt. Diese Annahme soll auch hier gelten.

Dimension einer Periode

Die Periodenlänge der mittelfristigen Produktionsplanung ist entsprechend der detaillierteren Planung und des kleineren Planungszeitraumes kürzer zu wählen, als die der Standortplanung. Auch an dieser Stelle ist, bedingt durch Unsicherheiten und die Größe der Datenbasis auf zu kleine Periodenlängen zu verzichten. Die Periodenlänge muss so gewählt werden, dass in einem gering aggregierten Zustand trotzdem Entscheidungen zu treffen sind, die auftretende Schwankungen berücksichtigen. Dementsprechend wird von einem Monat als Periodenlänge ausgegangen.

Dimension der Produkte

Während auf der langfristigen Planungsebene mit Produktgruppen gearbeitet wird, werden diese im mittelfristigen Bereich zu einzelnen Produkten disaggregiert. Dies vergrößert zwar die Datenbasis, führt aber zu deutlich genaueren Planungsergebnissen.

Dimension der Ressourcen

Auch in der mittelfristigen Produktionsplanung wird eine Engpassmaschine als Ressource betrachtet, jedoch auf monatlicher Basis. Als weiterer Unterschied zur übergeordneten Standortebene können zusätzliche Ressourcen, z.B. in Form von Überstunden, in Anspruch genommen werden, um mögliche Schwankungen und somit Kapazitätsmängel auszugleichen.

Dimension der Kunden

Im Bereich der Kunden soll keine Disaggregation stattfinden. Zwar könnte man einzelne Kunden betrachten, aber allein die detaillierteren Zeit- und Produktdimensionen erhöhen die Größe der Datenbasis bereits so sehr, dass an dieser Stelle die aggregierte Sichtweise von Märkten Bestand haben soll. Somit bleibt auch die Möglichkeit bestehen, dass je Markt ein Regionallager vorhanden ist, welches die gesamte Nachfrage der angebotenen regionalen Kunden wiedergibt.

Entscheidungen

Wie zuvor in der Standortplanung, wird auch hier von einer einstufigen Produktion bzw. mehrstufigen Produktion mit einer eindeutig vorgegebenen Engpassstufe ausgegangen. Aufgrund der Disaggregation und den Abhängigkeiten zwischen den Standorten, wird die mittelfristige Produktionsplanung zudem für alle Standorte zusammen durchgeführt.

Wesentliche Entscheidungen betreffen die Produktions- und Absatzmengen, welche im Gegensatz zur langfristigen Planungsebene detaillierter geplant werden. In diesem Zusammenhang müssen auch Rüstentscheidungen getroffen werden, die auf monatlicher Basis den Rüstaufwand und die dadurch entstehenden Kosten für die weitere Planung abschätzen sollen. Bei diesen Rüstentscheidungen wird unterschieden zwischen Rüstvorgängen zwischen Produkten einer Produktgruppe und Produkten unterschiedlicher Produktgruppen, welche in der Regel deutlich höher sind. An dieser Stelle spielt die Flexibilität eine Rolle, denn je nach Produkt-Werk-Allokation in der Standortplanung ist insgesamt von höheren (z.B. bei Allokation von allen Produktgruppen zu einem Werk) oder niedrigeren Rüstkosten (z.B. bei Allokation von nur einer Produktgruppe zu einem Werk) auszugehen. Zudem hängen Produktionsverlagerungen bestimmter Produkte in andere Werke, wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, von einer Produkt-Werk-Allokation ab. Dadurch können die nachfolgend erklärten Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung eingeschränkt werden und höhere Folgekosten können entstehen.

Während in der langfristigen Planung mit jährlichen Produktionskapazitäten gerechnet wird, findet dies in der mittelfristigen Produktionsplanung auf monatlicher Basis statt. Ausgehend von den Kapazitätsentscheidungen der Standortplanung stehen der mittelfristigen Produktionsplanung bestimmte Kapazitäten zur Verfügung, welche durch verschiedene Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung erweitert werden können, um monatliche Schwankungen, die zu Engpässen führen können, auszugleichen. Dies sind neben den Lagerbeständen und Zusatzkapazitäten (z.B. Überstunden) auch Produktionsverlagerungen in andere Werke bzw. Transportmengen zwischen Werken. Weitere Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung sind nachgelagerte Produktionsmengen, also Absatzmengen, die den Kunden zu einem späteren Zeitpunkt geliefert werden (auch als Backordermengen bezeichnet). Dies führt bei unzufriedenen Kunden unter Umständen jedoch zu einem Ausfall der Nachfrage (auch als Lost Sales bezeichnet). Zur besseren Verständlichkeit zeigt Abbildung 3.2 alle Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung in einem Beispiel für zwölf Monate, einen Standort und ein Produkt. Die vorhandene Normalkapazität im

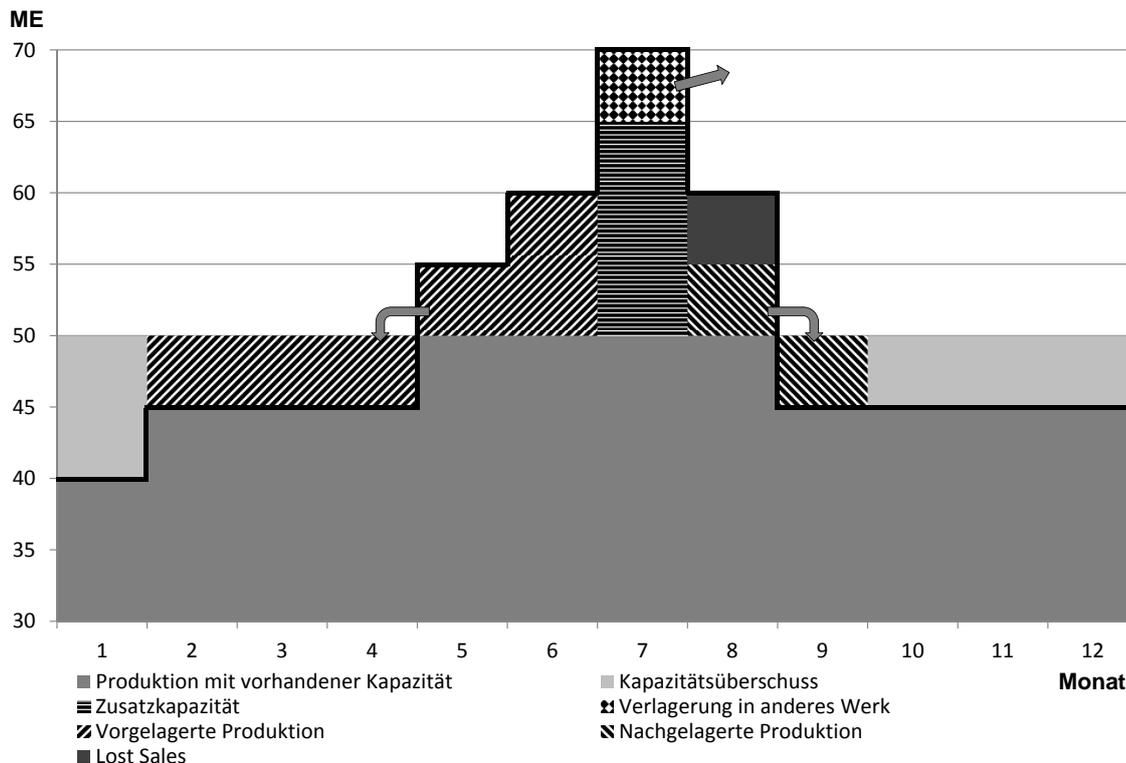


Abbildung 3.2: Beispiel für Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung

Monat beträgt 50 Mengeneinheiten (ME). Wie zu erkennen ist, übersteigt die Nachfrage (dicke schwarze Linie) durch Schwankungen in den Monaten fünf bis acht die vorhandene Kapazität und ist durch die gegebenen Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung auszugleichen. Dabei wird der Kapazitätsengpass der Monate fünf und sechs durch eine vorgelagerte Produktion (Lagerbestand) ausgeglichen. Der Engpass in Monat sieben wird durch Zusatzkapazitäten und eine Verlagerung der Produktion in ein anderes Werk gelöst. Für die Periode acht werden die fehlenden Kapazitäten per nachgelagerter Produktion ausgeglichen (Backordermengen), jedoch entstehen dabei Nachfrageausfälle bei Kunden (Lost Sales), die nicht so lange auf die Ware warten können.

Dass derartige Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung durchaus Anwendung in der Praxis finden, zeigen die Arbeiten von Wittek (Wittek et al. (2010) und Wittek (2013)), welche im Literaturüberblick in Kapitel 3.6 genauer erläutert werden.

Restriktionen

In erster Linie sind Kapazitätsrestriktionen zu beachten, welche die Vorgaben der Standortplanung bezüglich geöffneter Standorte, vorhandener Produkt-Werk-Allokationen und

verfügbarer Kapazitäten (insbesondere beim schrittweisen Aufbau der Kapazitäten) einhalten müssen und durch entsprechende Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung erweiterbar sind.

Die Absatzmengen müssen auch auf dieser Planungsebene den detaillierteren Nachfragemengen, welche in aggregierter Form denen der Standortplanung entsprechen, nicht vollständig entsprechen, jedoch einen Mindestanteil erfüllen. Zudem sind die vorgegebenen Jahresabsatzmengen der Standortplanung zu berücksichtigen.

Die angesprochenen Rüstentscheidungen benötigen verschiedene Rüstbedingungen, welche sicherstellen, dass eine Produktion nur bei Rüsten für das entsprechende Produkt möglich ist.

Als Restriktionen für die Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung sind maximale Lager- und Zusatzkapazitäten je nach geöffnetem Standort und vorhandener Produkt-Werk-Allokation einzuhalten. Zudem wird davon ausgegangen, dass ein Teil der nachgelagerten Produktion zu einem Nachfrageausfall wird, da nicht jeder Kunde eine Aufschiebung der Lieferung duldet.

Zielsetzung

Das Ziel stellt die Maximierung der Deckungsbeiträge des jeweiligen Jahres dar. Da der Planungszeitraum nur ein Jahr beträgt und keine Investitionen wie in der Standortplanung zu tätigen sind, ist auch kein Abzinsen der Deckungsbeiträge notwendig. Berücksichtigt werden Erlöse für gelieferte Absatzmengen, wovon Produktionskosten sowie Kosten für die in Anspruch genommenen Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung abgezogen werden.

Mathematisches Modell der mittelfristigen Produktionsplanung

Das folgende mathematische Optimierungsmodell stellt die betrachtete mittelfristige Produktionsplanung dar und basiert auf dem vorgestellten MIP-Modell der mittelfristigen Produktionsplanung aus Kapitel 2.1.3. Dazu wird das nachstehende Symbolverzeichnis verwendet. In diesem Fall sind die Daten und Variablen der mittelfristigen Produktionsplanung bzw. des Modells der Basis-Ebene aus hierarchischer Perspektive mit einem *BM* gekennzeichnet und beruhen auf den Dimensionen der betrachteten mittelfristigen Produktionsplanung, also beispielsweise auf Monaten und Produkten. Somit sind auch die eingehenden Entscheidungen der Standortplanung zu unterscheiden, welche mit einem *TM* gekennzeichnet sind und beispielsweise im Fall der Absatzmengen für Jahre und Produktgruppen angegeben sind.

Indizes

I	Menge der Produkte
i, j	Produkt aus I

3.2 Eigenschaften und mathematisches Modell der betrachteten mittelfristigen Produktionsplanung

K	Menge der Märkte
k	Markt aus K
M	Planungshorizont der mittelfristigen Produktionsplanung
m	Periode der mittelfristigen Produktionsplanung (Monat)
P	Menge der Produktgruppen
p	Produktgruppe aus P
PG_p	Menge der Produkte von Produktgruppe p ($PG_p \subset I$)
S	Menge der Standorte / Standortkonfigurationen
s, r	Standort / Standortkonfiguration aus S
Daten	
a_{si}^{BM}	Produktionskoeffizient für Produkt i an Standort s
$B_{ski,m=0}^{BM}$	Backordermenge von Produkt i am Standort s für Markt k in Periode $m = 0$
cb_{ki}^{BM}	Kosten für Backordermenge von Markt k für Produkt i
cd_{ski}^{BM}	Transportkosten von Standort s zu Markt k für Produkt i
cl_{si}^{BM}	Lagerkostensatz von Produkt i an Standort s
cls_{ki}^{BM}	Kosten für Lost Sales von Markt k für Produkt i
cr_{si}^{BM}	Rüstkosten für Produkt i an Standort s
crp_s^{BM}	Kosten je Rüstübergang zwischen Produktgruppen an Standort s
ct_{sri}^{BM}	Transportkosten von Standort s zu Standort r für Produkt i
cx_{si}^{BM}	Produktionskosten an Standort s für Produkt i
cz_s^{BM}	Kosten für Zusatzkapazitäten an Standort s
d_{kim}^{BM}	Nachfrage von Markt k für Produkt i in Periode m
$dmin_{ki}^{BM}$	Prozentualer Mindestanteil der zu liefernden, mittelfristigen Nachfrage für Markt k für Produkt i
k_s^{BM}	Monatliche Kapazität von Standort s
kp_{sp}^{BM}	Kapazität von Standort s für Produktgruppe p ($0 \dots k_s^{BM}$)
$L_{si,m=0}^{BM}$	Lageranfangsbestand von Produkt i an Standort s in Periode $m = 0$
$lmax_s^{BM}$	Maximaler Lagerbestand an Standort s

M^{BM}	Hinreichend große Zahl
p_{ki}^{BM}	Absatzpreis auf Markt k für Produkt i
ra_{si}^{BM}	Rüstzeit von Produkt i an Standort s
rap_s^{BM}	Rüstzeit je Rüstübergang zwischen Produktgruppen an Standort s
$xd_{skp,t=1}^{TM}$	Absatzmenge der Produktgruppe p von Standort s auf Markt k in aktuellem Jahr $t = 1$
$y_{s,t=1}^{TM}$	Entscheidung ob Standort s in aktuellem Jahr $t = 1$ geöffnet ist
$yk_{s,t=1}^{TM}$	Standortkapazität als Anteil zwischen 0 und 1 von Standort s in aktuellem Jahr $t = 1$
$yp_{sp,t=1}^{TM}$	Produkt-Werk-Allokation ob Produktgruppe p an Standort s in aktuellem Jahr $t = 1$ produziert wird
$zmax_s^{BM}$	Maximale Zusatzkapazitäten an Standort s
π^{BM}	Anteil der Backordermenge, der nach einer Periode als Lost Sales auftritt

Variablen

B_{skim}^{BM}	Backordermenge von Produkt i an Standort s für Markt k in Periode m
L_{sim}^{BM}	Lagerbestand von Produkt i an Standort s am Ende der Periode m
LS_{skim}^{BM}	Lost Sales von Produkt i an Standort s für Markt k in Periode m
R_{sim}^{BM}	1, wenn für Produkt i an Standort s in Periode m gerüstet wird; 0, sonst
RP_{spm}^{BM}	1, wenn für Produktgruppe p an Standort s in Periode m gerüstet wird; 0, sonst
RPR_{sm}^{BM}	Anzahl an Rüstvorgängen zwischen Produktgruppen an Standort s in Periode m
T_{sr}^{BM}	Transportmenge von Produkt i aus Standort s an Standort r in Periode m
X_{sim}^{BM}	Produktionsmenge von Produkt i an Standort s in Periode m
XD_{skim}^{BM}	Absatzmenge von Produkt i an Standort s für Markt k in Periode m
Z_{sm}^{BM}	Zusatzkapazitäten an Standort s in Periode m

Mathematisches Modell

$$\begin{aligned}
 \max \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M & (p_{ki}^{BM} - cd_{ski}^{BM})(XD_{skim}^{BM} + B_{ski,m-1}^{BM} - LS_{skim}^{BM} - B_{skim}^{BM}) - \\
 \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M & cx_{si}^{BM} X_{sim}^{BM} - \sum_{s \in S} \sum_{m=1}^M cz_s^{BM} Z_{sm}^{BM} - \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M cl_{si}^{BM} L_{sim}^{BM} - \\
 \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M & cr_{si}^{BM} R_{sim}^{BM} - \sum_{s \in S} \sum_{m=1}^M crp_s^{BM} RPR_{sm}^{BM} - \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M cb_{ki}^{BM} B_{skim}^{BM} - \\
 \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M & cl_{ski}^{BM} LS_{skim}^{BM} - \sum_{s \in S} \sum_{r \in S} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M ct_{sri}^{BM} T_{sr im}^{BM} \quad (3.18)
 \end{aligned}$$

U.d.N.:

$$\begin{aligned}
 \sum_{i \in I} a_{si}^{BM} X_{sim}^{BM} + \sum_{i \in I} ra_{si}^{BM} R_{sim}^{BM} + rap_s^{BM} RPR_{sm}^{BM} \leq \\
 k_s^{BM} y_{k_s,t=1}^{TM} + Z_{sm}^{BM} \quad \forall s \in S, m = 1 \dots M \quad (3.19)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{i \in PG_p} a_{si}^{BM} X_{sim}^{BM} + \sum_{i \in PG_p} ra_{si}^{BM} R_{sim}^{BM} + rap_s^{BM} RPR_{sm}^{BM} \leq \\
 (kp_{sp}^{BM} + zmax_s^{BM}) y_{p_{sp,t=1}}^{TM} \quad \forall s \in S, p \in P, \\
 m = 1 \dots M \quad (3.20)
 \end{aligned}$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{i \in PG_p} XD_{skim}^{BM} = xd_{skp,t=1}^{TM} \quad \forall s \in S, k \in K, p \in P \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned}
 L_{si,m-1}^{BM} + X_{sim}^{BM} + \sum_{r \in S} T_{rsim}^{BM} + \sum_{k \in K} B_{skim}^{BM} + \sum_{k \in K} LS_{skim}^{BM} = \\
 L_{sim}^{BM} + \sum_{k \in K} XD_{skim}^{BM} + \sum_{r \in S} T_{sr im}^{BM} + \sum_{k \in K} B_{ski,m-1}^{BM} \quad \forall s \in S, i \in I, \\
 m = 1 \dots M \quad (3.22)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 LS_{skim}^{BM} = B_{ski,m-1}^{BM} \pi^{BM} \quad \forall s \in S, k \in K, i \in I, \\
 m = 1 \dots M \quad (3.23)
 \end{aligned}$$

$$\sum_{s \in S} XD_{skim}^{BM} \leq d_{kim}^{BM} \quad \forall k \in K, i \in I, \quad m = 1 \dots M \quad (3.24)$$

$$\sum_{s \in S} XD_{skim}^{BM} \geq d_{kim}^{BM} dmin_{ki}^{BM} \quad \forall k \in K, i \in I, \quad m = 1 \dots M \quad (3.25)$$

$$X_{sim}^{BM} \leq M^{BM} R_{sim}^{BM} \quad \forall s \in S, i \in I, \quad m = 1 \dots M \quad (3.26)$$

$$RP_{spm}^{BM} \geq R_{sim}^{BM} \quad \forall s \in S, p \in P, i \in PG_p, m = 1 \dots M \quad (3.27)$$

$$RPR_{sm}^{BM} \geq \sum_{p \in P} RP_{spm}^{BM} - 1 \quad \forall s \in S, m = 1 \dots M \quad (3.28)$$

$$Z_{sm}^{BM} \leq zmax_s^{BM} yk_{s,t=1}^{TM} \quad \forall s \in S, m = 1 \dots M \quad (3.29)$$

$$\sum_{i \in I} L_{sim}^{BM} \leq lmax_s^{BM} yk_{s,t=1}^{TM} \quad \forall s \in S, m = 1 \dots M \quad (3.30)$$

$$\sum_{i \in PG_p} L_{sim}^{BM} \leq lmax_s^{BM} yp_{sp,t=1}^{TM} \quad \forall s \in S, p \in P, m = 1 \dots M \quad (3.31)$$

$$X_{sim}^{BM}, XD_{skim}^{BM}, Z_{sm}^{BM}, L_{sim}^{BM}, RPR_{sm}^{BM}, B_{skim}^{BM}, LS_{skim}^{BM}, T_{srim}^{BM} \geq 0 \quad \forall s \in S, r \in S, k \in K, i \in I, m = 1 \dots M \quad (3.32)$$

$$R_{sim}^{BM}, RP_{spm}^{BM} \in \{0; 1\} \quad \forall s \in S, p \in P, i \in I, m = 1 \dots M \quad (3.33)$$

Die Zielfunktion (3.18) maximiert den Deckungsbeitrag über den gesamten Planungszeitraum. Der erste Term multipliziert die Differenz aus Absatzpreisen und Transportkosten zu den Märkten mit der tatsächlich gelieferten Menge. Diese setzt sich aus der geplanten Absatzmenge der aktuellen und der Backordermenge der letzten Periode zusammen, von denen die Backordermenge und Lost Sales der aktuellen Periode abgezogen werden. Anschließend werden die Kosten für Produktion, Zusatzkapazitäten, Lagerhaltung, Rüstvorgänge zwischen Produkten einer Produktgruppe und Produkten unterschiedlicher Produktgruppen, Backordermengen, Lost Sales sowie Transportmengen zwischen Standorten von den erhaltenen Erlösen abgezogen.

Die Kapazitätsnebenbedingungen werden durch (3.19) und (3.20) dargestellt. (3.19) sorgen für die grundsätzliche Einhaltung der monatlichen Kapazitäten, welche aus der Standortplanung vorgegeben sind (können aufgrund von Anlaufkurven weniger als 100% sein) und um Zusatzkapazitäten erweitert werden können. Dabei beinhalten die Kapazitätsbedarfe nicht nur die reine Produktion, sondern auch Rüstzeiten. Diese setzen sich aus Rüstzeiten für Rüstvorgänge einzelner Produkte (R_{sim}^{BM}) und den Rüstzeiten zwischen verschiedenen Produktgruppen zusammen, welche über die Anzahl an Rüstübergängen zwischen Produktgruppen (RPR_{sm}^{BM}) berechnet werden. (3.20) stellen zusätzlich die Einhaltung der Kapazitäten für gegebene Produkt-Werk-Allokationen sicher. Analog zu den Nebenbedingungen (3.5) der Standortplanung, fungieren (3.20) als Big M Restriktionen, da bei einer vorhandenen Allokation 100%ige Kapazitäten plus maximale Zusatzkapazitäten als obere Schranke dienen. Andernfalls darf keine Produktion stattfinden, sobald die Produkt-Werk-Allokation nicht besteht. Folglich liefern auch hier (3.19) schärfere Kapazitätsgrenzen aufgrund der Kapazitätsvorgaben der Standortplanung.

Die Restriktionen (3.21) stellen ebenfalls eine Verknüpfung zu den Entscheidungen der übergeordneten Planungsebene dar, indem die aufsummierten Absatzmengen der mittelfristigen Produktionsplanung den Jahresabsatzmengen der Standortplanung entsprechen müssen. Die Gleichungen wären auch als \geq -Bedingungen denkbar, da unter Umständen durch die detailliertere Planung ein höherer Deckungsbeitrag mit der gegebenen Kapazität, z.B. durch höhere Absatzmengen, erzielt werden kann, als von der Standortplanung zunächst angenommen. Im vorliegenden Fall sollen beide Mengen jedoch gleich sein.

(3.22) stellen Lagerbilanzgleichungen je Periode und Standort auf. Neben den Zusatzkapazitäten in (3.19) kommen hier weitere Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung zur Anwendung (Lagerbestand, Transportmengen zwischen Standorten, Backordermengen, Lost Sales).

Die Bedingung, dass ein bestimmter Anteil der Backordermenge aus einer Vorperiode aufgrund von unzufriedenen Kunden zu Lost Sales der aktuellen Periode wird, stellen (3.23) sicher, indem die Backordermenge der Vorperiode mit einem konstanten Anteil multipliziert wird. Dieser Anteil wird als kunden- und produktunabhängig angenommen, könnte aber genau in diese Richtung erweitert werden.

Zur Befriedigung der mittelfristigen Nachfrage dienen die Nebenbedingungen (3.24) und (3.25). Dabei werden durch (3.24) die vorliegenden Nachfragen je Markt und Produkt als obere Grenze für die Absatzmengen bestimmt. Analog zum Standortmodell müssen die nachgefragten Mengen nicht vollständig, jedoch zu einem bestimmten Anteil erfüllt werden. Dies stellen (3.25) sicher, indem die untere Absatzgrenze durch einen prozentualen Mindestanteil je Markt und Produkt festgelegt wird. Wichtig an dieser Stelle ist die Bedingung, dass die prozentualen Mindestanteile der mittelfristigen Produktionsplanung ($dmin_{ki}^{BM}$) kleiner oder gleich den Anteilen der langfristigen Standortplanung ($dmin_{kp}^{TM}$) sein müssen, um unzulässige Lösungen auszuschließen. Ebenso ist zu erwähnen, dass durch die Lagerbilanzgleichungen (3.22) die Absatzmengen und so-

mit auch die Mindestanteile der Nachfrage nicht sofort an die Kunden geliefert werden müssen, sondern auch als Backordermengen auftreten können.

(3.26) bis (3.28) stellen die Rüstbedingungen dar. (3.26) erzwingen mit einer Big M Restriktion, dass die Produktion eines Produktes nur stattfinden kann, wenn für dieses Produkt auch ein Rüstvorgang durchgeführt wird. (3.27) stellen sicher, dass für eine Produktgruppe gerüstet werden muss, wenn für ein Produkt der Gruppe gerüstet wird. Durch das Aufsummieren der Rüstvorgänge der Produktgruppen berechnen die Nebenbedingungen (3.28) die Anzahl an Rüstübergängen zwischen Produktgruppen. Hier wird von der aufsummierten Zahl ein Rüstvorgang abgezogen, da genau $n - 1$ Rüstübergänge in einer Periode vorliegen, wenn n Produktgruppen gerüstet werden.

Die Nebenbedingungen (3.29) bis (3.31) beschränken die Zusatzkapazitäten und den Lagerbestand. (3.29) beziehen sich dabei auf die Zusatzkapazitäten. Diese besitzen als Obergrenze maximale Zusatzkapazitäten je Standort, die wiederum von den Kapazitätsanteilen der Standortplanung durch den schrittweisen Kapazitätsaufbau abhängig sind. Ist beispielsweise ein Werk nur zu 50% aufgebaut, können auch nur 50% der maximalen Zusatzkapazitäten genutzt werden. Analog beschränken (3.30) den Lagerbestand. Je nach Kapazitätsvorgaben aus der Standortplanung sind maximale Lagerbestände je Standort vorhanden, die über alle Produkte nicht überschritten werden dürfen. Als Zusatz stellen (3.31) sicher, dass Lagerbestand nur für Produkte gehalten werden darf, die auch an dem Standort gefertigt werden. Dies ist abhängig von der Produkt-Werk-Allokation der Standortplanung.

(3.32) und (3.33) sichern die Nichtnegativitäts- und Binärbedingungen der vorhandenen Variablen.

3.3 Mathematisches Gesamtmodell

Die vorgestellten mathematischen Modelle optimieren die Planungen der jeweiligen Planungsebene, lassen die Auswirkungen ihrer eigenen Entscheidungen auf die jeweils andere Planung aber außer Acht. Dies kann zu Ergebnissen führen, die für die langfristige Standort- oder mittelfristige Produktionsplanung lokal optimal, aber insgesamt suboptimal sind. Eine naheliegende Lösung ist die Durchführung eines mathematischen Gesamtmodells bzw. einer Simultanplanung. Diese würde sowohl die gesamten Planungsaufgaben der langfristigen Standort- als auch der mittelfristigen Produktionsplanung beinhalten und für einen langfristigen Planungszeitraum durchführen. Aufgrund von organisatorischen Strukturen und der Komplexität kommt eine derartige Planung zumeist jedoch nicht in Betracht.

Trotz dieser Kritikpunkte wird das Modell hier aus zwei Gründen aufgestellt. Zum einen soll es Werte liefern, die im späteren Verlauf eine Bewertung der neu entwickelten Koordinationsansätze zulassen. Zum anderen stellt das Gesamtmodell im hierarchischen Planungskontext eine perfekte Antizipation der mittelfristigen Produktionsplanung für

den gesamten Planungszeitraum der Standortplanung dar (siehe dazu Kapitel 4.4). So soll verdeutlicht werden, wie komplex die Durchführung einer perfekten Antizipation für die untergeordnete(n) Planungsebene(n) ist.

Da das Gesamtmodell sowohl die Planungen der Standorte als auch der Produktion langfristig betrachtet, können die Nebenbedingungen der Standortplanung direkt übernommen werden. Die Modellformulierungen der mittelfristigen Produktionsplanung sowie die Zielfunktion müssen jedoch an mehreren Stellen angepasst werden. Die folgenden Punkte stellen die zusätzlichen Eigenschaften dar.

- Die mittelfristige Produktionsplanung wird um Zeitindex t erweitert, um das jeweilige Jahr abzubilden
- Keine jahresübergreifenden Lagerbestände oder Backordermengen
- Daten, die die Entscheidungen der Standortplanung wiedergegeben haben, werden durch Variablen ersetzt
- Die Standortkosten werden aus der Zielfunktion der Standortplanung übernommen
- Die Erlöse und Kosten für Produkte werden aus der mittelfristigen Produktionsplanung übernommen und abgezinst
- Ziel ist die Maximierung des Kapitalwertes der entscheidungsrelevanten Kosten und Erlöse vor Steuern

Das nachstehende Symbolverzeichnis zeigt die zusätzlich benötigten Symbole für das Gesamtmodell.

Daten

cb_{ki}^{BM}	Kosten für Backordermenge von Markt k für Produkt i
$B_{skit,m=0}^{BM}$	Backordermenge von Produkt i am Standort s für Markt k in Periode $m = 0$ und Periode t
d_{kitm}^{BM}	Nachfrage von Markt k für Produkt i in Periode m und Periode t
$L_{sit,m=0}^{BM}$	Lageranfangsbestand von Produkt i an Standort s in Periode $m = 0$ und Periode t

Variablen

B_{skitm}^{BM}	Backordermenge von Produkt i an Standort s für Markt k in Periode m und Periode t
L_{sitm}^{BM}	Lagerbestand von Produkt i an Standort s am Ende der Periode m und Periode t

LS_{skitm}^{BM}	Lost Sales von Produkt i an Standort s für Markt k in Periode m und Periode t
R_{sitm}^{BM}	1, wenn für Produkt i an Standort s in Periode m und Periode t gerüstet wird; 0, sonst
RP_{sptm}^{BM}	1, wenn für Produktgruppe p an Standort s in Periode m und Periode t gerüstet wird; 0, sonst
RPR_{stm}^{BM}	Anzahl an Rüstvorgängen zwischen Produktgruppen an Standort s in Periode m und Periode t
T_{sritm}^{BM}	Transportmenge von Produkt i aus Standort s an Standort r in Periode m und Periode t
X_{sitm}^{BM}	Produktionsmenge von Produkt i an Standort s in Periode m und Periode t
XD_{skitm}^{BM}	Absatzmenge von Produkt i an Standort s für Markt k in Periode m und Periode t
Z_{stm}^{BM}	Zusatzkapazitäten an Standort s in Periode m und Periode t

Mathematisches Modell

$$\begin{aligned}
 \max - \sum_{t=1}^T & \left(\sum_{s \in S} (cy_s^{TM} Y_{st}^{TM} + cyo_s^{TM} YO_{st}^{TM} + cys_s^{TM} YS_{st}^{TM}) + \sum_{g \in G} cyg_g^{TM} YG_{gt}^{TM} \right) \\
 (1+z)^{-(t-1)} & + \sum_{t=1}^T \left(\sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M (p_{ki}^{BM} - cd_{ski}^{BM}) (XD_{skitm}^{BM} + B_{skit,m-1}^{BM} - LS_{skitm}^{BM} - \right. \\
 B_{skitm}^{BM}) & - \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M cx_{si}^{BM} X_{sitm}^{BM} - \sum_{s \in S} \sum_{m=1}^M cz_s^{BM} Z_{stm}^{BM} - \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M cl_{si}^{BM} L_{sitm}^{BM} - \\
 \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M & cr_{si}^{BM} R_{sitm}^{BM} - \sum_{s \in S} \sum_{m=1}^M crp_s^{BM} RPR_{stm}^{BM} - \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M cb_{ki}^{BM} B_{skitm}^{BM} - \\
 \left. \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M & cl_{ski}^{BM} LS_{skitm}^{BM} - \sum_{s \in S} \sum_{r \in S} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M ct_{sri}^{BM} T_{sritm}^{BM} \right) (1+z)^{-(t-1)} \quad (3.34)
 \end{aligned}$$

u.d.N.:

(3.2) - (3.17)

$$\sum_{i \in I} a_{si}^{BM} X_{sitm}^{BM} + \sum_{i \in I} r a_{si}^{BM} R_{sitm}^{BM} + rap_s^{BM} RPR_{stm}^{BM} \leq k_s^{BM} YK_{st}^{TM} + Z_{stm}^{BM} \quad \forall s \in S, t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (3.35)$$

$$\sum_{i \in PG_p} a_{si}^{BM} X_{sitm}^{BM} + \sum_{i \in PG_p} r a_{si}^{BM} R_{sitm}^{BM} + rap_s^{BM} RPR_{stm}^{BM} \leq (kp_{sp}^{BM} + zmax_s^{BM}) YP_{spt}^{TM} \quad \forall s \in S, p \in P, t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (3.36)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{i \in PG_p} XD_{skitm}^{BM} = XD_{skpt}^{TM} \quad \forall s \in S, k \in K, p \in P, t = 1 \dots T \quad (3.37)$$

$$L_{sit,m-1}^{BM} + X_{sitm}^{BM} + \sum_{r \in S} T_{rsitm}^{BM} + \sum_{k \in K} B_{skitm}^{BM} + \sum_{k \in K} LS_{skitm}^{BM} = L_{sitm}^{BM} + \sum_{k \in K} XD_{skitm}^{BM} + \sum_{r \in S} T_{sritm}^{BM} + \sum_{k \in K} B_{skit,m-1}^{BM} \quad \forall s \in S, i \in I, t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (3.38)$$

$$LS_{skitm}^{BM} = B_{skit,m-1}^{BM} \pi^{BM} \quad \forall s \in S, k \in K, i \in I, t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (3.39)$$

$$\sum_{s \in S} XD_{skitm}^{BM} \leq d_{kitm}^{BM} \quad \forall k \in K, i \in I, t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (3.40)$$

$$\sum_{s \in S} XD_{skitm}^{BM} \geq d_{kitm}^{BM} dmin_{ki}^{BM} \quad \forall k \in K, i \in I, t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (3.41)$$

$$X_{sitm}^{BM} \leq M^{BM} R_{sitm}^{BM} \quad \forall s \in S, i \in I, t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (3.42)$$

$$RPR_{sptm}^{BM} \geq R_{sitm}^{BM} \quad \forall s \in S, p \in P, i \in PG_p, t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (3.43)$$

$$RPR_{stm}^{BM} \geq \sum_{p \in P} RPR_{sptm}^{BM} - 1 \quad \forall s \in S, t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (3.44)$$

$$Z_{stm}^{BM} \leq zmax_s^{BM} YK_{st}^{TM} \quad \forall s \in S, t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (3.45)$$

$$\sum_{i \in I} L_{sitm}^{BM} \leq lmax_s^{BM} Y K_{st}^{TM} \quad \forall s \in S, t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (3.46)$$

$$\sum_{i \in PG_p} L_{sitm}^{BM} \leq lmax_s^{BM} Y P_{spt}^{TM} \quad \forall s \in S, p \in P, t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (3.47)$$

$$\begin{aligned} X_{sitm}^{BM}, X D_{skitm}^{BM}, Z_{stm}^{BM}, L_{sitm}^{BM}, \\ R P R_{stm}^{BM}, B_{skitm}^{BM}, L S_{skitm}^{BM}, T_{sritm}^{BM} \geq 0 \quad \forall s \in S, r \in S, k \in K, i \in I, \\ t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \end{aligned} \quad (3.48)$$

$$\begin{aligned} R_{sitm}^{BM}, R P_{sptm}^{BM} \in \{0; 1\} \quad \forall s \in S, p \in P, i \in I, \\ t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \end{aligned} \quad (3.49)$$

Die Zielfunktion (3.34) maximiert weiterhin den langfristigen Kapitalwert der entscheidungsrelevanten Kosten und Erlöse vor Steuern. Entsprechend den Veränderungen werden jedoch nur noch die fixen Standortkosten (Öffnen, Schließen und laufender Betrieb eines Standortes bzw. einer Standortkonfiguration, Öffnen eines geografischen Standortes) aus der Standortplanung berücksichtigt. Die Deckungsbeiträge werden aus den detaillierteren Bestandteilen der mittelfristigen Produktionsplanung abgeleitet.

Die Restriktionen der Standortplanung (3.2) bis (3.17) bleiben erhalten, während sich die modifizierten Nebenbedingungen der mittelfristigen Produktionsplanung in (3.35) bis (3.49) wiederfinden. Unterschiede zu den ursprünglichen Restriktionen (3.19) bis (3.33) bestehen jeweils in der Betrachtung der Periode t und in einzelnen Fällen in der Umwandlung der Standortentscheidungen von Daten in Variablen. Dies betrifft die Kapazitätsrestriktionen (3.35) ($Y K_{st}^{TM}$ ersetzt $y k_{s,t=1}^{TM}$) und (3.36) ($Y P_{spt}^{TM}$ ersetzt $y p_{sp,t=1}^{TM}$), die Einhaltung der Jahresabsatzmengen (3.37) ($X D_{skpt}^{TM}$ ersetzt $x d_{skp,t=1}^{TM}$), die maximalen Zusatzkapazitäten (3.45) ($Y K_{st}^{TM}$ ersetzt $y k_{s,t=1}^{TM}$) sowie der maximale Lagerbestand (3.46) ($Y K_{st}^{TM}$ ersetzt $y k_{s,t=1}^{TM}$) und (3.47) ($Y P_{spt}^{TM}$ ersetzt $y p_{sp,t=1}^{TM}$).

3.4 Notwendigkeit einer Koordination

Um den Nutzen einer Koordination der beiden vorgestellten Planungsebenen zu belegen, müssen zunächst die Interdependenzen der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung erläutert werden.

Abbildung 3.3 zeigt die Abhängigkeiten als Inputfaktoren für die jeweilige Planungsebene. Die getroffenen Standortentscheidungen beeinflussen die mittelfristige Produktionsplanung in der Hinsicht, dass Produktionskapazitäten, Produkt-Werk-Allokationen und Jahresabsatzmengen durch die Standortplanung vorgegeben und von der mittelfristigen Produktionsplanung in den eigenen Entscheidungen berücksichtigt werden müssen.

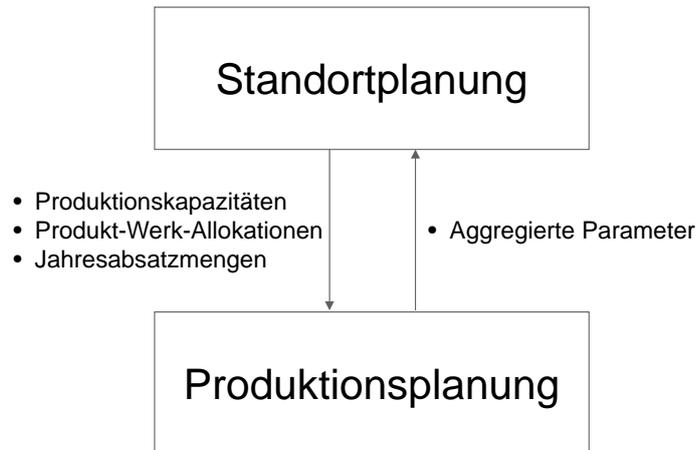


Abbildung 3.3: Interdependenzen der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung

Dementsprechend stellen die Standortentscheidungen den Rahmen für die mittelfristige Produktionsplanung dar. Im Gegensatz dazu werden aggregierte Parameter für die Standortplanung durch die mittelfristige Produktionsplanung zur Verfügung gestellt. Diese sind abhängig von den Produktionsentscheidungen und sollen auf Standortebene dazu führen, dass die Kapazitätsbedarfe der Produktion möglichst genau in die Kapazitätsentscheidungen einfließen.

Wie im Abschnitt zuvor erläutert, wäre eine Simultanplanung als Lösung wünschenswert, ist aber in den meisten Fällen nicht umsetzbar. Demzufolge müssen die Planungsebenen einzeln geplant und koordiniert werden, weshalb die Eigenschaften der vorliegenden Planungsebenen genauer betrachtet und verglichen werden müssen. Wie in Tabelle 3.1 zu erkennen ist, liegen unterschiedliche Aggregationsniveaus vor. Dies betrifft den Planungszeitraum, die Produktdimension und insbesondere die Periodenlänge. Zudem sind die bereits erwähnten Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung nur in der mittelfristigen Produktionsplanung verfügbar. Dadurch können verschiedene Probleme auftreten, die im Folgenden näher beschrieben werden.

Unterschiedliche Fristigkeiten der Planungsebenen

Die unterschiedlichen Fristigkeiten der Planungsebenen stellen in mehrerlei Hinsicht ein Problem dar. Aufgrund des langfristigen Planungszeitraumes der Standortplanung und des mittelfristigen Planungszeitraumes der Produktionsplanung lassen sich detaillierte, also in den Dimensionen der mittelfristigen Produktionsplanung, langfristige Gesamtergebnisse nicht direkt ermitteln.

3 Koordination der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung

	Langfristige Standortplanung	Mittelfristige Produktionsplanung
Planungszeitraum	Langfristig (z.B. 10 Jahre)	Mittelfristig (z.B. 1 Jahr)
Dimension einer Periode	1 Jahr	1 Monat
Dimension der Produkte	Produktgruppen	Produkte
Dimension der Kunden	Aggregierte Märkte	Aggregierte Märkte
Entscheidungen	<ul style="list-style-type: none"> - Standort-/Kapazitätsentscheidungen - Produkt-Werk-Allokationen - Jahresabsatzmengen 	<ul style="list-style-type: none"> - Produktionsmengen - Liefermengen - Rüstentscheidungen - Zusatzkapazitäten - Lagerbestand - Lost Sales - Backordermengen - Transportmengen zu anderen Werken
Restriktionen	<ul style="list-style-type: none"> - Kapazitäten - Mindestanteil der Nachfragebefriedigung - Mindestdauer Standorte / Produkt-Werk-Allokationen - Greenfield- / Brownfield-Planung 	<ul style="list-style-type: none"> - Kapazitäten - Mindestanteil der Nachfragebefriedigung - Backordermengen werden anteilig Lost Sales - Maximale Lager- und Zusatzkapazitäten - Rüstbedingungen
Zielsetzung	Max. des Kapitalwertes der entscheidungsrelevanten Kosten und Erlöse vor Steuern	Max. der Deckungsbeiträge

Tabelle 3.1: Gegenstand der betrachteten langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung

Möglich wäre eine sukzessive mittelfristige Produktionsplanung für jedes Jahr bis zum langfristigen Planungshorizont, wobei in jedem Jahr die langfristigen Standortentscheidungen einfließen. Fraglich wäre an dieser Stelle jedoch die Berücksichtigung der mittelfristigen Produktionsplanungsergebnisse in der Standortplanung. Auch sind die detaillierteren Daten der mittelfristigen Produktionsplanung für spätere Perioden der langfristigen Standortplanung entweder nicht vorhanden oder sehr unsicher. Alternativ wäre ein Gesamtmodell zu wählen, welches, wie zuvor vorgestellt, auch die Produktion langfristig betrachtet und plant, jedoch zu komplex ist.

Ein größeres Problem stellen die abweichenden Periodenlängen der Planungsebenen in Folge der unterschiedlichen Fristigkeiten dar. Die langfristig getroffenen Entscheidungen der übergeordneten Planungsebene müssen für die untergeordnete Planungsebene disaggregiert werden. Dies wird zwar durch die Angleichung der langfristigen Periodenlänge an den mittelfristigen Planungszeitraum erleichtert, löst aber nicht das Problem, dass unterschiedliche Periodenlängen und somit verschiedene Aggregationsniveaus im zeitlichen Bereich vorliegen. So sind Entscheidungen für Jahre aufzuschlüsseln, um für die untergeordnete Ebene der mittelfristigen Produktionsplanung in Monaten zur Verfügung zu stehen. Umgekehrt müssen mittelfristige Entscheidungen zeitlich für Jahre aggregiert werden, um in der übergeordneten Ebene der Standortplanung verwendet zu werden.

Aggregations- und Disaggregationsfehler

Neben der bereits erwähnten zeitlichen Aggregation muss auch für Produkte eine Aggregation vorgenommen werden. Folglich sind Entscheidungen und Daten der mittelfristigen Produktionsplanung sowohl für Jahre als auch Produktgruppen zu aggregieren und an die Standortplanung weiterzugeben. Dies führt zu Verlusten der Genauigkeit, was als Aggregationsfehler bezeichnet wird. Die überlieferten Daten an die übergeordnete Planungsebene können somit verfälschte Informationen enthalten und zu suboptimalen Ergebnissen führen, wenn diese als Vorgaben anschließend an die mittelfristige Produktionsplanung weitergegeben werden. Beispielsweise sei eine gleichgewichtete Aggregation von Produktionskoeffizienten der Produkte einer Produktgruppe genannt. Dies ist zwar eine einfache Berechnung und erfüllt ihren Zweck im Sinne der Übergabe von aggregierten Daten, bildet die tatsächlich benötigten Ressourcen in der Regel aber nicht genau ab. Eine Gewichtung der Koeffizienten mit den Produktionsmengen der einzelnen Produkte wäre beispielsweise eine bessere Aggregation und würde der Standortplanung genauere Informationen überliefern. Ein weiteres Beispiel für einen Aggregationsfehler ist die Aggregation der Nachfragedaten. Während die monatlich betrachteten Nachfragedaten Schwankungen enthalten, verschwinden diese im aggregierten Zustand für Jahre. Dies stellt besonders dann ein Problem dar, wenn sich die Nachfrage, wie im betrachteten Fall, im langfristigen Zeitverlauf ändert und in jedem Jahr unterschiedliche monatliche Schwankungen auftreten. Zudem sind die Nachfragedaten der mittelfristigen Produktionsplanung für spätere Jahre, wie erläutert, nicht vorhanden oder sehr unsicher.

Die Entscheidungen der Standortplanung sind aggregierte Größen. Werden diese nun an die mittelfristige Produktionsplanung weitergegeben und disaggregiert, können erneut Fehler entstehen. Nimmt man beispielsweise die erläuterte fixed-weight Disaggregation von Produktionsmengen anhand der Verhältnisse beim Aggregieren an (z.B. über die Nachfrageverhältnisse der jeweiligen Monate), kann dies zu unzulässigen oder schlechteren Ergebnissen führen, wenn, wie im betrachteten Fall, in jedem Jahr unterschiedliche monatliche Nachfrageschwankungen auftreten und diese zum Planungszeitpunkt für den langfristigen Planungszeitraum unsicher sind. Beispielsweise könnten in einigen Monaten nicht genügend Kapazitäten in der mittelfristigen Produktionsplanung für die vorgegebenen disaggregierten Produktionsmengen vorhanden sein oder eine Produktion wäre nur durch die Hilfe von kostenintensiven Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung möglich. Die somit vorherrschenden Inkonsistenzen von aggregierten und disaggregierten Daten müssen folglich in den Anforderungen an eine Koordination definitiv berücksichtigt werden (vgl. Steven, 1994, S. 53).

Folgekosten durch Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung auf untergeordneter Planungsebene

Während durch Aggregations- und Disaggregationsfehler bereits Probleme beim Einhalten und Nutzen von Kapazitäten entstehen können, wird dies durch die unterschiedlichen Kapazitätsentscheidungen der über- und untergeordneten Planungsebenen noch verstärkt. Wird in der Standortplanung nur über normal verfügbare Kapazitäten entschieden, stehen der mittelfristigen Produktionsplanung Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung zur Verfügung. Suboptimale Kapazitätsentscheidungen auf der übergeordneten Planungsebene können somit zu Folgekosten auf der untergeordneten Planungsebene führen.

Zur Erläuterung soll erneut das Beispiel aus 3.2 dienen, jedoch in einer etwas modifizierten Version, wie in Abbildung 3.4 zu erkennen ist. Der Standortplanung liegt in diesem Fall eine Nachfrage von 600 ME im aktuellen Jahr vor. Die monatlichen Schwankungen sind der langfristigen Planungsebene nicht bekannt, da nur mit aggregierten Werten gerechnet wird. Zur Produktion der Absatzmenge kann eine Standortkonfiguration mit einem Kapazitätslevel von 600 ME oder 720 ME pro Jahr ausgewählt werden. Um die Kosten gering zu halten, entscheidet man sich für eine Kapazität von 600 ME pro Jahr. Somit ist das Problem für die Standortplanung optimal gelöst und die Entscheidungen (Jahresabsatzmenge und verfügbare Produktionskapazitäten) werden an die mittelfristige Produktionsplanung weitergegeben, die folglich mit einer Kapazität von 50 ME pro Monat planen kann. Die nun auf mittelfristiger Planungsebene vorliegenden monatlichen Nachfragemengen (dicke schwarze Linie) folgen jedoch einem saisonalen Verlauf, der in den Monaten fünf bis acht nicht mit der vorhandenen Kapazität gedeckt werden kann. Um diese Kapazitätsmängel auszugleichen, kommen die im vorherigen Abschnitt erläuterten Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung zum Einsatz. So kann die mittelfristige Produktionsplanung trotz Schwankungen eine zulässige Lösung generieren.

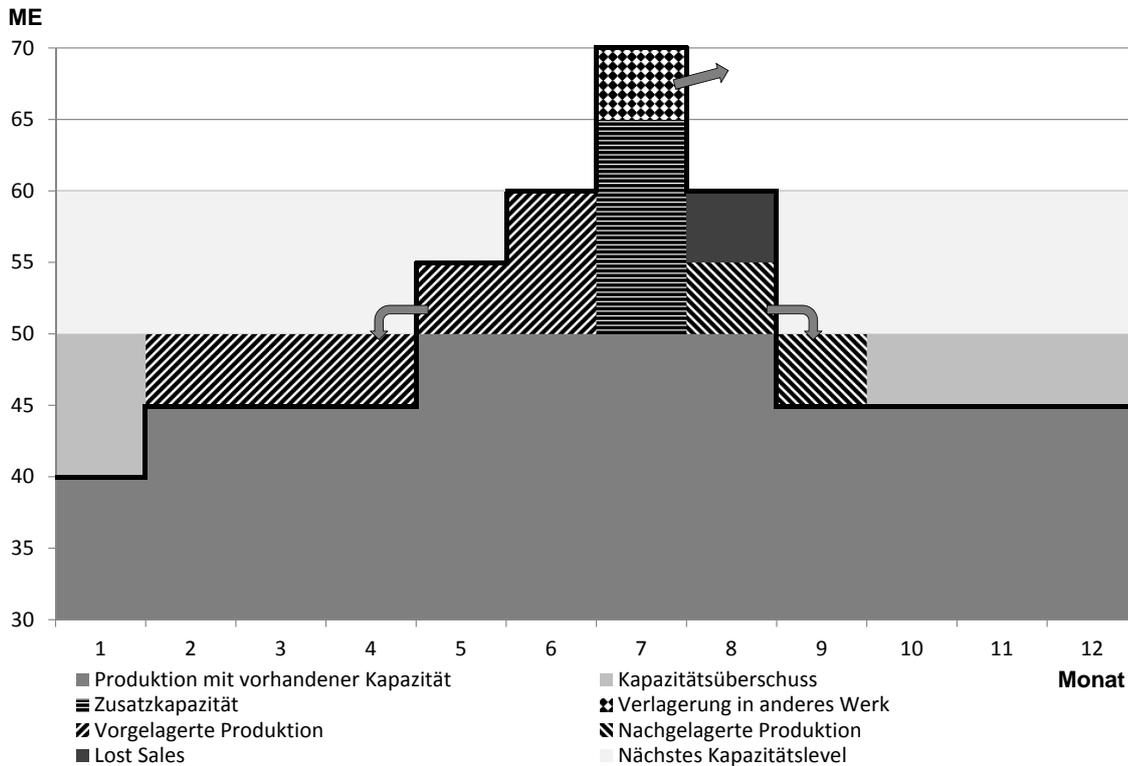


Abbildung 3.4: Modifiziertes Beispiel für Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung

Diese führt allerdings zu beträchtlichen Kosten, welche durch die Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung entstanden sind. Führt man dieses Szenario, unter Annahme ähnlich verlaufender monatlicher Nachfrageschwankungen, für die folgenden Jahre bis zum Ende des langfristigen Planungszeitraumes weiter aus, so hat die Standortplanung zwar Investitionskosten durch die kleinere Standortkonfiguration gespart, jedoch verursachen die jährlichen Folgekosten durch Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung insgesamt ein schlechteres Ergebnis.

Bei Auswahl der größeren Standortkonfiguration (siehe Abbildung 3.5) hätte die Standortplanung zwar höhere Investitionen zu tätigen, jedoch würden die zur Verfügung stehenden Kapazitäten zu deutlich geringeren Folgekosten durch Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung (im Beispiel nur Zusatzkapazitäten) und, unter der Annahme ähnlicher monatlicher Nachfrageschwankungen bis zum Planungshorizont, zu einem besseren Gesamtergebnis führen.

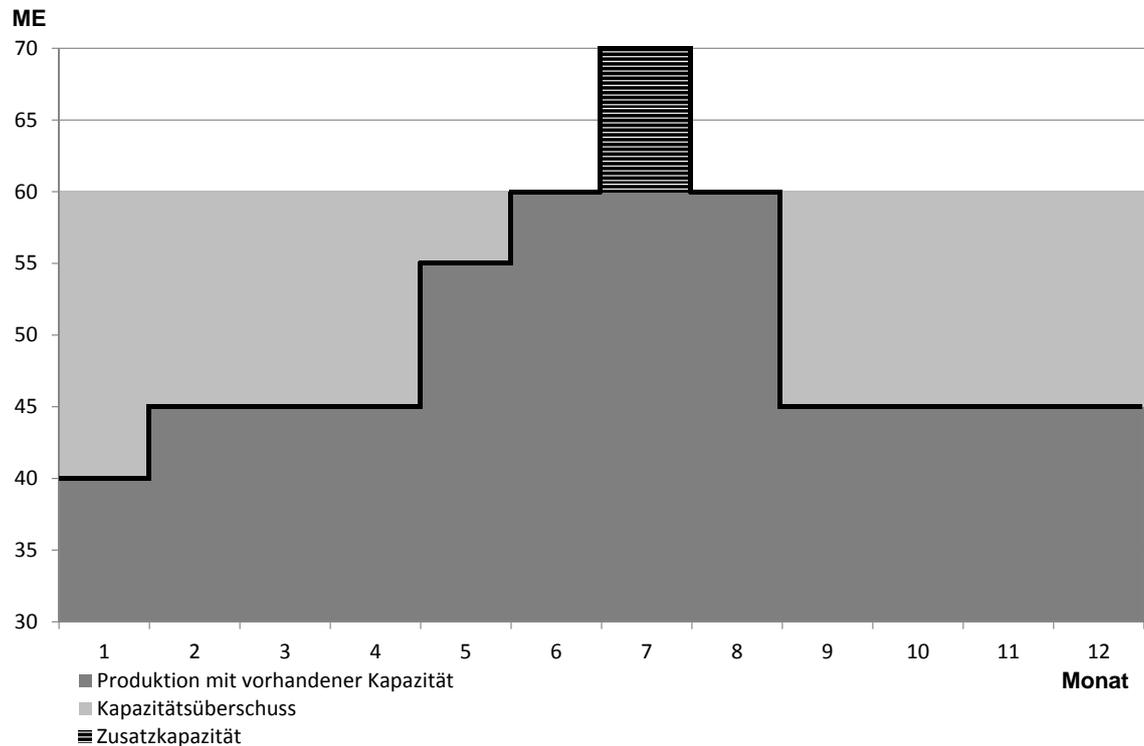


Abbildung 3.5: Beispiel für Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung mit erhöhter Kapazität

3.5 Ein Praxisbeispiel

Das folgende Beispiel eines Konsumgüterherstellers zeigt beispielhaft, dass eine Koordination zwischen der Standort- und Produktionsplanung in der Praxis besteht und zu Problemen führen kann. Zur Erörterung dieses Praxisproblems wurden mehrere Interviews mit den zuständigen Abteilungen geführt und eine Studie am Institut für Logistik und Transport angefertigt.

Das Unternehmen produziert über 5000 unterschiedliche Produkte, welche zu 16 Produktgruppen aggregiert sind, in weltweit mehr als 40 Produktionsstandorten. Die Produktion kann als Massenproduktion bezeichnet werden und bedient global mehr als 130 regionale Märkte. Als besonders markant ist zu erwähnen, dass Nachfrageausfälle in Form von Lost Sales, also dem Fall, dass bereits produzierte Ware nicht abgesetzt werden kann, hohe Kosten verursachen. Die Nachfrage unterliegt in den meisten Regionen saisonalen Schwankungen innerhalb eines Jahres. Die langfristigen Nachfrageentwicklungen unterscheiden sich je Region. Während einige Märkte relativ konstante Mengen,

abgesehen von den saisonalen Schwankungen, langfristig nachfragen, verringert sich die Nachfrage in anderen Regionen. Durch die Erschließung neuer Märkte treten auch steigende Nachfragen langfristig auf.

Aufgrund der Unternehmensgröße sind eigenständige Planungsabteilungen sowohl für die Standort- als auch Produktionsplanung zentral vorhanden, weshalb allein durch die strukturellen Gegebenheiten die Planungen getrennt betrachtet werden müssen.

Standortplanung

Die Standortplanung wird mit einem Planungszeitraum von bis zu zehn Jahren ausgeführt. Diese findet statisch für ein typisches Jahr statt. Betrachtet werden dabei aggregierte Produktgruppen und es wird eine 80%ige Durchschnittsauslastung der Maschinen angenommen. Die Planung wird als Brownfield-Planung, also mit den bestehenden Standorten durchgeführt. Als Restriktion muss sichergestellt werden, dass die Nachfrage befriedigt werden kann. Um langfristige Entscheidungen zu treffen, werden verschiedene Szenarien und Sensitivitätsanalysen, beispielsweise für Lohn- und Wechselkursschwankungen, auf Basis des typischen Jahres durchgeführt. Sollten sich dabei notwendige Standortveränderungen herauskristallisieren, ist aufgrund der statischen Planung der genaue Zeitpunkt des Strukturwechsels nicht geklärt. Um diesen abzuschätzen, werden historische Daten herangezogen. Dabei beträgt die Bauphase bis zur vollständigen Nutzung eines Werkes üblicherweise drei Jahre. Das Zielkriterium ist die Maximierung des Kapitalwertes über den gesamten Planungszeitraum. Die Planung wird rollierend durchgeführt, um jedes Jahr die bisherigen Planungsergebnisse auf Grundlage aktueller Daten zu überprüfen.

Produktionsplanung

Die mittelfristige Produktionsplanung wird für einen Planungszeitraum von sechs Monaten detailliert und für 18 bis 36 Monate grob durchgeführt. Die längerfristige Grobplanung dient den Budget- und Kapazitätsplanungen, um langfristige Vorgaben zu überprüfen. Die Periodenlänge beträgt jeweils einen Monat und die Planung findet zentral für alle Werke auf Basis der Produktgruppen statt. Als übergeordnete Anforderung ist die Nachfragebefriedigung einzuhalten. Die generierten Produktionspläne werden monatlich an die einzelnen Werke zur Detailplanung für Produkte und Wochen weitergegeben. Dabei geben die jeweiligen Werke Rückmeldungen zu Abweichungen der Nachfragen und Produktionsmengen, um die zentralen monatlichen Pläne zu aktualisieren.

Planungsablauf

Wie zu erkennen ist, herrscht zwischen der mittelfristigen und der kurzfristigen Produktionsplanung auf Werksebene ein iterativer Planungsansatz, der Rückmeldungen bezüglich Planabweichungen gibt. Wünschenswert ist ein derartiger Ansatz auch für die Koordination der Standort- und Produktionsplanung. Der übliche Planungsablauf gestaltet sich folgendermaßen:

Als Input dienen der Standortplanung aggregierte Daten für Werke aus der Produktionsplanung. Zusätzlich werden die aktuellen Kapazitäten und zugehörigen Auslastungen der Werke aus der Kapazitätsplanung, welche, wie zuvor beschrieben, für die kommenden 18 bis 36 Monate vorliegen, übernommen. Anschließend wird die statische Standortplanung durchgeführt. Sollte sich ein Strukturwechsel abzeichnen, wird dies mit der Produktionsplanung abgesprochen und ein Maschinentransferplan erstellt. Dieser regelt den zeitlichen und sachlichen Transfer von Maschinen zwischen einem alten und einem neuen Werk. Die Entscheidungen sind danach fix und werden der Produktionsplanung übergeben, welche sich diesen anpassen muss. Weitere Planungen finden anschließend rollierend statt, so dass die Standortplanung nach jedem Jahr erneut mit aktuellen Daten gespeist und die Planung wiederholt wird.

Schwachstellen der Planung

Die vorliegende Planung beider Planungsebenen weist einige Schwachstellen auf, die sowohl im praktischen Betrieb aufgefallen, als auch rein theoretisch darstellbar sind.

Zunächst besteht auch hier die Gefahr von Aggregations- und Disaggregationsfehlern durch unterschiedliche Periodenlängen der Standort- und Produktionsplanung sowie die Betrachtung von aggregierten Daten der Werke in der Standortplanung. So können im Nachhinein beispielsweise lokale Überbeanspruchungen der Kapazitäten in einem Werk auftreten.

Ein weiteres Problem stellt die statische Planung dar. Durch die Verwendung nur eines typischen Jahres wird auf eine mehrperiodige Betrachtung verzichtet, die für langfristige Entwicklungen jedoch ratsam wäre. In Folge dieser Vorgehensweise ist die zeitpunktbezogene Umsetzung von Standortänderungen nicht eindeutig geklärt und erfolgt anhand von historischen Daten manuell. Dabei ergaben sich in der Praxis enorme Probleme durch fehlende Übergangspläne für die Produktion. Derartige Übergangspläne regeln, wie die Produktion im Zeitraum einer Strukturveränderung (z.B. Schließung eines alten und Eröffnung eines neuen Werkes) ablaufen soll. Da in diesem Zeitraum nicht alle Kapazitäten zu 100% verfügbar sind, können kurzfristig Produktionsausfälle auftreten, welche zu Produktions- sowie Lieferengpässen führen. Diese könnten über Vorproduktionen oder Produktionsverlagerungen in andere Werke verhindert werden, was im aktuellen Standortplanungsmodell aber nicht berücksichtigt wird.

Auch die Vorgehensweise der Koordination ist problematisch. Zwar werden aktuelle Daten in der Standortplanung verwendet, aber letztendlich wird die Planung Top-Down, also ohne weitere Rückmeldung der Produktionsplanung, ausgeführt. Lediglich die Absprache bezüglich der Maschinentransferpläne kann als Feedback bezeichnet werden. Mögliche Reaktionen der Produktionsplanung auf Standortentscheidungen, die Folgekosten durch Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung aufgrund von Nachfrageschwankungen nach sich ziehen, werden nicht berücksichtigt. Dies zeigt auch das Beispiel der fehlenden Übergangspläne, welches zu Engpässen und Zusatzkosten in der Produktion führt.

Die im vorangegangenen Abschnitt erläuterten Probleme, die eine Koordination beider Planungsebenen erfordern, tauchen im beschriebenen Beispiel auf und unterstreichen die Notwendigkeit einer verbesserten Koordination der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung. Die Problematik der statischen Planung wird in der vorliegenden Arbeit nicht weiter behandelt, da die vorgestellten Modelle (Kapitel 3.1 und 3.2) bereits eine dynamische Planung verwenden und dementsprechend genaue Zeitpunkte für Standortveränderungen beinhalten.

3.6 Literaturüberblick

Nach der Erläuterung der Notwendigkeit einer Koordination zwischen der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung soll ein Literaturüberblick Auskunft darüber geben, inwiefern sich wissenschaftliche Arbeiten dem Thema einer gemeinsam betrachteten oder koordinierten Standort- und Produktionsplanung bereits angenommen haben.

Festzuhalten ist, dass viele Arbeiten eine Simultanplanung der Standort- und Produktionsplanung behandeln, bei denen die Planungszeiträume und Periodenlängen meist identisch sind. Insbesondere im Bereich der Automobilindustrie ist dies ein weitverbreitetes Forschungsfeld, welches zumeist als SC Design oder Netzwerkplanung bezeichnet wird. Aus diesem Grund beschränkt sich der folgende Literaturüberblick auf aktuelle Arbeiten bzw. Arbeiten der jüngeren Vergangenheit, die eine Simultanplanung verwenden. Daneben beschäftigen sich einige wenige Arbeiten auch mit einer HP der Standort- und Produktionsplanung. Diese Arbeiten werden anschließend ebenfalls vorgestellt.

Simultanplanung

Erste grundlegende und umfangreiche Arbeiten im Bereich eines strategischen SC Designs finden sich bei Arntzen et al. (1995). Das entwickelte Modell betrachtet die globale strategische Netzwerkplanung und fällt Entscheidungen über Standorte, Produkt-Werk-Allokationen, Produktions- und Transportmengen sowie Lagerbestände. Wichtig ist jedoch zu erwähnen, dass die Entscheidungen bezüglich der Standorte und Produkt-Werk-Allokationen nicht dynamisch sind, sondern zu Beginn für den gesamten Planungszeitraum festgelegt werden. Im Zuge der globalen Betrachtung werden insbesondere Zölle und Local Content Bestimmungen beachtet. Als Anwendungsbeispiel dient ein Industrieunternehmen, bei dem die Planung für einen Planungszeitraum von 18 Monaten und eine Periodenlänge von einem Monat ausgeführt wird und zu deutlich reduzierten Kosten führt.

Wilhelm et al. (2005) stellen ein integriertes statisches Standort- und dynamisches Produktionsplanungsmodell unter North American Free Trade Agreement (NAFTA) Bedingungen vor. Dadurch werden besonders globale Eigenschaften, wie Zölle, Steuern oder Transferpreise betrachtet. Entschieden wird über die Standort- und Distributionsstruk-

tur, welche jedoch statisch geplant, also zu Beginn des Planungszeitraumes für den gesamten Zeitraum festgelegt werden, sowie über Lagerbestände, Produktions-, Backorder- und Transportmengen. Ein Rechenbeispiel zeigt die Anwendung des Modells auf einen Planungszeitraum von drei Jahren mit jeweils einem Jahr als Periodenlänge. Positiv zu erwähnen ist in diesem Fall die Tatsache, dass mit Lagerbeständen und Backordermengen bereits zwei mögliche Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung in der Standortplanung betrachtet werden, wenn auch nicht mit unterschiedlichen Fristigkeiten.

Fleischmann et al. (2006) stellen ein strategisches dynamisches Modell zur Investitions- und Kapazitätsplanung für das globale Produktionsnetzwerk von BMW vor. Dabei werden Produktionskapazitäten, Produkt-Werk-Allokationen und Zusatzkapazitäten sowie Liefer- und Produktionsmengen festgelegt. Die Periodenlänge beträgt ein Jahr bei einem Planungszeitraum von zwölf Jahren. Die Praxisanwendung des Modells bei BMW zeigt deutliche Effizienzsteigerungen in der Entscheidungsfindung und soll zu Kosteneinsparungen von bis zu sieben Prozent führen.

Melo et al. (2006) entwickeln ein mathematisches Modell zur strategischen dynamischen Standort- und Kapazitätsplanung. Neben der Standortentscheidung werden Produktions- und Liefermengen sowie Lagerbestände festgelegt. Zudem können Produktionsmengen in andere Werke verlagert oder von einem externen Lieferanten zugekauft werden. Als Modellerweiterungen werden Kapazitätserweiterungen und -reduzierungen sowie modulare Kapazitätstransfers, beispielsweise durch Maschinentransfers zwischen bestehenden und neuen Standorten, vorgestellt. Auch in diesem Fall werden gleiche Periodenlängen und der gleiche Planungszeitraum für alle Entscheidungen angenommen. Testrechnungen und Sensitivitätsanalysen vergleichen die entwickelten Modellvarianten abschließend.

Bundschuh (2008) befasst sich mit der strategischen Planung von Produktionssystemen in der Automobilindustrie. Dabei bezieht sich der Autor insbesondere auf die Module Motor, Fahrwerk und Antriebsstrang. Das sehr umfassende Modell betrachtet dabei die langfristige Standort-, Anlagen-, Werksstruktur-, Flexibilitäts-, Personal- und Materialflussplanung. Der Planungszeitraum beträgt mehrere Jahre und eine Periodenlänge von einem Jahr wird angenommen. Die entwickelten Modellbausteine verwenden mit Ausnahme der zeitlichen Dimension unterschiedliche Aggregationsniveaus. Mit dem zusätzlich entwickelten Optimierungstool können je nach Bedarf einzelne Modellbausteine aktiviert oder deaktiviert werden. So ist es möglich, nur bestimmte Planungen auf einem Aggregationslevel durchzuführen. Abschließende Testrechnungen und die Anwendung in der Praxis zeigen die Leistungsfähigkeit des Modells.

Kohler (2008) präsentiert ein multikriterielles deterministisches Modell für das globale SC Design. Dieses berücksichtigt insbesondere globale Eigenschaften einer SC wie Zölle, Wechselkursschwankungen oder Local Content Bedingungen. Entscheidungen werden bezüglich der Standorte, Kapazitäten, Budgets, Produkt-Werk-Allokationen und der Materialflüsse getroffen. Die Planung geschieht für einen langfristigen Planungszeitraum

und betrachtet Jahre als Teilperioden. Eine entwickelte Optimierungssoftware zeigt in einem Fallbeispiel die bessere Performance im Vergleich zu Standardsolvern.

In ihren beiden Arbeiten entwickelt Kauder (Kauder (2008) sowie Kauder und Meyr (2009)) ein dynamisches Modell für die strategische Netzwerkplanung eines internationalen Automobilherstellers. Die Hauptbestandteile sind dabei Investitionsplanungen, SC Planungen und Prozessflexibilitäten im Sinne von Jordan und Graves (1995). Dabei werden in erster Linie Kapazitätsentscheidungen und Produkt-Werk-Allokationen festgelegt, wovon die weiteren Entscheidungen zur Beschaffung, Produktion und Distribution abhängen. Der Planungszeitraum beträgt mehrere Jahre und die Periodenlänge entspricht einem Jahr, weshalb auch in diesem Fall von einer langfristigen Produktionsplanung gesprochen werden kann. Ein besonderes Augenmerk wird auf die Prozessflexibilität gelegt. Durch zusätzliche Nebenbedingungen werden Produkt-Werk-Allokationen sinnvoll verkettet, so dass insgesamt eine höhere Absicherung gegenüber Unsicherheiten vorliegt. Zur effizienteren Lösung des vorgestellten Modells entwickelt Kauder Verfahren, die auf Basis einer Startlösung, Verbesserungen durch eine lokale Suche liefern. Testrechnungen belegen eine bessere Performance der erstellten Verfahren gegenüber Standardsolvern. Zudem wird anhand von mehreren Szenarien die Robustheit der Lösungen überprüft.

Manzini und Gebennini (2008) entwickeln verschiedene Modellvariationen einer integrierten dynamischen Standort- und Produktionsplanung. Entscheidungen werden über Standorte, Kapazitäten, Produktions- und Backordermengen sowie Lagerbestände getroffen. Dabei variieren die Modelle bezüglich der betrachteten Transportstufen (Werk, Distributionszentren und Märkte) und der Anzahl an Produkten. Ein Fallbeispiel wendet die verschiedenen Varianten anschließend für einen mittelfristigen Planungszeitraum von einem Jahr mit zweiwöchigen Perioden an.

Bihlmaier et al. (2009) behandeln die strategische und taktische Produktionsplanung in der Automobilindustrie unter Unsicherheit. Dazu wird ein deterministisches Modell zur integrierten strategischen Kapazitäts- und taktischen Personalplanung entwickelt. Das Modell entscheidet über Kapazitäten, Produkt-Werk-Allokationen, Produktions- und Transportmengen sowie Erweiterungen oder Reduzierungen der Kapazität durch organisatorische Maßnahmen. Die Erweiterungen oder Reduzierungen der Kapazität durch organisatorische Maßnahmen werden in einer Modellerweiterung durch detailliertere Personalentscheidungen ersetzt. Dadurch soll die taktische Personalplanung besser antizipiert werden. Dabei wird für beide Modellteile der gleiche Planungszeitraum und die gleiche Periodenlänge angenommen. Um anschließend der Unsicherheit gerecht zu werden, wird das entwickelte Modell in ein stochastisches Modell umgeformt. Als Lösungsmethode dient ein Algorithmus mit einer Benders Dekomposition. Die abschließenden Testrechnungen zeigen eine Reduzierung der Lösungsdauer im Vergleich zu Standardsolvern.

Gneiting (2009) beschäftigt sich mit dem SC Design eines Automobilherstellers mit besonderem Fokus auf modulare Fahrzeugarchitekturen. Der Autor entwickelt drei Modelle

zur strategischen Planung einer SC. Diese sind ein grundlegendes Modell des SC Designs sowie ein Logistik- und Vormontagemodell, welche vor, nach oder simultan mit dem grundlegenden Modell gelöst werden können. Entscheidungen sind unter anderem für Kapazitätsstufen und Produkt-Werk-Allokationen zu treffen. Besonders beachtet werden in den Logistik- und Vormontagemodellen Transport- bzw. Logistik- und Montageentscheidungen, welche den Bezug zur Modularität herstellen und detaillierter geplant werden. Die Planung findet für einen Zeitraum von mehreren Jahren statt und nimmt dazu ein Jahr als Periodenlänge an. Zur Entscheidungsunterstützung wird eine Software erstellt, welche die vorgestellten Modelle simultan oder sukzessiv ausführen und visualisieren kann.

Wittek entwickelt in seinen Arbeiten (Wittek et al. (2010) und Wittek (2013)) ein mittelfristiges dynamisches deterministisches Modell für die standortübergreifende Programmplanung in der Automobilindustrie, wobei ein besonderer Fokus auf der Flexibilität der Produktion liegt. Zwar finden im Modell keine Standortentscheidungen statt, jedoch werden die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung verwendet. Folglich sind Entscheidungen unter anderem über Produktions- und Backordermengen sowie Lagerbestände und Zusatzkapazitäten zu treffen. Das Modell wird in zwei Varianten vorgestellt: Die erste Variante beinhaltet zwei Zeitindizes, die angeben in welcher Periode eine Produktion stattfindet und für welche Periode diese bestimmt ist. Die zweite Variante nutzt nur einen Zeitindex. Zur Berücksichtigung der Flexibilität wird zudem über Produkt-Werk-Allokationen entschieden. Der Planungszeitraum beträgt 12 bis 24 Monate und es wird eine Periodenlänge von einem Monat angenommen. Zur besseren Lösbarkeit des Modells verwendet der Autor Preprocessing-schritte sowie beispielsweise eine Aggregation von Monaten zu Quartalen. Anschließend wird das Modell durch verschiedene Testszenarien und Sensitivitätsanalysen validiert.

Sharkey et al. (2011) entwickeln ein einfaches integriertes dynamisches Standort- und Produktionsplanungsmodell. Es werden Standortentscheidungen, Produkt-Werk-Allokationen, Produktions- und Liefermengen sowie Lagerbestände betrachtet. Dabei werden alle Entscheidungen für einen langfristigen Planungszeitraum mit identischen Periodenlängen für die Standort- und Produktionsplanung getroffen. Um das Modell schneller zu lösen, wird ein Branch-and-Price-Algorithmus in Verbindung mit einer Set-Covering-Formulierung vorgestellt. Ausführliche Rechentests zeigen eine bessere Performance gegenüber Standardsolvern.

Hierarchische Planung

Sabri und Beamon (2000) entwickeln einen Ansatz zur Planung des strategischen und operativen SC Designs. Dazu wird zuerst ein statisches strategisches Standortplanungsmodell entworfen, das insbesondere Standorte sowie Transportmengen zwischen Lieferanten, Werken, Distributionszentren und Märkten festlegt. Das zweite Modell wird durch ein statisches stochastisches kurzfristiges Produktionsplanungsmodell gebildet, welches die Ergebnisse der Standortplanung berücksichtigt und beispielsweise optima-

le Losgrößen berechnet. Die Koordination beider Planungsebenen geschieht über einen iterativen Datenaustausch der Planungen, bis sich die Ergebnisse der Standortplanung nicht mehr verändern. Dabei wird von unterschiedlichen Fristigkeiten ausgegangen. Numerische Rechenbeispiele zeigen in Verbindung mit einer Sensitivitätsanalyse die Leistungsfähigkeit des Modells.

Ein dynamischer hierarchischer Vier-Ebenen-Planungsansatz wird von Timm in zwei Arbeiten vorgestellt (Timm (2008) sowie Timm und Blecken (2011)), wobei jedes Modell ein erweitertes Multi Level Capacitated Lot Sizing Problem (MLCLSP) darstellt. Die oberste Planungsebene plant die Struktur eines Fertigungssystems, indem Fertigungsprozesse und Maschinenbestände für vordefinierte Standorte festgelegt sowie Lagerbestände, Produktions- und Backordermengen bestimmt werden. Die Personalplanung folgt auf der zweiten Planungsebene und verwendet den gleichen Planungszeitraum und die gleiche Periodenlänge wie die oberste Planungsebene. Die dritte Planungsebene definiert Lagerstufen sowie Meldebestände und besitzt im Gegensatz zu den ersten beiden Planungsebenen einen kürzeren Planungszeitraum und kleinere Periodenlängen. Die unterste Planungsebene verwendet die gleichen Fristigkeiten wie die dritte Planungsebene und bestimmt optimale Losgrößen. Es werden unterschiedliche Szenarien angenommen und in die jeweiligen Modelle mit Eintrittswahrscheinlichkeiten eingebunden. Zur Koordination dient die HP in der Darstellung nach Schneeweiß, wodurch die jeweils getroffenen Entscheidungen an die untergeordnete Planungsebene weitergegeben werden. Allerdings enthält der Planungsansatz keine Antizipation. Zur Validierung wird der Planungsansatz für ein Unternehmen der Schienenfahrzeugindustrie angewendet. Dabei werden für die oberen beiden Planungsebenen Periodenlängen von zwei Wochen und ein Planungszeitraum von insgesamt 40 Wochen angenommen. Dementsprechend kann nicht von einer langfristigen, sondern eher von einer mittelfristigen Planung gesprochen werden. Die unteren beiden Planungsebenen nehmen als Periode eine Schicht von einem Tag und als Planungszeitraum sechs Wochen an. Die Ergebnisse zeigen, dass die Modelle in der Praxis anwendbar sind und zuverlässige Ergebnisse liefern, um Kosten zu reduzieren.

Dürksen (2011) stellt ebenfalls einen hierarchischen Planungsansatz mit vier Planungsebenen innerhalb eines Produktionsnetzwerkes wie Timm (2008) vor. Dabei wird für jede Planungsebene ein eigenständiges Optimierungsmodell aufgestellt. Die beiden oberen Planungsebenen treffen qualitative und quantitative Kapazitätsentscheidungen für das gesamte Netzwerk. Die unteren zwei Planungsebenen setzen die quantitativen Kapazitätsanforderungen in einem Maschinenpark und in der Personalplanung um. Die HP in der Darstellung nach Schneeweiß wird durch Instruktionen und Reaktionen über die vier Planungsebenen umgesetzt. Zusätzlich werden nicht-reaktive Antizipationsfunktionen für die jeweils übergeordneten Planungsebenen vorgestellt, welche die darunterliegende Planungsebene im Hinblick auf Kapazitäten berücksichtigen. So antizipiert beispielsweise die oberste Planungsebene, welche die Festlegung der qualitativen Kapazitätsanforderungen bestimmt, die Kapazitätsobergrenzen der untergeordneten Planungsebene. Dies erfolgt durch eine Aggregation von Daten der untergeordneten Planungsebene. Der

Planungszeitraum und die Periodenlängen ändern sich je Planungsebene und werden in einem Anwendungsbeispiel ausgehend von 20 Quartalen (Quartal als Periodenlänge) in der obersten Planungsebene über 24 Monate (Monat als Periodenlänge) in der darunterliegenden Planungsebene auf 52 Wochen (Woche als Periodenlänge) in den beiden unteren Planungsebenen heruntergebrochen. Die prototypische Anwendung des hierarchischen Planungsansatzes auf mehrere Fallbeispiele aus der Praxis liefert zuverlässige Ergebnisse.

Die vorgestellten Arbeiten, die eine Simultanplanung mit Standort- und Produktionsentscheidungen behandeln, verwenden zumeist langfristige Planungszeiträume. Festzustellen ist jedoch, dass in keinem Ansatz unterschiedliche Periodenlängen für die Standort- und Produktionsplanung angenommen werden. Zwar nutzen beispielsweise Bihlmaier et al. (2009) eine disaggregiertere Version der Produktionsplanung als Antizipation, jedoch bleibt die zeitliche Periodenlänge unverändert.

Im Gegensatz dazu berücksichtigen die Arbeiten mit einer HP unterschiedliche Planungszeiträumen und Periodenlängen der Planungsebenen, wobei jedoch eine kurzfristige Produktionsplanung (Sabri und Beamon (2000)) oder eine mittelfristige Standort- bzw. Fertigungssystemplanung (Timm (2008) sowie Timm und Blecken (2011)) betrachtet wird. Einen interessanten Ansatz liefert das Modell von Dürksen (2011), da es die HP in der Darstellung nach Schneeweiß aufgreift und langfristige sowie mittelfristige Entscheidungen einbezieht. Die besondere Fokussierung auf Kapazitätsanforderungen und die Vernachlässigung von Lagerbeständen zeigen jedoch deutliche Unterschiede zu den hier vorgestellten Modellen der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung. Zudem sollen im weiteren Verlauf der Arbeit, im Gegensatz zu den von Dürksen entwickelten nicht-reaktiven Antizipationsfunktionen, reaktive Antizipationsfunktionen aufgestellt und für die Koordination der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung genutzt werden. Die Tabellen 3.2, 3.3, 3.4 und 3.5 fassen die Eigenschaften der Ansätze nochmal zusammen.

Demnach ist dem Autor dieser Dissertation nach bestem Wissen und Gewissen kein Ansatz bekannt, der eine Koordination der langfristigen Standortplanung und mittelfristigen Produktionsplanung behandelt.

Der dadurch entstehende Handlungsbedarf zur Entwicklung einer neuen hierarchischen Koordinationsform für die langfristige Standort- und mittelfristige Produktionsplanung ist zusätzlich durch die Ausblicke und Hinweise auf zukünftige Forschungsthemen von Melo et al. (2009) sowie Funaki (2009) motiviert. In ihrem Review über Standortplanung und SCM verweisen Melo et al. (2009) auf zukünftige Forschungsthemen im Bereich der integrierten Planung von strategischen und taktischen bzw. operationalen Entscheidungen in der SC. Besonders die Auswirkungen von strategischen Entscheidungen auf nachgelagerte taktische oder operationale Entscheidungen sollten Beachtung finden, da beispielsweise Strafkosten durch Kapazitätsengpässe entstehen können (vgl. Melo et al.,

2009, S. 410). Ebenso erwähnt Funaki (2009) in seiner Studie über kommerzielle Software für SC Design, dass eine bessere Verknüpfung von strategischen und operativen Entscheidungen eine sinnvolle Erweiterung für bestehende Planungssoftware darstellt. Dies betrifft die Einbeziehung aktueller operativer Daten und die Berücksichtigung von Konsequenzen auf untergeordneten Planungsebenen, die durch strategische Entscheidungen bewirkt werden. Beispielsweise sollte die strategische Planung bei der Wahl eines Zeitpunktes für Standortänderungen darauf achten, dass eine Strukturveränderung zu diesem Zeitpunkt auch auf der operationalen Planungsebene zu zulässigen Lösungen führt (vgl. Funaki, 2009, S. 18-20). Beide Arbeiten machen also deutlich, dass die Antizipation der Auswirkungen der Standortentscheidungen auf die untergeordnete(n) Planungsebene(n) bereits in die Standortplanung einfließen sollten. Ferner ist eine mehrperiodige Standortplanung anzustreben, um die zeitliche Entwicklung der SC-Struktur (mit den Investitions- und Desinvestitionsentscheidungen) zu erfassen und zu bewerten.

Autor	Planungsebenen	Fristigkeiten	Entscheidungen	Besonderheiten
Arntzen et al. (1995)	Integrierte strategische Netzwerkplanung	Dynamisch, Planungszeitraum: 18 Monate, Periodenlänge: 1 Monat	Standorte, Produkt-Werk-Allokationen, Produktions- und Transportmengen, Lagerbestände	Statische Planung der Standorte und Produkt-Werk-Allokationen
Sabri und Beamon (2000)	Strategische Standortplanung / Operative Produktionsplanung	Statisch / Statisch stochastisch, Planungszeitraum: n.a. / n.a. (untersch.), Periodenlänge: n.a. / n.a. (untersch.)	Standorte, Produktions- und Transportmengen, Losgrößen	Statisch stochastische operative Produktionsplanung
Wilhelm et al. (2005)	Integrierte strategische globale Standort- und Produktionsplanung	Statisch und dynamisch, Planungszeitraum: 3 Jahre, Periodenlänge: 1 Jahr	Standorte, Distributionsstruktur, Produktions-, Backorder- und Transportmengen, Lagerbestände	Statische Planung der Standorte und Distributionsstruktur
Fleischmann et al. (2006)	Integrierte strategische globale Investitions- und Kapazitätsplanung	Dynamisch, Planungszeitraum: 12 Jahre, Periodenlänge: 1 Jahr	Produktionskapazitäten, Produkt-Werk-Allokationen, Zusatzkapazitäten, Liefer- und Produktionsmengen	-

Tabelle 3.2: Literaturüberblick zur Koordination der Standort- und Produktionsplanung - Teil 1
(n.a. = nicht angegeben)

Autor	Planungsebenen	Fristigkeiten	Entscheidungen	Besonderheiten
Melo et al. (2006)	Integrierte strategische Standort- und Kapazitätsplanung	Dynamisch, Planungszeitraum: n.a., Periodenlänge: n.a.	Standorte, Produktions- und Liefermengen, Lagerbestände, Produktionsverlagerungen, Kapazitätserweiterungen, -reduzierungen und -transfers	-
Bundschuh (2008)	Integrierte strategische Standort-, Anlagen-, Werksstruktur-, Flexibilitäts-, Personal- und Materialflussplanung	Dynamisch, Planungszeitraum: mehrere Jahre, Periodenlänge: 1 Jahr	Standorte, Kapazitäten, Produkt-Werk-Allokationen, Produktionsmengen, Materialflüsse, Personal	Unterschiedliche Aggregationsniveaus (außer Fristigkeiten) je Modellbaustein
Kohler (2008)	Integrierte strategische Planung des SC Designs	Dynamisch, Planungszeitraum: mehrere Jahre, Periodenlänge: 1 Jahr	Standorte, Kapazitäten, Budgets, Produkt-Werk-Allokationen, Materialflüsse	-
Kauder (2008) bzw. Kauder und Meyr (2009)	Integrierte strategische Netzwerkplanung	Dynamisch, Planungszeitraum: mehrere Jahre, Periodenlänge: 1 Jahr	Standorte, Kapazitäten, Produkt-Werk-Allokationen, Entscheidungen der Beschaffung, Produktion und Distribution	Prozessflexibilität
Manzini und Gebennini (2008)	Integrierte strategische Standort- und Produktionsplanung	Dynamisch, Planungszeitraum: 1 Jahr, Periodenlänge: 2 Wochen	Standorte, Kapazitäten, Produktions- und Backordermengen, Lagerbestände	-

Tabelle 3.3: Literaturüberblick zur Koordination der Standort- und Produktionsplanung - Teil 2 (n.a. = nicht angegeben)

Autor	Planungsebenen	Fristigkeiten	Entscheidungen	Besonderheiten
Timm (2008) bzw. Timm und Blecken (2011)	Taktische Planung des Fertigungssystems / Personalplanung / Operative Planung der Lagerstufen / Losgrößenplanung	Dynamisch auf allen Planungsebenen, Planungszeitraum: 40 / 40 / 6 / 6 Wochen, Periodenlänge: 2 / 2 Wochen / 1 / 1 Tag	Fertigungsprozesse, Maschinenbestände für Standorte, Produktions- und Backordermengen, Lagerbestände, Personal, Lagerstufen, Losgrößen	Anwendung der HP in der Darstellung nach Schneeweiß
Bihlmaier et al. (2009)	Integrierte strategische Standort- und Produktionsplanung	Dynamisch, Planungszeitraum: n.a. / n.a. (identisch), Periodenlänge: n.a. / n.a. (identisch)	Kapazitäten, Produkt-Werk-Allokationen, Produktions- und Transportmengen, Kapazitätserweiterungen- und reduzierungen	Unterschiedliche Aggregationsniveaus (außer Fristigkeiten) je Planungsebene
Gneiting (2009)	Strategische Planung des SC Designs / Logistik- und Vormontageplanung	Dynamisch, Planungszeitraum: mehrere Jahre / mehrere Jahre, Periodenlänge: 1 Jahr / 1 Jahr	Kapazitäten, Produkt-Werk-Allokationen, Transporte, Logistik- und Montageentscheidungen	Simultane oder sukzessive Planung möglich, Unterschiedliche Aggregationsniveaus (außer Fristigkeiten) je Planungsebene

Tabelle 3.4: Literaturüberblick zur Koordination der Standort- und Produktionsplanung - Teil 3
(n.a. = nicht angegeben)

Autor	Planungsebenen	Fristigkeiten	Entscheidungen	Besonderheiten
Dürksen (2011)	Strategische Qualitative Kapazitätsplanung / Quantitative Kapazitätsplanung / Operative Kapazitätsplanung des Maschinenparks / Personalplanung	Dynamisch auf allen Planungsebenen, Planungszeitraum: 20 Quartale / 24 Monate / 52 / 52 Wochen, Periodenlänge: 1 Quartal / 1 Monat / 1 / 1 Woche	Kapazitäten, Kapazitäten im Maschinenpark, Personal	Anwendung der HP in der Darstellung nach Schneeweiß mit Antizipationsfunk- tionen
Sharkey et al. (2011)	Integrierte strategische Standort- und Produktionsplanung	Dynamisch, Planungszeitraum: n.a., Periodenlänge: n.a.	Standorte, Produkt-Werk-Allokationen, Produktions- und Liefermengen, Lagerbestände	-

Tabelle 3.5: Literaturüberblick zur Koordination der Standort- und Produktionsplanung - Teil 4
(n.a. = nicht angegeben)

3.7 Voraussetzungen und Anforderungen an eine Koordination

Der Literaturüberblick verdeutlicht, dass bisher keine wissenschaftliche Arbeit existiert, die die beschriebenen Ebenen der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung ausreichend koordiniert. Aus diesem Grund werden im folgenden Abschnitt die Voraussetzungen und Anforderungen an eine Koordination der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung zusammengefasst.

Voraussetzungen

Um eine Koordination der beiden Planungsebenen durchführen zu können, muss zuallererst die *Verfügbarkeit der Daten* sichergestellt sein. Dies betrifft beispielsweise aktuelle Absatzprognosen aus der Absatzplanung oder aktuelle Kostensätze aus den operativen Planungsebenen. Mit diesen Daten können genaue Berechnungen durchgeführt werden.

Dabei spielt die *Konsistenz der verwendeten Daten* eine große Rolle. Eine Koordination liefert nur dann zuverlässige Ergebnisse, solange auch die in den Planungsebenen verwendeten Daten konsistent sind und folglich keine gravierenden Abweichungen auf den jeweiligen Planungsebenen auftreten. Liegen beispielsweise detaillierte Daten für die mittelfristige Produktionsplanung vor, lassen sich diese aggregieren und der langfristigen Standortplanung zur Verfügung stellen. Somit sind die verwendeten Daten auf beiden Planungsebenen konsistent und eventuelle Fehler tauchen nur im Sinne von Aggregations- oder Disaggregationsfehlern auf.

Als letzte Voraussetzung muss gewährleistet sein, dass *die für die Antizipation der untergeordneten Planungsebene notwendigen Daten der übergeordneten Planungsebene zur Verfügung gestellt werden*. Dies ist notwendig, um mögliche Auswirkungen der Standortentscheidungen auf die mittelfristige Produktionsplanung abzuschätzen und bewertbar zu machen.

Anforderungen

Wie die Problemschilderung des Praxisbeispiels zeigt, ist es sinnvoll (perioden-)genaue Zeitpunkte von Standortveränderungen festzulegen, um Produktionspläne für den Zeitraum des Strukturwechsels zu erstellen. So können Engpässe und daraus folgende Kosten vermieden werden. Dies erfordert eine *dynamische Planung* sowohl auf der übergeordneten Ebene der Standortplanung als auch auf der untergeordneten Ebene der mittelfristigen Produktionsplanung. Da die vorgestellten Optimierungsmodelle eine dynamische Planung berücksichtigen, ist diese Anforderung bereits erfüllt.

Die Koordination muss die unterschiedlichen Aggregationsniveaus der Planungsebenen beachten und die Daten in angemessenem Zustand übergeben. Folglich ist eine *sinnvolle Aggregation* von detaillierten Daten der untergeordneten Planungsebene und eine *sinnvolle Disaggregation* von aggregierten Daten der übergeordneten Planungsebene nötig. Die detaillierten Daten sind so zu aggregieren, dass sie die detaillierten Informationen möglichst genau in komprimierter Form wiedergeben und Aggregationsfehler weitestge-

hend vermeiden. Dies muss durch eine passende Berechnung sichergestellt werden. Ebenso müssen die aggregierten Daten der übergeordneten Planungsebene möglichst ohne Disaggregationsfehler in der untergeordneten Planungsebene verwendet werden können. Das ist durch eine angemessene Disaggregation sicherzustellen.

Bezüglich der Folgekosten durch Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung sind Auswirkungen der Standortentscheidungen auf die mittelfristige Produktionsplanung zu antizipieren. Diese *Antizipation* ist direkt in der Standortplanung zu berücksichtigen. So sollen Folgekosten direkt in Verbindung mit einer Standortplanung berechnet und in die endgültige Standortentscheidung einbezogen werden. Dies hat den Vorteil, dass die Standortplanung bereits eine gute Startlösung generiert, die unzulässige oder suboptimale Entscheidungen für die mittelfristige Produktionsplanung vermeidet und letztendlich ein besseres Gesamtergebnis über den langfristigen Planungszeitraum generiert. An dieser Stelle muss ein geeigneter Kompromiss zwischen dem Detaillierungsgrad der Antizipation und dem damit verbundenen erhöhten Rechenaufwand in der Standortplanung gefunden werden.

Da die langfristigen Entscheidungen der Standortplanung allerdings über den mittelfristigen Planungszeitraum der Produktionsplanung hinaus gehen, sind die positiven Effekte der Antizipation in der Standortentscheidung möglicherweise nicht direkt zu erkennen, wenn die Produktionsplanung nur mit einem mittelfristigen Planungszeitraum ausgeführt wird. Aus diesem Grund muss der Koordinationsansatz eine Möglichkeit bieten, ein *langfristiges Gesamtergebnis* zu berechnen, um im Rahmen dieser Arbeit die positiven Auswirkungen einer Antizipation zu belegen.

Um die Koordination neben einer Aggregation und Disaggregation sowie Antizipation weiter zu verbessern, sollte der Koordinationsansatz die Planungsebenen abwechselnd *iterativ* lösen. So können neue Ergebnisse einer Planungsebene und dementsprechend auch neue aggregierte oder disaggregierte Daten in die jeweils andere Planungsebene einfließen. Damit wird sichergestellt, dass beispielsweise die Standortplanung nicht nur die zu Beginn berechneten aggregierten Daten verwendet, sondern im nächsten Planungsdurchgang auch den aktualisierten Produktionsplan sowie die zugehörigen neuen aggregierten Daten berücksichtigt. Umgekehrt ist dies auch der Fall, indem die mittelfristige Produktionsplanung die neuen Entscheidungen der Standortplanung einbezieht. Ein derartiger iterativer Planungsansatz sollte so lange wiederholt werden, bis keine signifikant bessere Gesamtlösung mehr zu erwarten ist. Auch in diesem Fall müsste eine Berechnung des langfristigen Gesamtergebnisses zur Verfügung stehen.

Zwar ist es möglich, mit diesen Anforderungen eine Lösung für den aktuellen Planungszeitpunkt zu finden, aber zukünftige Entwicklungen und unsichere Daten, beispielsweise der Nachfrage, stellen weiterhin ein Problem dar. An dieser Stelle bietet sich eine *rollierende Planung* auf langfristiger Basis an. Als gefrorene Zone soll ein Jahr angenommen werden, für das die getroffenen Entscheidungen sowohl der Standort- als auch mittelfristigen Produktionsplanung umgesetzt werden. Die folgenden Jahre bis zum Ende des Planungszeitraumes werden zwar geplant, aber noch nicht umgesetzt. Anschließend soll

nach einem Jahr der Koordinationsansatz erneut mit aktuellen Daten für die Standort- und mittelfristige Produktionsplanung durchgeführt werden.

Ziele

Das Ziel der Koordination ist die abgestimmte Optimierung beider Planungsebenen, wobei zusätzliche Kosteneinsparungen und somit ein besseres Gesamtergebnis erreicht werden sollen. Insbesondere durch die Antizipation soll eine erhöhte Abbildungsgenauigkeit der Prozesse der untergeordneten Planungsebene und somit eine verbesserte Bereitstellung und Nutzung der Kapazitäten erzielt werden.

4 Übertragung des Konzepts der hierarchischen Planung auf die langfristige Standort- und mittelfristige Produktionsplanung

4.1 Hierarchische Planungsstruktur

In diesem Kapitel wird das Konzept der HP in der Darstellung nach Schneeweiß (siehe Kapitel 2.2) auf die langfristige Standort- und mittelfristige Produktionsplanung angewendet.

Zur Einordnung kann das vorliegende hierarchische Planungssystem als *Mischform aus konstruiertem und organisatorischem System* definiert werden. Der konstruierte Systemteil leitet sich aus der teilweisen Informationssymmetrie und den zeitlich gleichen Informationsstatus der Planungsebenen ab. Dies folgt daraus, dass auf beiden Planungsebenen zwar unterschiedliche Aggregationsniveaus verwendet werden, diese aber auf konsistenten Daten basieren. Zudem kann die übergeordnete Planungsebene auf die für eine Antizipation notwendigen Daten der untergeordneten Planungsebene zugreifen. Aufgrund des iterativen Planungsansatzes, bei dem die Modelle beider Planungsebenen abwechselnd gelöst werden, bis eine hinreichend gute Lösung gefunden und umgesetzt wird, muss kein zeitlicher Unterschied der Informationsstatus der Planungsebenen betrachtet werden. Zwar finden die Planungen der Planungsebenen nicht gleichzeitig statt, aber ein deutlicher zeitlicher Abstand zwischen den Planungen (z.B. ein Monat) liegt nicht vor. Dies hat auch zur Folge, dass, wie bereits in Kapitel 2.2 erläutert, für den Informationsstatus der Planungsebenen kein Zeitindex sondern nur die Kennzeichnung des Aggregationsniveaus der Informationen (I^T für den Informationsstatus und das Aggregationsniveau der Top-Ebene bzw. I^B für den Informationsstatus und das Aggregationsniveau der Basis-Ebene) angegeben wird. Der organisatorische Teil des Systems folgt aus den vorliegenden zwei Planungsebenen, weshalb das System mehrere reale Entscheidungsträger besitzt. Als Beispiel dafür dient das Praxisbeispiel, bei dem das Unternehmen sowohl für die Standort- als auch für die Produktionsplanung jeweils eine eigene zentrale Abteilung besitzt.

Um das Konzept der HP in der Darstellung nach Schneeweiß anzuwenden, müssen die vorgestellten Planungsebenen zunächst in das hierarchische Planungssystem eingeordnet

werden. Aufgrund der längerfristigen Entscheidungen bietet sich die *Standortplanung als Top-Ebene* bzw. das Optimierungsmodell der Standortplanung als Modell der Top-Ebene an. Dort werden die grundsätzlichen Entscheidungen gefällt, die der mittelfristigen Produktionsplanung als Rahmenbedingungen dienen. Folglich wird die *mittelfristige Produktionsplanung als Basis-Ebene* bzw. das Optimierungsmodell der mittelfristigen Produktionsplanung als Modell der Basis-Ebene deklariert.

Nachfolgend werden die Zielsetzungen und Entscheidungsfelder der Top- und Basis-Ebene in der Notation von Schneeweiß definiert. Dabei stellen die Zielfunktionen der jeweiligen Optimierungsmodelle die Zielsetzungen C^T bzw. C^B dar. Die Entscheidungsfelder A^T bzw. A^B werden durch die Nebenbedingungen der Optimierungsmodelle gebildet. Erwähnt werden muss an dieser Stelle, dass ausgehend vom langfristigen Planungszeitraum, das Modell der langfristigen Standortplanung für alle Perioden bzw. Jahre $t = 1 \dots T$ und das Modell der mittelfristigen Produktionsplanung nur für die erste Periode bzw. das erste Jahr $t = 1$ aufgestellt wird. Dies ist in der Notation entsprechend gekennzeichnet. Zudem werden die bereits angesprochenen Informationsstatus der Planungsebenen (I^T bzw. I^B) dargestellt.

Modell der Top-Ebene

$$M_{t=1\dots T}^T = M_{t=1\dots T}^T(C_{t=1\dots T}^T, A_{t=1\dots T}^T, I^T) \quad (4.1)$$

$$C_{t=1\dots T}^T = C_{t=1\dots T}^{TT} = (3.1) \quad (4.2)$$

$$A_{t=1\dots T}^T := \{a_{t=1\dots T}^T : (3.2) - (3.17)\} \quad (4.3)$$

$$a_{t=1\dots T}^{T*} = \arg \max_{a_{t=1\dots T}^T \in A_{t=1\dots T}^T} \{C_{t=1\dots T}^T(a_{t=1\dots T}^T) | I^T\} \quad (4.4)$$

Das Modell der Top-Ebene setzt sich aus der Zielsetzung, dem Entscheidungsfeld und dem Informationsstatus der Top-Ebene zusammen (siehe (4.1)), wobei das Modell der Top-Ebene im vorliegenden Fall für die Perioden $t = 1 \dots T$ betrachtet wird. Die Zielsetzung wird in (4.2) beschrieben. Hier liegt in der Ausgangssituation nur das private Kriterium des Modells der Top-Ebene vor ($C_{t=1\dots T}^{TT}$), welches keine Kosten des Modells der Basis-Ebene antizipiert und die Zielfunktion des Modells der Standortplanung als Zielsetzung verwendet. (4.3) definiert das Entscheidungsfeld des Modells der Top-Ebene, indem die Entscheidung $a_{t=1\dots T}^T$ die Nebenbedingungen der Standortplanung einhalten muss. Die optimale Entscheidung $a_{t=1\dots T}^{T*}$ wird in (4.4) beschrieben. Diese soll die Zielsetzung maximieren unter der Berücksichtigung des Entscheidungsfeldes und des Informationsstatus der Top-Ebene.

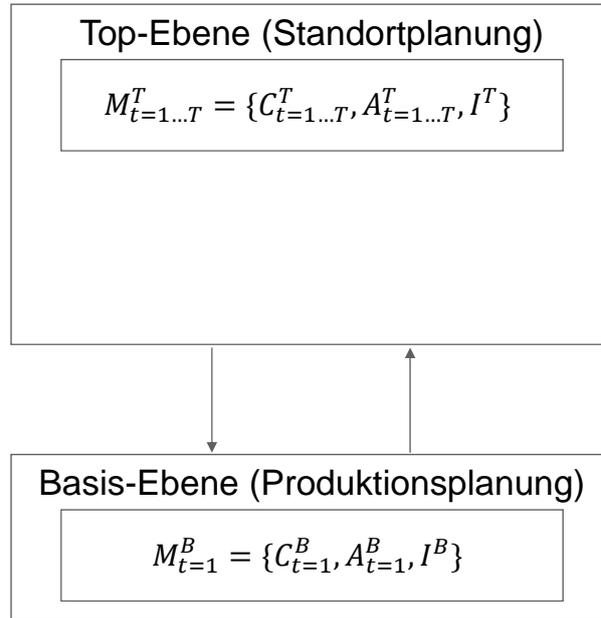


Abbildung 4.1: Einordnung der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung in das hierarchische Planungssystem nach Schneeweiß

Modell der Basis-Ebene

$$M_{t=1}^B = M_{t=1}^B(C_{t=1}^B, A_{t=1}^B, I^B) \quad (4.5)$$

$$C_{t=1}^B = (3.18) \quad (4.6)$$

$$A_{t=1}^B := \{a_{t=1}^B : (3.19) - (3.33)\} \quad (4.7)$$

$$a_{t=1}^{B*} = \arg \max_{a_{t=1}^B \in A_{IN^*,t=1}^B} \{C_{IN^*,t=1}^B(a_{t=1}^B) | I_{IN^*}^B\} \quad (4.8)$$

Die Gleichung (4.5) beschreibt die Zusammensetzung des Modells der Basis-Ebene aus der Zielsetzung, dem Entscheidungsfeld und dem Informationsstatus der Basis-Ebene, wobei an dieser Stelle nur die erste Periode $t = 1$ aufgrund des mittelfristigen Planungszeitraumes betrachtet wird. (4.6) definiert die Zielsetzung des Modells der Basis-Ebene und setzt dazu die Zielfunktion der mittelfristigen Produktionsplanung ein. Analog wird mit Gleichung (4.7) das Entscheidungsfeld beschrieben, indem die Entscheidung $a_{t=1}^B$ die Restriktionen des Modells der mittelfristigen Produktionsplanung beachten muss. (4.8) stellt die optimale Entscheidung $a_{t=1}^{B*}$ vor. Diese muss im Entscheidungsfeld liegen, welches den aktuellen Informationsstatus der Basis-Ebene inklusive der Instruktion

des Modells der Top-Ebene (IN^*) berücksichtigt. Dabei soll die Zielsetzung maximiert werden.

Um die langfristige Standort- bzw. mittelfristige Produktionsplanung als Top- bzw. Basis-Ebene auch grafisch in das hierarchische Planungssystem nach Schneeweiß einzuordnen, stellt Abbildung 4.1 die Planungsebenen sowie die zugehörigen Modelle in der hierarchischen Anordnung dar. Die zusätzlichen Bestandteile der HP, wie beispielsweise Instruktion und Reaktion, werden im weiteren Verlauf für den vorliegenden Planungsfall erläutert und der Abbildung hinzugefügt.

4.2 Instruktion und Reaktion

Nachdem bekannt ist, welches Modell welcher Planungsebene zugeordnet wird, müssen die Verknüpfungen der Planungsebenen durch Instruktion und Reaktion definiert werden.

Instruktion

$$IN_{t=1...T}^* = \{XD_{skp,t=1...T}^{TM*}, Y_{s,t=1...T}^{TM*}, YK_{s,t=1...T}^{TM*}, YP_{sp,t=1...T}^{TM*}\} \quad (4.9)$$

Im betrachteten Fall gibt die übergeordnete Ebene der Standortplanung die Entscheidungen bezüglich der Jahresabsatzmengen, geöffneten Standorte, zugehörigen Kapazitäten und Produkt-Werk-Allokationen an die mittelfristige Produktionsplanung weiter, welche dort als Rahmenbedingungen gelten. Diese Informationen werden als optimale Instruktion bezeichnet (siehe (4.9)).

Reaktion

$$RE_{t=1}^* = \{cx_{skp}^{TM}, a_{sp}^{TM}, p_{kp}^{TM}\} \quad (4.10)$$

Die mittelfristige Produktionsplanung verwendet die eingehende Instruktion und entscheidet über die detailliertere Produktion. Die Produktions-, Absatz- und Backordermengen sowie die Lost Sales werden indirekt als Reaktion im Sinne der HP verwendet. Indirekt bedeutet in diesem Fall, dass die in der Standortplanung verwendeten aggregierten Daten für Produktions- und Transportkosten, Produktionskoeffizienten sowie Absatzpreise mit den aktuellen Werten der genannten Entscheidungen neu berechnet werden. Diese aggregierten Daten stellen somit die optimale Reaktion dar (siehe (4.10)).

Die Einordnung der Instruktion und Reaktion in das hierarchische Planungssystem zeigt Abbildung 4.2. Durch diese Bestandteile ist nun auch die *iterative Planung beider Planungsebenen* realisierbar. Damit wird sichergestellt, dass sowohl die Standortplanung mit aktuellen aggregierten Daten durch die Reaktion der mittelfristigen Produktionsplanung

rechnet, als auch die mittelfristige Produktionsplanung aktualisierte Standortentscheidungen durch die Instruktion berücksichtigt. Eine Schwachstelle des Verfahrens ist allerdings, dass die aggregierten Daten der mittelfristigen Produktionsplanung nur auf den Entscheidungen der ersten Periode basieren, aber für alle zukünftigen Perioden in der Standortplanung eingesetzt werden. Dies birgt erneut Gefahren der Unsicherheit und einer falschen Struktur der (deterministischen) Daten, was durch den Einsatz einer rollierenden Planung jedoch reduziert werden kann.

Die vorgestellte Instruktion und Reaktion ermöglicht bereits eine gewisse Koordination durch den iterativen Austausch von Entscheidungen und Daten, jedoch müssen die unterschiedlichen Aggregationsniveaus der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung berücksichtigt werden. Demzufolge ist es notwendig, die Instruktion für die mittelfristige Produktionsplanung zu disaggregieren und die Reaktion für die Standortplanung zu aggregieren. Welche Verfahren und Berechnungen dafür angewandt werden, wird im folgenden Abschnitt erläutert.

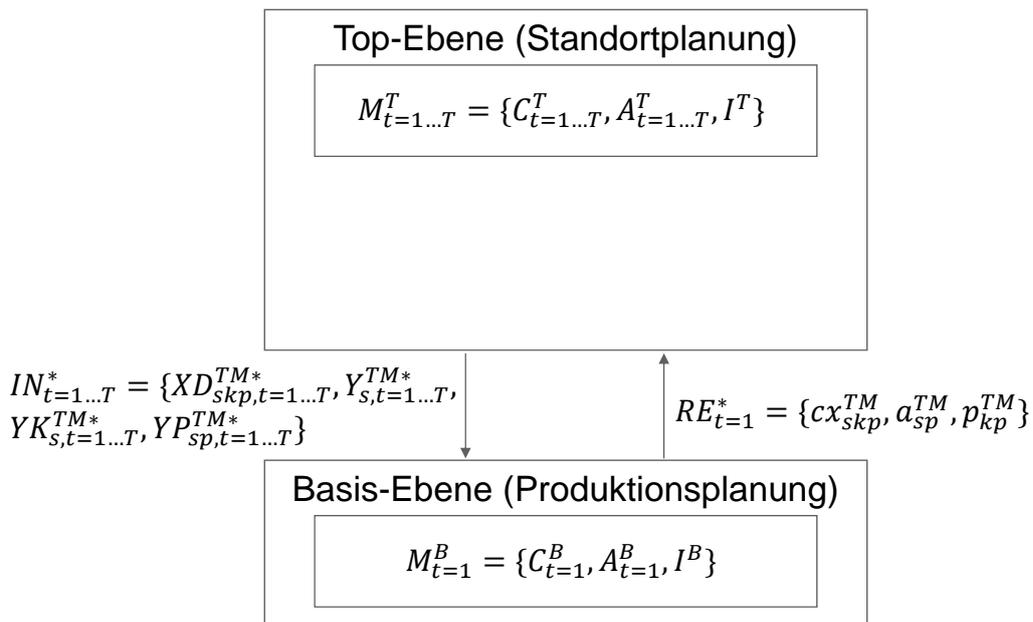


Abbildung 4.2: Instruktion und Reaktion in der hierarchischen langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung

4.3 Aggregation und Disaggregation

Die Aggregation und Disaggregation bezieht sich im vorliegenden Fall insbesondere auf die Instruktion und Reaktion. Zusätzliche Daten die aggregiert im Modell der Standortplanung und detailliert im Modell der mittelfristigen Produktionsplanung verwendet werden, sind konsistent und werden durch eine *LP-Aggregation (Berechnung: Addition)* der detaillierten Daten der mittelfristigen Produktionsplanung auch der Standortplanung zur Verfügung gestellt.

Aggregation der detaillierten Daten der mittelfristigen Produktionsplanung

$$d_{kpt}^{TM} = \sum_{i \in PG_p} \sum_{m=1}^M d_{kitm}^{BM} \quad \forall k \in K, p \in P, t = 1 \dots T \quad (4.11)$$

$$dmin_{kp}^{TM} = dmin_{ki}^{BM} \quad \forall k \in K, p \in P, i \in PG_p \quad (4.12)$$

$$k_s^{TM} = k_s^{BM} \cdot |M| \quad \forall s \in S \quad (4.13)$$

$$kp_{sp}^{TM} = kp_{sp}^{BM} \cdot |M| \quad \forall s \in S, p \in P \quad (4.14)$$

Die aggregierte Nachfrage d_{kpt}^{TM} wird durch die detaillierte Nachfrage d_{kitm}^{BM} gebildet, indem diese jeweils über die Produkte i der entsprechenden Produktgruppe p und die Perioden $m = 1 \dots M$ aufsummiert wird (siehe (4.11)). Der prozentuale Mindestanteil der zu liefernden Nachfrage ($dmin_{kp}^{TM}$ bzw. $dmin_{ki}^{BM}$) soll sowohl auf der übergeordneten als auch untergeordneten Planungsebene für einen Markt k und eine Produktgruppe p sowie die zugehörigen Produkte i identisch sein. Dies wird durch die Gleichungen (4.12) sichergestellt. Die Gleichungen (4.13) und (4.14) bestimmen die jährlichen Kapazitäten der Standorte allgemein (k_s^{TM}) und je Produktgruppe (kp_{sp}^{TM}) aus den monatlichen Kapazitäten (k_s^{BM} bzw. kp_{sp}^{BM}), indem diese mit der Anzahl an Perioden bzw. Monaten $|M|$ multipliziert werden.

Weitere Aggregationsberechnungen sind für die Reaktion der mittelfristigen Produktionsplanung notwendig. Wie beschrieben, werden neu aggregierte Daten für Produktions- und Transportkosten, Produktionskoeffizienten sowie Absatzpreise als Reaktion an die Standortplanung weitergegeben. Die Aggregation hängt dabei von den Produktions-, Absatz- und Backordermengen sowie Lost Sales der mittelfristigen Produktionsplanung ab und wird, wie in den folgenden Berechnungen zu sehen ist, als *LP-Aggregation (Berechnung: Gewichtung)* durchgeführt.

Aggregation für die Daten der Reaktion

$$\begin{aligned}
 cx_{skp}^{TM} = & \sum_{i \in PG_p} \frac{\sum_{m=1}^M X_{sim}^{BM}}{\sum_{i' \in PG_p} \sum_{m=1}^M X_{si'm}^{BM}} \cdot cx_{si}^{BM} + \\
 & \sum_{i \in PG_p} \frac{\sum_{m=1}^M (XD_{skim}^{BM} + B_{ski,m-1}^{BM} - LS_{skim}^{BM} - B_{skim}^{BM})}{\sum_{i' \in PG_p} \sum_{m=1}^M (XD_{ski'm}^{BM} + B_{ski',m-1}^{BM} - LS_{ski'm}^{BM} - B_{ski'm}^{BM})} \cdot cd_{ski}^{BM} \quad \forall s \in S, k \in K, \\
 & p \in P \quad (4.15)
 \end{aligned}$$

$$a_{sp}^{TM} = \sum_{i \in PG_p} \frac{\sum_{m=1}^M X_{sim}^{BM}}{\sum_{i' \in PG_p} \sum_{m=1}^M X_{si'm}^{BM}} \cdot a_{si}^{BM} \quad \forall s \in S, p \in P \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned}
 p_{kp}^{TM} = & \\
 & \sum_{i \in PG_p} \frac{\sum_{s \in S} \sum_{m=1}^M (XD_{skim}^{BM} + B_{ski,m-1}^{BM} - LS_{skim}^{BM} - B_{skim}^{BM})}{\sum_{s \in S} \sum_{i' \in PG_p} \sum_{m=1}^M (XD_{ski'm}^{BM} + B_{ski',m-1}^{BM} - LS_{ski'm}^{BM} - B_{ski'm}^{BM})} \cdot p_{ki}^{BM} \quad \forall k \in K, \\
 & p \in P \quad (4.17)
 \end{aligned}$$

Die aggregierten Produktions- und Transportkosten cx_{skp}^{TM} werden in (4.15) berechnet. Diese setzen sich aus den detaillierten produktabhängigen Produktions- (cx_{si}^{BM}) und Transportkosten (cd_{ski}^{BM}) zusammen. Die detaillierten Produktionskosten müssen in diesem Fall für eine Produktgruppe p aggregiert werden. Um die Berechnung möglichst genau durchzuführen, wird innerhalb der Produktgruppe p für jedes Produkt i ein Gewichtungsfaktor ermittelt. Dieser gibt den Anteil der, über alle Perioden m für einen Standort s aufsummierten, Produktionsmenge eines Produktes i an der gesamten Produktionsmenge aller Produkte der entsprechenden Produktgruppe p wieder. Anschließend wird der Gewichtungsfaktor mit den Produktionskosten des Produktes multipliziert und über alle Produkte der Produktgruppe aufsummiert. Eine Aggregation zu einer Produktgruppe p muss ebenfalls für die detaillierten Transportkosten durchgeführt werden. Dazu wird die tatsächlich gelieferte Menge als Gewichtungsfaktor verwendet. Diese Menge setzt sich aus den Absatzmengen der aktuellen und den Backordermengen der letzten Periode abzüglich der Lost Sales und den Backordermengen der aktuellen Periode zusammen. Je Produkt i wird folglich die tatsächlich gelieferte Menge über alle Perioden m an einem Standort s ins Verhältnis zur tatsächlich gelieferten Menge aller Produkte der Produktgruppe p gesetzt. Dieser Gewichtungsfaktor wird mit den Transportkosten des Produktes multipliziert und über alle Produkte der Produktgruppe aufsummiert.

Die Berechnung der aggregierten Produktionskoeffizienten a_{sp}^{TM} muss die Aggregation von Produkten zu Produktgruppen ausführen. Wie in (4.16) zu erkennen ist, wird

ebenfalls ein Gewichtungsfaktor der Produktionsmengen verwendet. Die Produktionsmenge eines Produktes i über alle Perioden m an einem Standort s wird erneut ins Verhältnis zur gesamten Produktionsmenge aller Produkte der Produktgruppe p gesetzt und anschließend mit dem Produktionskoeffizienten des Produktes i (a_{si}^{BM}) multipliziert. Zuletzt wird über alle Produkte der Produktgruppe aufsummiert.

Auch die detaillierten Absatzpreise p_{ki}^{BM} müssen von Produkten zu Produktgruppen aggregiert werden (p_{kp}^{TM}) (siehe (4.17)). Als Gewichtungsfaktor dient die, über alle Perioden m und Standorte s aufsummierte, tatsächlich gelieferte Menge eines Produktes i im Vergleich zur tatsächlich gelieferten Menge aller Produkte der Produktgruppe p . Der Faktor wird mit dem produktabhängigen Absatzpreis multipliziert und abschließend über alle Produkte der Produktgruppe aufsummiert.

Grundsätzlich wird bei allen Aggregationen der Fall abgefangen, dass im Nenner eine 0 auftritt. In diesem Fall wird die von Leisten (1996, vgl. S. 120-121) vorgeschlagene Gleichgewichtung angewandt, bei der beispielsweise für alle Produkte einer Produktgruppe der gleiche Gewichtungsfaktor gilt.

Die Instruktion der Standortplanung wird im aggregierten Zustand an die untergeordnete Ebene der mittelfristigen Produktionsplanung weitergegeben. Wie in Kapitel 2.2.5 erläutert, bestehen nun mehrere Möglichkeiten, die Vorgaben der übergeordneten Planungsebene zu disaggregieren. Im vorliegenden Fall wird eine *optimale Disaggregation* vorgenommen. Dies ist im betrachteten Modell der mittelfristigen Produktionsplanung bereits berücksichtigt worden, weshalb für die Instruktion keine konkreten Disaggregationsberechnungen durchgeführt werden, sondern die nachfolgenden Nebenbedingungen des Modells der mittelfristigen Produktionsplanung zur Disaggregation dienen.

Disaggregation für die Daten der Instruktion

$$XD_{skp,t=1\dots T}^{TM*} : (3.21) \tag{4.18}$$

$$Y_{s,t=1\dots T}^{TM*} : (3.20) \tag{4.19}$$

$$YK_{s,t=1\dots T}^{TM*} : (3.19), (3.29), (3.30) \tag{4.20}$$

$$YP_{sp,t=1\dots T}^{TM*} : (3.31) \tag{4.21}$$

Die Jahresabsatzmengen $XD_{skp,t=1\dots T}^{TM*}$ werden, wie in (4.18) zu erkennen ist, mit den Nebenbedingungen (3.21) optimal disaggregiert. Somit hat die mittelfristige Produktionsplanung die Freiheit, die monatlichen Absatzmengen einzelner Produkte so zu wählen, dass deren Summe der Jahresabsatzmenge der Produktgruppe entspricht.

Die Instruktion bezüglich der geöffneten Standorte, zugehöriger Kapazitäten und der Produkt-Werk-Allokationen muss nicht disaggregiert, sondern direkt in der mittelfristi-

gen Produktionsplanung berücksichtigt werden. Die entsprechenden Nebenbedingungen der mittelfristigen Produktionsplanung sind in (4.19) bis (4.21) beschrieben.

Wird das hierarchische Planungssystem nun iterativ ausgeführt, so werden die vorgestellten Verfahren zur Aggregation und Disaggregation in jeder Iteration angewandt. Folglich werden die aktualisierten Informationen den Planungsebenen als disaggregierte Instruktion bzw. aggregierte Reaktion übermittelt und führen zu einer reibungslosen Verknüpfung der Planungsebenen.

4.4 Antizipationsfunktion

Schneeweiß (2003b) wendet in seinem hierarchischen Planungskonzept eine Antizipationsfunktion auf der übergeordneten Planungsebene an, um mögliche Auswirkungen der übergeordneten Entscheidungen auf die untergeordnete Planungsebene vorzeitig abzuschätzen und somit bessere Lösungen für das gesamte System auf der übergeordneten Planungsebene zu ermitteln.

Im vorliegenden Fall soll die Standortplanung antizipieren, wie die mittelfristige Produktionsplanung reagiert, wenn bestimmte Standortentscheidungen getroffen werden. Insbesondere Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung auf der Ebene der mittelfristigen Produktionsplanung sollen so abgeschätzt werden. An dieser Stelle müssen allerdings die unterschiedlichen Planungszeiträume beachtet werden. Da die Standortplanung einen langfristigen Planungszeitraum betrachtet ($t = 1 \dots T$), wäre die Antizipation der Produktionsplanung für einen mittelfristigen Planungszeitraum ($t = 1$) zwar hilfreich, aber noch nicht ausreichend. Um Auswirkungen von langfristigen Standortentscheidungen in der Produktionsplanung abzuschätzen, wird deshalb das Modell der mittelfristigen Produktionsplanung nicht nur für die Periode $t = 1$ sondern für alle Perioden $t = 1 \dots T$ des *langfristigen Planungszeitraumes* antizipiert.

Antizipation

$$\widehat{M}_{t=1\dots T}^B = \widehat{M}_{t=1\dots T}^B(\widehat{C}_{t=1\dots T}^B, \widehat{A}_{t=1\dots T}^B, \widehat{I}^B) \quad (4.22)$$

$$AF(IN) = \widehat{a}_{t=1\dots T}^{B*} = \arg \max_{\widehat{a}_{t=1\dots T}^B \in \widehat{A}_{IN,t=1\dots T}^B} \{\widehat{C}_{IN,t=1\dots T}^B(\widehat{a}_{t=1\dots T}^B) | \widehat{I}_{IN}^B\} \quad (4.23)$$

(4.22) definiert das antizipierte Modell der mittelfristigen Produktionsplanung $\widehat{M}_{t=1\dots T}^B$, wie beschrieben, für die Perioden $t = 1 \dots T$. Das Modell setzt sich aus der antizipierten Zielsetzung $\widehat{C}_{t=1\dots T}^B$ und dem antizipierten Entscheidungsfeld $\widehat{A}_{t=1\dots T}^B$ für die Perioden $t = 1 \dots T$ sowie dem antizipierten Informationsstatus \widehat{I}^B zusammen. Die Antizipationsfunktion (4.23) liefert die optimale Entscheidung des antizipierten Modells der mittelfristigen Produktionsplanung $\widehat{a}_{t=1\dots T}^{B*}$, welche sich durch eine Maximierung der antizipierten

Zielsetzung $\hat{C}_{IN,t=1\dots T}^B$ ergibt. Es müssen allerdings das antizipierte Entscheidungsfeld $\hat{A}_{IN,t=1\dots T}^B$ und der antizipierte Informationsstatus \hat{I}_{IN}^B berücksichtigt werden, die von der aktuellen Instruktion der Standortplanung IN abhängig sind. Die Instruktion ist jedoch nicht endgültig, sondern stellt nur eine vorläufige Standortentscheidung innerhalb der Standortplanung dar. Die optimale Instruktion wird nach Abschluss der Standortplanung an die mittelfristige Produktionsplanung weitergegeben.

Abbildung 4.3 stellt das nun vollständige hierarchische Planungssystem für die langfristige Standort- und mittelfristige Produktionsplanung dar.

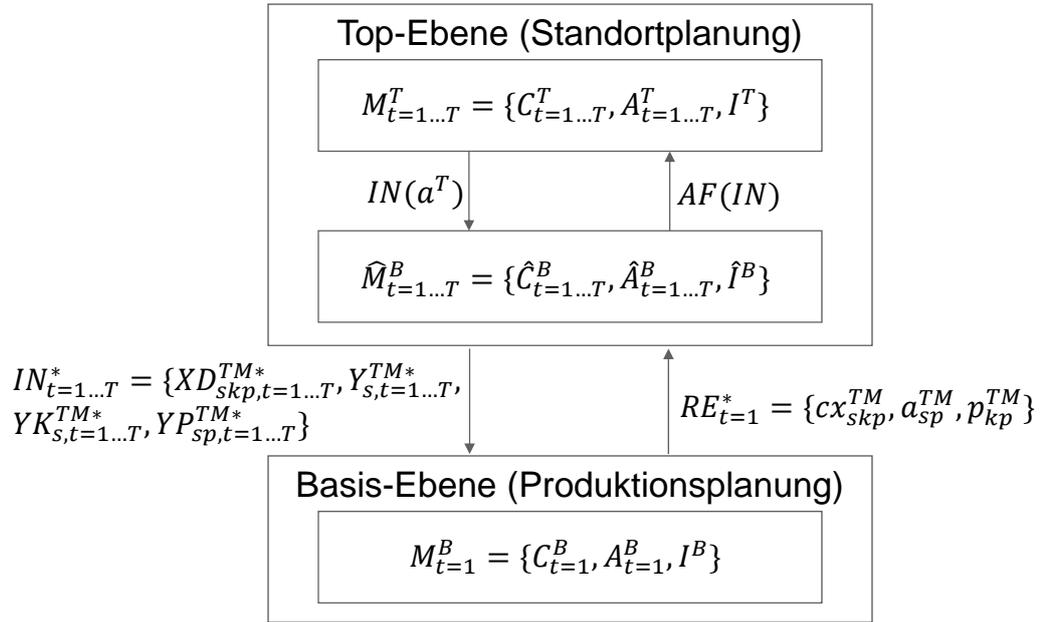


Abbildung 4.3: Antizipation der Produktionsplanung in der hierarchischen langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung

Die bisherige Definition des antizipierten Modells der mittelfristigen Produktionsplanung (4.22) lässt offen, in welchem Umfang die antizipierten Bestandteile (Zielsetzung, Entscheidungsfeld, Informationsstatus), den tatsächlichen Bestandteilen des Modells der mittelfristigen Produktionsplanung entsprechen.

In einem Beispiel für die Standort- und Produktionsplanung (mit gleichen Aggregationsniveaus und einer separaten Produktionsplanung je Standort) nimmt Schneeweiß eine perfekte Antizipation an (vgl. Schneeweiß, 2003b, S. 465-466 und 486-488). Bezogen auf das aktuelle Planungssystem, bedeutet eine perfekte Antizipation, dass das antizipierte Modell der Produktionsplanung dem tatsächlichen Modell der Produktionsplanung

gleicht, aber langfristig durchgeführt wird. Dies entspricht dem in Kapitel 3.3 vorgestellten Gesamtmodell beider Planungsebenen, bei dem sowohl die Standort- als auch die Produktionsplanung langfristig betrachtet werden. Wie erwähnt, kommt eine derartige Planung aufgrund von organisatorischen Gründen und der Komplexität allerdings für die betriebliche Praxis nicht in Betracht, wird im späteren Verlauf der Arbeit jedoch zur Bewertung der neu entwickelten Ansätze der Koordination verwendet.

Weitere Antizipationsfunktionen für die Koordination der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung treten in der Literatur allerdings nicht auf. Aus diesem Grund dienen dem betrachteten hierarchischen Planungssystem bislang nur die Instruktion und Reaktion zur Koordination. Die iterative Ausführung unterstützt die Koordination dabei zusätzlich. Im folgenden Abschnitt werden beispielhaft Varianten der hierarchischen Koordination für die vorliegende Planungssituation mit den bisher vorgestellten Bestandteilen der HP in der Notation nach Schneeweiß erläutert.

Um die Koordination der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung mit Antizipationsfunktionen zu verbessern, werden in Kapitel 5 neue Antizipationsfunktionen und Varianten für die hierarchische Koordination vorgestellt.

4.5 Varianten der hierarchischen Koordination ohne Antizipation

Nachfolgend werden die Top-Down Planung und die iterative hierarchische Planung stellvertretend als Varianten der hierarchischen Koordination ohne Antizipation beschrieben, da diese in der Praxis zumeist anzutreffen sind (siehe Kapitel 3.5). Anzumerken ist, dass beide Varianten zwar keine konkrete Antizipationsfunktion einsetzen, aber eine *nicht-reaktive Antizipation* annehmen, also aggregierte Daten der untergeordneten Planungsebene in das Entscheidungsfeld der übergeordneten Planungsebene ($A_{t=1..T}^T$) einbeziehen.

Top-Down Planung

Die Top-Down Planung stellt im Kontext der HP die Variante mit der geringsten Koordination der Planungsebenen dar, denn es wird keine Reaktion der Basis-Ebene berücksichtigt und die Planung verläuft nicht iterativ, sondern wird nur einmalig sukzessiv ausgeführt. Dementsprechend verwendet die übergeordnete Standortplanung nur die zu Beginn gleichgewichtet berechneten aggregierten Daten der mittelfristigen Produktionsplanung (nicht-reaktive Antizipation nur zu Beginn der Planung), löst ihr Modell und gibt die Entscheidungen als Instruktion an die untergeordnete mittelfristige Produktionsplanung weiter. Diese muss sich den Vorgaben anpassen. Prinzipiell lässt sich die Top-Down Planung als ungünstigste Variante der HP bewerten, da weder eine Antizipation noch eine Reaktion der untergeordneten Planungsebene in die Entscheidungen der übergeordneten Planungsebene einbezogen wird. Die schematische Darstellung der

Top-Down Planung für die langfristige Standort- und mittelfristige Produktionsplanung wird in Abbildung 4.4 aufgezeigt.

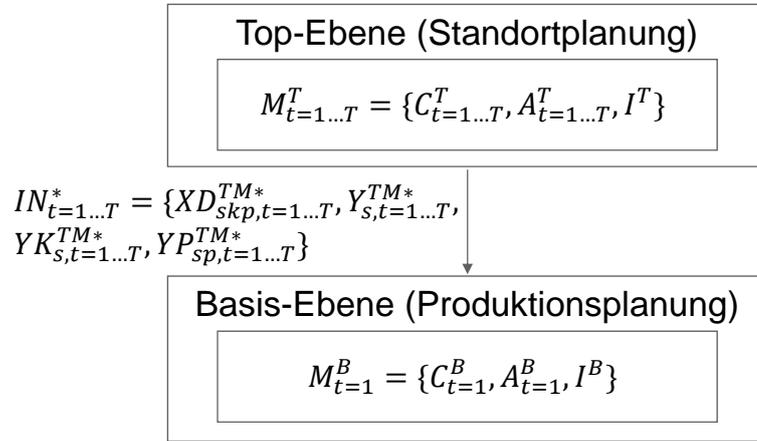


Abbildung 4.4: Top-Down Planung

Der folgende Algorithmus erläutert den Ablauf der Top-Down Planung (Algorithmus 1). Beim Einsatz in der Praxis wird die Produktionsplanung für einen mittelfristigen Planungszeitraum durchgeführt und umgesetzt. Um die in dieser Arbeit aufgestellten Varianten jedoch vergleichen zu können, muss ein Gesamtergebnis über den langfristigen Planungszeitraum berechnet werden, das sowohl die Entscheidungen der langfristigen Standort- als auch der mittelfristigen Produktionsplanung beinhaltet. Deshalb wird die mittelfristige Produktionsplanung nicht nur für die erste Periode $t = 1$, sondern für alle Perioden $t = 1 \dots T$ sukzessiv ausgeführt.

Algorithmus 1 Top-Down Planung

- 1: Löse $M_{t=1...T}^T$
 - 2: Übergebe $IN_{t=1...T}^*$
 - 3: **for** $t = 1 \dots T$ **do**
 - 4: Löse M_t^B
 - 5: **end for**
 - 6: $Kapitalwert = CY^T(C_{t=1...T}^T(a_{t=1...T}^{T*})) + \sum_{t=1}^T (C_{IN^*,t}^B(a_t^{B*}))(1+z)^{-(t-1)}$
 - 7: Rollierende Planung: Wiederhole Planung in Periode $t = 2$ für $t = 2 \dots T + 1$, in Periode $t = 3$ für $t = 3 \dots T + 2$, usw.
-

Im ersten Schritt wird die langfristige Standortplanung gelöst. Die Ergebnisse werden als Instruktion an die mittelfristige Produktionsplanung übergeben. Da die Top-Down Planung die Standortplanung nur einmalig ausführt, folgt direkt das sukzessive Lösen der

mittelfristigen Produktionsplanung. Um ein Gesamtergebnis über den langfristigen Planungszeitraum zu erhalten, wird die mittelfristige Produktionsplanung für alle Perioden $t = 1 \dots T$ ausgeführt. Das Gesamtergebnis des Kapitalwertes der entscheidungsrelevanten Kosten und Erlöse vor Steuern (im Algorithmus nur mit *Kapitalwert* gekennzeichnet) setzt sich anschließend aus den Standortkosten und den Deckungsbeiträgen der mittelfristigen Produktionsplanung zusammen. Die Standortkosten (CY^T) beinhalten Kosten für das Öffnen und Schließen eines Standortes sowie fixe Standortkosten und Kosten für das Erschließen geografischer Standorte. Die Deckungsbeiträge der mittelfristigen Produktionsplanung werden für alle Perioden $t = 1 \dots T$ berücksichtigt und aufgrund der langfristigen Betrachtung mit dem Kapitalzinssatz z abgezinst.

Die Top-Down Planung ist damit abgeschlossen. Um Unsicherheiten der langfristigen Planung zu reduzieren und somit im ersten Planungsdurchgang festgelegte langfristige Entscheidungen eventuell zu revidieren, wird in der betrieblichen Praxis eine rollierende Planung angewandt. Dementsprechend wird die Top-Down Planung in der nächsten Periode $t = 2$ für die Perioden $t = 2 \dots T + 1$ durchgeführt. Dies gilt analog für alle weiteren Perioden.

Iterative hierarchische Planung

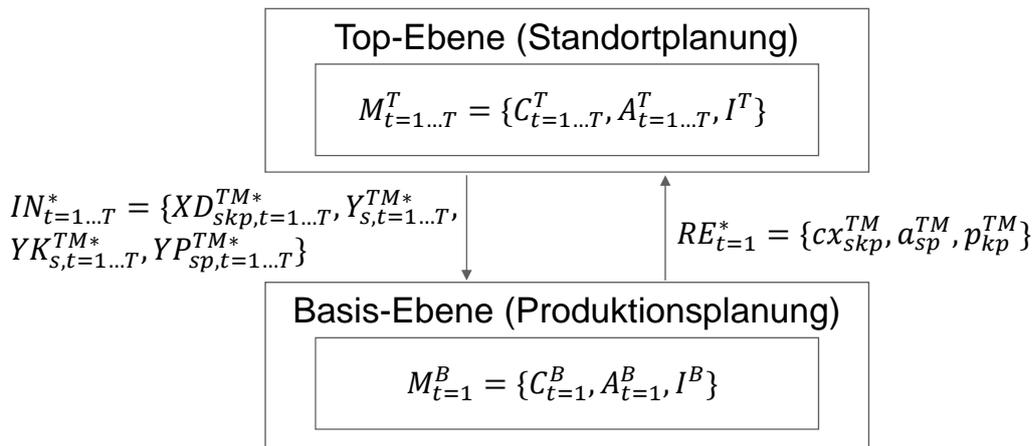


Abbildung 4.5: Iterative hierarchische Planung

Im Gegensatz zur Top-Down Planung berücksichtigt die iterative hierarchische Planung eine Reaktion der untergeordneten Planungsebene und löst die langfristige Standort- und mittelfristige Produktionsplanung so lange abwechselnd, bis eine hinreichend gute Lösung gefunden ist. Damit wird sowohl die Instruktion als auch die Reaktion in jeder Iteration berücksichtigt und aktuelle aggregierte sowie disaggregierte Informationen werden auf jeder Planungsebene verwendet (nicht-reaktive Antizipation bei jeder Iteration). Die iterative hierarchische Planung ermöglicht folglich eine bessere Koordination

zwischen der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung als die Top-Down Planung. Nachfolgend wird das Schema (Abbildung 4.5) und der Algorithmus der iterativen hierarchischen Planung (Algorithmus 2) dargestellt. Beim Algorithmus wird die mittelfristige Produktionsplanung zu Vergleichszwecken wie zuvor für alle Perioden $t = 1 \dots T$ ausgeführt.

Algorithmus 2 Iterative hierarchische Planung

```

1:  $\bar{a}_{it=0}^T = 0$ 
2: for  $it = 1 \dots itmax$  do
3:   Löse  $M_{t=1\dots T}^T$ 
4:   Übergebe  $IN_{t=1\dots T}^*$ 
5:    $\bar{a}_{it}^T = a_{t=1\dots T}^{T*}$ 
6:   if  $\bar{a}_{it}^T = \bar{a}_{it-1}^T \pm \epsilon$  then
7:     Break
8:   end if
9:   Löse  $M_{t=1}^B$ 
10:  Übergebe  $RE_{t=1}^*$ 
11: end for
12: for  $t = 1 \dots T$  do
13:  Löse  $M_t^B$ 
14: end for
15:  $Kapitalwert = CY^T(C_{t=1\dots T}^T(a_{t=1\dots T}^{T*})) + \sum_{t=1}^T (C_{IN^*,t}^B(a_t^{B*}))(1+z)^{-(t-1)}$ 
16: Rollierende Planung: Wiederhole Algorithmus in Periode  $t = 2$  für  $t = 2 \dots T + 1$ ,
    in Periode  $t = 3$  für  $t = 3 \dots T + 2$ , usw.

```

Zunächst wird die Hilfsvariable $\bar{a}_{it=0}^T$ auf 0 gesetzt. Mit dieser Variable wird im weiteren Verlauf des Algorithmus die Abbruchbedingung überprüft, ob eine hinreichend gute Lösung gefunden wurde. Anschließend beginnt der iterative Teil der Planung, indem die Standortplanung gelöst und die Entscheidungen als Instruktion an die mittelfristige Produktionsplanung übergeben werden. Wird die Standortplanung erstmalig gelöst, stehen keine aktuellen Daten der mittelfristigen Produktionsplanung zur Verfügung, weshalb von gleichgewichteten aggregierten Daten der mittelfristigen Produktionsplanung ausgegangen wird. Die Hilfsvariable der aktuellen Iteration \bar{a}_{it}^T nimmt die aktuelle Lösung der Standortplanung an. Danach wird die Abbruchbedingung überprüft. Stimmt die aktuelle Lösung der Standortplanung mit der Lösung der letzten Iteration überein bzw. weicht weniger als ϵ von der Lösung der letzten Iteration ab, so wird der iterative Ablauf abgebrochen und die aktuelle Lösung der Standortplanung wird übernommen. Falls nicht, wird die mittelfristige Produktionsplanung für die Periode $t = 1$ gelöst, um anschließend die Ergebnisse als Reaktion der Standortplanung zu übergeben. Mit der Übergabe der Reaktion endet die aktuelle Iteration und die nächste Iteration beginnt wieder mit dem Lösen der Standortplanung. Sollte die Abbruchbedingung während des iterativen

Ablaufes keinen Abbruch erzwingen, bricht der iterative Ablauf nach *itmax* Iterationen ab. Das weitere Vorgehen ist analog zur Top-Down Planung. Die mittelfristige Produktionsplanung wird für die Perioden $t = 1 \dots T$ gelöst und der Kapitalwert wird aus den Standortkosten und den abgezinsten Deckungsbeiträgen der jeweiligen mittelfristigen Produktionsplanungen gebildet. Nach Ablauf einer Periode wird eine rollierende Planung angewandt.

5 Entwicklung neuer hierarchischer Koordinationsformen

Nachdem im vorigen Kapitel herausgearbeitet wurde, dass für das vorliegende hierarchische Planungssystem der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung außer der perfekten Antizipation bislang keine Antizipationsfunktionen existieren, werden in diesem Kapitel neue Antizipationsfunktionen und Varianten für die HP vorgestellt, die die Koordination der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung verbessern.

Da die neu entwickelten Antizipationsfunktionen auch auf andere Planungssituationen der HP übertragbar sein sollen, werden sie im folgenden Abschnitt zunächst allgemein formuliert, bevor in Kapitel 5.2 die konkrete Anwendung für die langfristige Standort- und mittelfristige Produktionsplanung vorgestellt wird.

5.1 Antizipationsfunktionen zur besseren Abschätzung der untergeordneten Planungsebene

Um neue Antizipationsfunktionen sowohl für die spezifische Koordination der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung und darüber hinaus für die allgemeine Koordination zweier Planungsebenen in der HP zu entwickeln, muss zunächst definiert werden, was eine Antizipationsfunktion bezwecken soll und welche Bestandteile der untergeordneten Planungsebene dafür zu antizipieren sind.

Wie in dieser Arbeit an verschiedenen Stellen erwähnt, dienen Antizipationsfunktionen dazu, die Auswirkungen der Entscheidungen der übergeordneten Planungsebene auf die untergeordnete Planungsebene abzuschätzen und dadurch die Entscheidungen der übergeordneten Planungsebene so zu beeinflussen, dass für das gesamte Planungssystem ein besseres Ergebnis erreicht wird.

Im vorliegenden Fall bedeutet dies, dass die Standortplanung die Folgekosten von Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung in der mittelfristigen Produktionsplanung antizipieren muss. Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung dienen dazu, Kapazitätsengpässe auszugleichen und sind von den zur Verfügung gestellten Kapazitäten, Produkt-Werk-Allokationen und Jahresabsatzmengen der Standortplanung abhängig. Kapazitätsengpässe in der mittelfristigen Produktionsplanung entstehen zumeist dadurch, dass die Standortplanung keine detaillierten Angaben über den saisonalen Verlauf der Nachfrage besitzt,

sondern nur mit aggregierten Daten rechnet und deshalb zu geringe Kapazitäten für Perioden mit Nachfragespitzen zur Verfügung stellt. Aus diesem Grund muss die Antizipationsfunktion für gegebene aggregierte Entscheidungen der Standortplanung Kapazitätsengpässe in der mittelfristigen Produktionsplanung ermitteln und die dadurch verursachten Folgekosten von Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung berücksichtigen. Der Einfluss der Antizipationsfunktion auf die Standortplanung kann konkret dazu führen, dass zur Verfügung gestellte Kapazitäten eventuell erhöht oder andere Standorte in Betracht gezogen werden sowie Jahresabsatzmengen einzelner Standorte so geplant werden, dass Standorte mit Kapazitätsengpässen entlastet werden. Das hätte eine Reduzierung der Folgekosten durch Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung in der mittelfristigen Produktionsplanung zur Folge, was, trotz eventuell größerer Investitionen durch eine Kapazitätserhöhung, auch langfristig zu einem besseren Gesamtergebnis führt.

Die Antizipationsfunktion muss demnach diejenigen Bestandteile der mittelfristigen Produktionsplanung antizipieren, die einen Einfluss auf die Kapazitätsbedarfe oder die Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung haben. Dieser Gegenstand der Antizipation gilt nicht nur für die Koordination der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung, sondern er lässt sich auch auf andere hierarchische Planungssituationen übertragen, die aggregierte und disaggregierte Kapazitäten berücksichtigen und eine Koordination der Planungsebenen erfordern.

Aus diesem Grund werden nachfolgend die zu antizipierenden Bestandteile einer untergeordneten Planungsebene verallgemeinert in Gruppen zusammengefasst und die konkreten Bestandteile der mittelfristigen Produktionsplanung als Beispiele eingeordnet.

Detaillierte Daten

Als detaillierte Daten werden alle Daten der untergeordneten Planungsebene bezeichnet, die zur Antizipation grundsätzlich notwendig sind. Sie stellen somit selbst keine Maßnahme zur Kapazitätsanpassung dar.

Im vorliegenden Fall sind dies die Daten der detaillierten Nachfrage, die notwendig sind, um Kapazitätsbedarfe in der mittelfristigen Produktionsplanung zu antizipieren. Diese müssen nicht vollständig als detaillierte Daten zur Verfügung stehen, sondern können beispielsweise als Gewichtungsfaktoren vorliegen. So können aggregierte Jahresnachfragen, die der Standortplanung zur Verfügung stehen, per Gewichtungsfaktor auf einzelne Monate und Produkte aufgeteilt werden. Zum Beispiel ergibt sich für ein Produkt mit einem Gewichtungsfaktor von 0,2 für den ersten Monat und einer Jahresnachfrage von 120 ME für die gesamte Produktgruppe, eine detaillierte Nachfrage von 24 ME für das Produkt im ersten Monat. Damit lassen sich detaillierte Kapazitätsbedarfe abschätzen, die zu Kapazitätsengpässen führen können.

Zusätzlicher Kapazitätsbedarf

Bestandteile der untergeordneten Planungsebene, die einen zusätzlichen Kapazitätsbedarf verursachen, werden ebenfalls als Gruppe dargestellt. Diese sind insbesondere dann

wichtig, wenn ein derartiger zusätzlicher Kapazitätsbedarf in der übergeordneten Planungsebene nur sehr grob oder gar nicht berücksichtigt wird.

Als Beispiel für die mittelfristige Produktionsplanung dienen Rüstzeiten. Rüstzeiten werden im vorliegenden Fall nur in der mittelfristigen Produktionsplanung betrachtet und führen aus Sicht der Standortplanung zu zusätzlichen Kapazitätsbedarfen, die folglich zusammen mit den anfallenden Rüstkosten antizipiert werden müssen.

Direkte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung

Als direkte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung werden alle Entscheidungen der untergeordneten Planungsebene bezeichnet, die die Kapazität in einer bestimmten Periode direkt anpassen bzw. erweitern, um einen Kapazitätsengpass auszugleichen.

In der vorliegenden mittelfristigen Produktionsplanung sind dies Zusatzkapazitäten und Produktionsverlagerungen in andere Werke bzw. Transportmengen zwischen Werken. Die Zusatzkapazitäten können die von der Standortplanung zur Verfügung gestellten Kapazitäten begrenzt erweitern und somit Kapazitätsengpässe in einer Periode direkt verhindern. Allerdings sind damit Kosten verbunden, die ebenfalls in der Antizipationsfunktion abgebildet werden müssen. Produktionsverlagerungen in andere Werke bzw. Transportmengen zwischen Werken stellen eine weitere direkte Maßnahme zur Kapazitätsanpassung dar. Ist ein Werk voll ausgelastet, ein anderes verfügt aber noch über freie Kapazitäten, so kann die nachgefragte Menge dort produziert werden und an das ursprüngliche Werk oder direkt an den Kunden geliefert werden. Dadurch entstehen zusätzliche Transportkosten.

Vor- oder nachgelagerte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung

Den direkten stehen vor- oder nachgelagerte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung gegenüber, welche einen Kapazitätsengpass in einer bestimmten Periode durch Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung in vorangehenden oder nachfolgenden Perioden ausgleichen.

Als Beispiel der mittelfristigen Produktionsplanung gilt hier die vor- und nachgelagerte Produktion mit Lagerbestand bzw. Backordermengen. Stehen in (Monats-)Perioden mit detaillierten Nachfragespitzen nicht genügend Kapazitäten zur Verfügung, so können die dort nicht zu produzierenden Nachfragemengen bereits in vorherigen Perioden produziert und auf Lager gelegt werden. Das hat jedoch Lagerkosten zur Folge, welche berücksichtigt werden müssen. Als nachgelagerte Produktion wird die nachgelagerte Maßnahme zur Kapazitätsanpassung bezeichnet, die bei Kapazitätsengpässen die nachgefragten Mengen zu einem späteren Zeitpunkt als Backordermengen produziert und liefert. Allerdings können beispielsweise Konventionalstrafen entstehen, da die Nachfrage nicht zum gewünschten Zeitpunkt geliefert wurde. Diese Kosten sind zu antizipieren. Auch Lost Sales als Folge einer nachgelagerten Produktion können als nachgelagerte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung gezählt werden, da nicht alle Kunden eine spätere Lieferung der Nachfrage durch Backordermengen akzeptieren und somit Nachfrageausfälle entstehen. Diese führen nicht nur zu direkten Einnahmeausfällen sondern eventuell auch zu

Konventionalstrafen und Imageverlusten durch den Ausfall der Lieferung. Auch diese Kosten müssen mit der Antizipationsfunktion abgeschätzt werden.

Zur besseren Übersicht werden die allgemeinen Gruppen der zu antizipierenden Bestandteile einer untergeordneten Planungsebene sowie die zugehörigen konkreten Bestandteile der hier betrachteten mittelfristigen Produktionsplanung in der folgenden Liste dargestellt.

- Detaillierte Daten:
 - Detaillierte Nachfragen / Gewichtungsfaktoren
- Zusätzlicher Kapazitätsbedarf:
 - Rüstzeiten
- Direkte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung:
 - Zusatzkapazitäten
 - Produktionsverlagerungen in andere Werke / Transportmengen zwischen Werken
- Vor- oder nachgelagerte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung:
 - Vorgelagerte Produktion / Lagerbestand
 - Nachgelagerte Produktion / Backordermengen
 - Lost Sales

Nachdem die zu antizipierenden Bestandteile einer untergeordneten Planungsebene vorgestellt wurden, können neue Antizipationsfunktionen beschrieben werden, die diese Bestandteile beinhalten. Dazu werden im Folgenden drei allgemeine Formulierungen vorgestellt, welche eine explizit approximiert reaktive Antizipation, eine explizit exakt reaktive Antizipation mit einer Periode und eine explizit exakt reaktive Antizipation mit zwei Perioden verwenden. Da nur reaktive Antizipationen entwickelt werden, werden die Antizipationsfunktionen im weiteren Verlauf als explizit approximierte bzw. explizit exakte Antizipationsfunktionen bezeichnet.

5.1.1 Allgemeine Formulierung einer explizit approximierten Antizipationsfunktion

Zuerst wird eine explizit approximiert reaktive Antizipationsfunktion zur Abschätzung der Folgekosten durch Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung vorgestellt. Diese antizipiert die Basis-Ebene in teilweise aggregierter und umgewandelter Form, so dass die Entscheidungen der Basis-Ebene grundsätzlich abgeschätzt und in die Entscheidungen der Top-Ebene

einbezogen werden. Dadurch kann der komplexe und rechenintensive Fall eines Gesamtmodells bei einer perfekten Antizipation umgangen werden.

Modell der Top-Ebene

Um die genaue Vorgehensweise der neu entwickelten Antizipationsfunktion zu erläutern, werden zunächst die dazu notwendigen Top- und Basis-Ebenen beschrieben. Das nachfolgende Symbolverzeichnis stellt die benötigten Symbole für das Modell der Top-Ebene vor.

Indizes

t Periode der Top-Ebene

Daten

ax^T Koeffizient für Entscheidungsmenge

cx^T Kosten für Entscheidungsmenge

cy^T Kosten für binäre Strukturentscheidung

k^T Kapazität

Variablen

X_t^T Entscheidungsmenge in Periode t

Y_t^T Binäre Strukturentscheidung in Periode t

Modell

$$M_{t=1\dots T}^T = M_{t=1\dots T}^T(C_{t=1\dots T}^T, A_{t=1\dots T}^T, I^T) \quad (5.1)$$

$$C_{t=1\dots T}^T = C_{t=1\dots T}^{TT} = \dots - \sum_{t=1}^T (cx^T X_t^T + cy^T Y_t^T) - \dots \quad (5.2)$$

$$ax^T X_t^T \leq k^T Y_t^T \quad \forall t = 1 \dots T \quad (5.3)$$

$$X_t^T \geq 0 \quad \forall t = 1 \dots T \quad (5.4)$$

$$Y_t^T \in \{0; 1\} \quad \forall t = 1 \dots T \quad (5.5)$$

$$A_{t=1\dots T}^T := \{a_{t=1\dots T}^T : (5.3) \wedge (5.4) \wedge (5.5) \wedge \dots\} \quad (5.6)$$

$$a_{t=1\dots T}^{T*} = \arg \max_{a_{t=1\dots T}^T \in A_{t=1\dots T}^T} \{C_{t=1\dots T}^T(a_{t=1\dots T}^T) | I^T\} \quad (5.7)$$

Grundsätzlich wird angenommen, dass das Modell der Top-Ebene Entscheidungsmengen X_t^T und binäre Strukturentscheidungen Y_t^T als Variablen beinhaltet, wobei weitere Entscheidungen getroffen werden können, die für die betrachtete Antizipation jedoch nicht relevant sind. Zu erwähnen ist zudem, dass neben dem Index t noch weitere Indizes für die Daten und Variablen denkbar sind, wie beispielsweise unterschiedliche Produktgruppen oder Standorte.

(5.1) definiert das Modell der Top-Ebene analog zu (4.1), wobei auch hier eine langfristige Betrachtung mit den Perioden $t = 1 \dots T$ vorliegt. Die Zielsetzung $C_{t=1\dots T}^T$ entspricht dem privaten Kriterium $C_{t=1\dots T}^{TT}$, wie in (5.2) zu sehen ist. Es setzt sich aus mehreren Bestandteilen zusammen, in denen auch die mit den erwähnten Entscheidungsmengen und binären Strukturentscheidungen zusammenhängenden Kosten enthalten sind. Das Entscheidungsfeld der Top-Ebene $A_{t=1\dots T}^T$ wird durch (5.6) definiert, welches neben weiteren Nebenbedingungen auch die Restriktionen (5.3) bis (5.5) beinhaltet. (5.3) stellen klassische Kapazitätsrestriktionen dar, indem die Kapazitätsbedarfe ($ax^T X_t^T$), die, je nach Entscheidung von Y_t^T , zur Verfügung stehenden Kapazitäten k^T nicht überschreiten dürfen. Die Restriktionen (5.4) und (5.5) erzwingen die Nichtnegativitäts- und Binärbedingungen für X_t^T bzw. Y_t^T . Die Maximierung der Zielsetzung unter Berücksichtigung des Entscheidungsfeldes und des Informationsstatus der Top-Ebene liefert die optimale Entscheidung der Top-Ebene $a_{t=1\dots T}^{T*}$ (siehe (5.7)).

$$IN_{t=1\dots T}^* = \{X_{t=1\dots T}^{T*}, Y_{t=1\dots T}^{T*}, \dots\} \quad (5.8)$$

Anschließend werden mit (5.8) die optimalen Entscheidungen der Top-Ebene, zu denen auch die optimalen Entscheidungsmengen X_t^{T*} und die optimalen binären Strukturentscheidungen Y_t^{T*} gehören, als optimale Instruktion $IN_{t=1\dots T}^*$ definiert und an die Basis-Ebene weitergegeben.

Modell der Basis-Ebene

Nach dem Modell der Top-Ebene wird das Modell der Basis-Ebene erläutert, für das zusätzliche Symbole beachtet werden müssen.

Indizes

m Periode der Basis-Ebene

Daten

ax^B Koeffizient für Entscheidungsmenge

cd^B Kosten für zusätzlichen Kapazitätsbedarf

ce^B Kosten für direkte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung

cf^B	Kosten für vor- oder nachgelagerte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung
d_{tm}^B	Nachfrage in Periode t und Periode m
k^B	Kapazität
$x_t^{T^*}$	Entscheidungsmenge in Periode t
$y_t^{T^*}$	Binäre Strukturentscheidung in Periode t

Variablen

D_{tm}^B	Zusätzlicher Kapazitätsbedarf in Periode t und Periode m
E_{tm}^B	Direkte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung in Periode t und Periode m
F_{tm}^B	Vor- oder nachgelagerte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung in Periode t und Periode m
X_{tm}^B	Entscheidungsmenge in Periode t und Periode m

Modell

$$M_{t=1}^B = M_{t=1}^B(C_{t=1}^B, A_{t=1}^B, I^B) \quad (5.9)$$

$$C_{t=1}^B = \dots - \sum_{m=1}^M (cd^B D_{tm}^B + ce^B E_{tm}^B + cf^B F_{tm}^B) - \dots \quad (5.10)$$

$$ax^B X_{tm}^B + D_{tm}^B \leq k^B y_t^{T^*} + E_{tm}^B \quad \forall m = 1 \dots M \quad (5.11)$$

$$F_{t,m-1}^B + X_{tm}^B = F_{tm}^B + d_{tm}^B \quad \forall m = 1 \dots M \quad (5.12)$$

$$\sum_{m=1}^M X_{tm}^B = x_t^{T^*} \quad (5.13)$$

$$D_{tm}^B, E_{tm}^B, F_{tm}^B, X_{tm}^B \geq 0 \quad \forall m = 1 \dots M \quad (5.14)$$

$$A_{t=1}^B := \{a_{t=1}^B : (5.11) \wedge (5.12) \wedge (5.13) \wedge (5.14) \wedge \dots\} \quad (5.15)$$

$$a_{t=1}^{B^*} = \arg \max_{a_{t=1}^B \in A_{IN^*,t=1}^B} \{C_{IN^*,t=1}^B(a_{t=1}^B) | I_{IN^*}^B\} \quad (5.16)$$

Das Modell der Basis-Ebene beinhaltet die vorgestellten zu antizipierenden Bestandteile der untergeordneten Planungsebene. Dies sind beispielsweise zusätzliche Kapazitäts-

bedarfe D_{tm}^B oder direkte sowie vor- oder nachgelagerte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung E_{tm}^B bzw. F_{tm}^B . Gegenüber der Top-Ebene verwendet die Basis-Ebene zusätzlich die detailliertere Periode m . Zudem sind auch auf der Basis-Ebene weitere Indizes für die Daten und Variablen denkbar, wie z.B. Indizes für unterschiedliche Produkte oder Standorte.

(5.9) definiert das Modell der Basis-Ebene $M_{t=1}^B$ analog zu (4.5) für die erste Periode der Top-Ebene $t = 1$. Die Zielsetzung der Basis-Ebene $C_{t=1}^B$ wird mit (5.10) definiert und beinhaltet, neben weiteren Bestandteilen, die Kosten für zusätzliche Kapazitätsbedarfe, direkte und vor- oder nachgelagerte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung. (5.15) beschreibt das Entscheidungsfeld der Basis-Ebene $A_{t=1}^B$ und bezieht mehrere Restriktionen ein. Dazu gehören unter anderem die Nebenbedingungen (5.11) bis (5.14). (5.11) stellen detailliertere Kapazitätsnebenbedingungen dar, welche die binären Strukturentscheidungen der Top-Ebene bezüglich der Kapazität ($k^B y_t^{T*}$) einbeziehen und zusätzliche Kapazitätsbedarfe D_{tm}^B sowie direkte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung E_{tm}^B berücksichtigen. Vor- oder nachgelagerte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung F_{tm}^B werden zusammen mit der detaillierten Nachfrage d_{tm}^B in den Lagerbilanzgleichungen (5.12) beachtet. (5.13) stellt sicher, dass die aufsummierten Entscheidungsmengen der Basis-Ebene X_{tm}^B den aggregierten Entscheidungsmengen der Top-Ebene x_t^{T*} entsprechen müssen. An dieser Stelle muss die Aufsummierung nicht nur über die Perioden m erfolgen, sondern kann beispielsweise auch über unterschiedliche Produkte durchgeführt werden, wenn die Entscheidungsmengen der Top-Ebene auch für Produktgruppen gelten. Die Nichtnegativitätsbedingungen werden durch (5.14) dargestellt. Die optimale Entscheidung der Basis-Ebene $a_{t=1}^{B*}$ wird letztendlich durch die Maximierung der Zielsetzung unter Berücksichtigung des Entscheidungsfeldes und Informationsstatus der Basis-Ebene sowie der Instruktion der Top-Ebene erreicht (siehe (5.16)).

$$RE_{t=1}^* = \{\widehat{cd}^{AF}, \widehat{ce}^{AF}, \widehat{cf}^{AF}, \widehat{gx}_{tm}^{AF}, \widehat{gd}_{tm}^{AF}, \dots\} \quad (5.17)$$

Mit der optimalen Entscheidung können abschließend die notwendigen Daten für die Top-Ebene neu berechnet und als optimale Reaktion $RE_{t=1}^*$ an die Top-Ebene übergeben werden, was in (5.17) zu sehen ist. Die hier konkret aufgeführten Daten \widehat{cd}^{AF} , \widehat{ce}^{AF} , \widehat{cf}^{AF} , \widehat{gx}_{tm}^{AF} , \widehat{gd}_{tm}^{AF} sind bereits für die Antizipationsfunktion notwendig und werden im weiteren Verlauf genauer erläutert.

Explizit approximierte Antizipationsfunktion

Durch die Vorstellung der Modelle beider Planungsebenen ist deutlich geworden, dass die Top-Ebene mit binären Strukturentscheidungen und reellwertigen Entscheidungsmengen einen großen Einfluss auf die Basis-Ebene und folglich auf die Folgekosten durch Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung ausüben kann. Dementsprechend muss die Antizipationsfunktion diese Bestandteile der Basis-Ebene abbilden. Das nachfolgende Symbolverzeichnis stellt alle zusätzlich benötigten Symbole dar. Die Daten und Variablen

der Antizipationsfunktion sind dabei mit einem AF gekennzeichnet und müssen nicht zwangsweise dem Aggregationsniveau der Basis-Ebene entsprechen. Der Detaillierungsgrad sollte so gewählt werden, dass die Daten und Variablen die Basis-Ebene möglichst gut approximieren und die zusätzlich benötigte Rechenzeit akzeptiert werden kann. Folglich besteht in diesem Punkt eine gewisse Freiheit in der Wahl des Detaillierungsgrades.

Daten

\widehat{cd}^{AF}	Antizipierte Kosten für zusätzlichen Kapazitätsbedarf
\widehat{ce}^{AF}	Antizipierte Kosten für direkte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung
\widehat{cf}^{AF}	Antizipierte Kosten für vor- oder nachgelagerte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung
\widehat{gd}_{tm}^{AF}	Gewichtungsfaktor für zusätzlichen Kapazitätsbedarf in Periode t und Periode m
\widehat{gx}_{tm}^{AF}	Gewichtungsfaktor für Nachfrage in Periode t und Periode m

Variablen

\widehat{D}_{tm}^{AF}	Antizipierter zusätzlicher Kapazitätsbedarf in Periode t und Periode m
\widehat{E}_{tm}^{AF}	Antizipierte direkte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung in Periode t und Periode m
\widehat{F}_{tm}^{AF}	Antizipierte vor- oder nachgelagerte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung in Periode t und Periode m
K_{tm}^{AF+}	Antizipierter Kapazitätsüberschuss in Periode t und Periode m
K_{tm}^{AF-}	Antizipierter Kapazitätsmangel in Periode t und Periode m
K_{tm}^{AF++}	Antizipierte in Anspruch genommene Kapazität des Kapazitätsüberschusses in Periode t und Periode m

Modell

$$\widehat{M}_{t=1\dots T}^B = \widehat{M}_{t=1\dots T}^B(\widehat{C}_{t=1\dots T}^B, \widehat{A}_{t=1\dots T}^B, \widehat{I}^B) \quad (5.18)$$

$$\widehat{C}_{t=1\dots T}^B = C_{t=1\dots T}^{TB} = - \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M (\widehat{cd}^{AF} \widehat{D}_{tm}^{AF} + \widehat{ce}^{AF} \widehat{E}_{tm}^{AF} + \widehat{cf}^{AF} \widehat{F}_{tm}^{AF}) \quad (5.19)$$

$$k^B Y_t^T - ax^T X_t^T \widehat{gx}_{tm}^{AF} - \widehat{D}_{tm}^{AF} = K_{tm}^{AF+} - K_{tm}^{AF-} \quad \forall t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (5.20)$$

$$\widehat{D}_{tm}^{AF} = X_t^T \widehat{gd}_{tm}^{AF} \quad \forall t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (5.21)$$

$$K_{tm}^{AF++} + \widehat{E}_{tm}^{AF} + \widehat{F}_{t,m-1}^{AF} = K_{tm}^{AF-} + \widehat{F}_{tm}^{AF} \quad \forall t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (5.22)$$

$$K_{tm}^{AF++} \leq K_{tm}^{AF+} \quad \forall t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (5.23)$$

$$\widehat{D}_{tm}^{AF}, \widehat{E}_{tm}^{AF}, \widehat{F}_{tm}^{AF}, K_{tm}^{AF+}, K_{tm}^{AF-}, K_{tm}^{AF++} \geq 0 \quad \forall t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (5.24)$$

$$\widehat{A}_{t=1\dots T}^B := \{\widehat{a}_{t=1\dots T}^{B*} : (5.20) \wedge (5.21) \wedge (5.22) \wedge (5.23) \wedge (5.24)\} \quad (5.25)$$

$$AF(IN) = \widehat{a}_{t=1\dots T}^{B*} = \arg \max_{\widehat{a}_{t=1\dots T}^B \in \widehat{A}_{IN,t=1\dots T}^B} \{\widehat{C}_{IN,t=1\dots T}^B(\widehat{a}_{t=1\dots T}^B) | \widehat{I}_{IN}^B\} \quad (5.26)$$

$$a_{t=1\dots T}^{T*} = \arg \max_{a_{t=1\dots T}^T \in A_{t=1\dots T}^T} \{C_{t=1\dots T}^{TT}(a_{t=1\dots T}^T) + \widehat{C}_{t=1\dots T}^B(AF(IN)) | I^T, \widehat{I}_{IN}^B\} \quad (5.27)$$

Das Symbolverzeichnis macht bereits deutlich, dass die erläuterten Gruppen von zu antizipierenden Bestandteilen der Basis-Ebene in der vorliegenden Antizipationsfunktion betrachtet werden. Detaillierte Daten werden in Form von Gewichtungsfaktoren für zusätzliche Kapazitätsbedarfe $\widehat{g}d_{tm}^{AF}$ und Gewichtungsfaktoren für detaillierte Nachfragen $\widehat{g}x_{tm}^{AF}$ berücksichtigt. Diese ergeben in Verbindung mit den aggregierten Entscheidungsmengen der Top-Ebene X_t^T antizipierte zusätzliche Kapazitätsbedarfe (\widehat{D}_{tm}^{AF}) bzw. antizipierte Nachfragen der Basis-Ebene. Zudem werden antizipierte direkte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung \widehat{E}_{tm}^{AF} und antizipierte vor- oder nachgelagerte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung \widehat{F}_{tm}^{AF} beachtet.

Das antizipierte Modell der Basis-Ebene $\widehat{M}_{t=1\dots T}^B$ wird in (5.18) analog zu (4.22) dargestellt und für alle Perioden $t = 1 \dots T$ der langfristigen Planung durchgeführt. Die antizipierte Zielsetzung der Basis-Ebene $\widehat{C}_{t=1\dots T}^B$ entspricht dem Top-Down Kriterium $C_{t=1\dots T}^{TB}$ und setzt sich aus den antizipierten Kosten für zusätzliche Kapazitätsbedarfe und den antizipierten Kosten für direkte sowie vor- oder nachgelagerte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung zusammen (siehe (5.19)).

Das antizipierte Entscheidungsfeld der Basis-Ebene $\widehat{A}_{t=1\dots T}^B$ berücksichtigt die Nebenbedingungen (5.20) bis (5.24), wie in (5.25) zu erkennen ist. Diese Nebenbedingungen bilden den Kern der Antizipationsfunktion. Ausgangspunkt sind die Restriktionen (5.20), welche Kapazitätsüberschüsse und -mängel (K_{tm}^{AF+} bzw. K_{tm}^{AF-}) berechnen, indem von den zur Verfügung stehenden detaillierten Kapazitäten ($k^B Y_t^T$), welche von der aktuellen binären Strukturentscheidung Y_t^T abhängig sind, antizipierte Kapazitätsbedarfe abgezogen werden. Die antizipierten Kapazitätsbedarfe setzen sich aus den antizipierten Kapazitätsbedarfen für detaillierte Nachfragen ($ax^T X_t^T \widehat{g}x_{tm}^{AF}$), welche von den aktuellen Entscheidungsmengen der Top-Ebene X_t^T abhängig sind, und den antizipierten zusätzlichen Kapazitätsbedarfen \widehat{D}_{tm}^{AF} zusammen. (5.21) definieren die antizipierten zusätzlichen Kapazitätsbedarfe durch die Gewichtungsfaktoren $\widehat{g}d_{tm}^{AF}$ und die aktuellen

Entscheidungsmengen der Top-Ebene X_t^T . Um die zuvor ermittelten Kapazitätsmängel K_{tm}^{AF-} auszugleichen, stehen in den Kapazitätsbilanzgleichungen (5.22) antizipierte direkte und vor- oder nachgelagerte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung (\hat{E}_{tm}^{AF} bzw. \hat{F}_{tm}^{AF}) zur Verfügung. Insbesondere für antizipierte vor- oder nachgelagerte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung müssen Kapazitätsüberschüsse in anderen Perioden in Anspruch genommen werden (K_{tm}^{AF++}). An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass die betrachteten antizipierten direkten sowie vor- oder nachgelagerten Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung mit einem positiven oder negativen Vorzeichen modelliert werden können. Die vorliegende Gleichung bezieht sich beispielsweise auf vorgelagerte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung, welche sich durch einen Vorzeichenwechsel zu nachgelagerten Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung umwandeln lassen. Die Restriktionen (5.23) begrenzen die in Anspruch genommenen Kapazitätsüberschüsse K_{tm}^{AF++} durch die vorhandenen Kapazitätsüberschüsse K_{tm}^{AF+} . (5.24) stellen letztendlich die Nichtnegativitätsbedingungen dar.

Die Antizipationsfunktion $AF(IN)$ beschreibt die antizipierte optimale Entscheidung der Basis-Ebene $\hat{a}_{t=1..T}^{B*}$, welche sich durch die Maximierung der antizipierten Zielsetzung ergibt (siehe (5.26)). Dabei müssen das antizipierte Entscheidungsfeld und der antizipierte Informationsstatus der Basis-Ebene sowie die aktuelle Instruktion der Top-Ebene berücksichtigt werden. Da das Ergebnis der Antizipationsfunktion auch die optimale Entscheidung der Top-Ebene $a_{t=1..T}^{T*}$ beeinflusst, definiert (5.27), dass die optimale Entscheidung der Top-Ebene im Vergleich zur bisherigen optimalen Entscheidung der Top-Ebene in (5.7), auch die antizipierte Zielsetzung der Basis-Ebene $\hat{C}_{t=1..T}^B(AF(IN))$ und den antizipierten Informationsstatus der Basis-Ebene \hat{I}_{IN}^B berücksichtigt.

Wird die vorgestellte Antizipationsfunktion für die Modellierung einer konkreten Problemstellung herangezogen, so bestehen aufgrund der allgemeinen Formulierung der Antizipationsfunktion mehrere Freiheitsgrade. Diese Freiheiten betreffen beispielsweise zusätzliche Indizes oder führen zu Vorzeichenwechseln bei Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung. Des Weiteren ist der Detaillierungsgrad der antizipierten Basis-Ebene nicht fest vorgeschrieben und kann ebenfalls variieren. So können die Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung z.B. als reine Kapazitäten oder als konkrete Mengen modelliert werden.

Durch diese Freiheitsgrade kann die Antizipationsfunktion für verschiedene hierarchische Planungssituationen mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden eingesetzt werden.

5.1.2 Allgemeine Formulierung einer teilweise explizit exakten Antizipationsfunktion

Einen alternativen Ansatz liefert die teilweise explizit exakte Antizipationsfunktion, die für ausgewählte Perioden die Basis-Ebene exakt antizipiert, wobei die Periodenlänge in diesem Fall der Periodenlänge der Top-Ebene und somit dem Planungszeitraum der Basis-Ebene entspricht, und die Ergebnisse für eine approximierte Antizipation der restlichen Perioden nutzt. Die Antizipation der ersten Periode bei einer langfristigen Be-

trachtung von $t = 1 \dots T$, führt beispielsweise dazu, dass die Basis-Ebene für die Periode $t = 1$ exakt antizipiert und das Ergebnis zur approximierten Antizipation der Perioden $t = 2 \dots T$ genutzt wird. So können exakte Ergebnisse der Basis-Ebene, die Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung und zusätzliche Kapazitätsbedarfe beinhalten, in der Planung der Top-Ebene berücksichtigt werden, ohne eine perfekte Antizipation bzw. ein Gesamtmodell zu nutzen.

Im weiteren Verlauf werden zwei Varianten der teilweise explizit exakten Antizipationsfunktion vorgestellt. Die erste Variante antizipiert die Basis-Ebene nur für eine Periode exakt, während die zweite Variante zwei Perioden exakt antizipiert. Zuvor werden jedoch die dazu vorausgesetzten Modelle der Top- und Basis-Ebene beschrieben.

Modell der Top-Ebene

Als Modell der Top-Ebene wird das vorgestellte Modell ((5.1) - (5.7)) aus dem vorigen Kapitel 5.1.1 sowie die Instruktion (5.8) verwendet. Wichtige Annahmen sind, dass die Top-Ebene binäre Strukturentscheidungen und reellwertige Entscheidungsmengen enthält und diese als Instruktion an die Basis-Ebene weitergibt.

Modell der Basis-Ebene

$$RE_{t=1}^* = \{\hat{g}c_t^{AF,t=1}, \hat{g}c_t^{AF,t=tt}, \dots\} \quad (5.28)$$

Das Modell der Basis-Ebene entspricht vollständig dem Modell ((5.9) - (5.16)) aus Kapitel 5.1.1, wobei wichtig ist, dass Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung und zusätzliche Kapazitätsbedarfe im Modell der Basis-Ebene abgebildet werden. Als Unterschied zur Basis-Ebene aus Kapitel 5.1.1, wird die Definition der Reaktion der Basis-Ebene (5.17) durch die Formulierung (5.28) ersetzt, da für die teilweise explizit exakte Antizipationsfunktion abweichende Daten, wie die Gewichtungsfaktoren der Perioden $t = 1$ und $t = tt$ ($\hat{g}c_t^{AF,t=1}$ bzw. $\hat{g}c_t^{AF,t=tt}$), erforderlich sind.

Teilweise explizit exakte Antizipationsfunktion mit einer Periode

Im Folgenden wird zunächst die teilweise explizit exakte Antizipationsfunktion mit einer Periode vorgestellt, für die das nachstehende Symbol zusätzlich notwendig ist.

Daten

$\hat{g}c_t^{AF,t=1}$ Gewichtungsfaktor für Zielsetzung aus der Periode $t = 1$ für die Periode t

Modell

$$\widehat{M}_{t=1\dots T}^B = \widehat{M}_{t=1\dots T}^B(\widehat{C}_{t=1\dots T}^B, \widehat{A}_{t=1}^B, \widehat{I}^B) \quad (5.29)$$

$$\widehat{C}_{t=1\dots T}^B = C_{t=1\dots T}^{TB} = C_{t=1}^B + \sum_{t=2}^T (\widehat{g}c_t^{AF,t=1} C_{t=1}^B) \quad (5.30)$$

$$\widehat{A}_{t=1}^B := \{\widehat{a}_{t=1}^{B*} : A_{t=1}^B\} \quad (5.31)$$

$$AF(IN) = \widehat{a}_{t=1}^{B*} = \arg \max_{\widehat{a}_{t=1}^B \in \widehat{A}_{IN,t=1}^B} \{\widehat{C}_{IN,t=1\dots T}^B(\widehat{a}_{t=1}^B) | \widehat{I}_{IN}^B\} \quad (5.32)$$

$$a_{t=1\dots T}^{T*} = \arg \max_{a_{t=1\dots T}^T \in A_{t=1\dots T}^T} \{C_{t=1\dots T}^{TT}(a_{t=1\dots T}^T) + \widehat{C}_{t=1\dots T}^B(AF(IN)) | I^T, \widehat{I}_{IN}^B\} \quad (5.33)$$

Das antizipierte Modell der Basis-Ebene $\widehat{M}_{t=1\dots T}^B$ wird in (5.29) beschrieben und setzt sich aus der antizipierten Zielsetzung $\widehat{C}_{t=1\dots T}^B$, dem antizipierten Entscheidungsfeld $\widehat{A}_{t=1}^B$ und dem antizipierten Informationsstatus \widehat{I}^B der Basis-Ebene zusammen. Die Besonderheit an dieser Stelle ist die Beschränkung des antizipierten Entscheidungsfeldes auf die Periode $t = 1$, was durch die teilweise explizit exakte Antizipation nur einer Periode begründet ist. Die Antizipation der Basis-Ebene für die erste Periode bietet sich deswegen an, da die Entscheidungen der Basis-Ebene in dieser Periode die zeitlich nächsten und somit am zuverlässigsten im Hinblick auf Unsicherheiten sind.

Diese Besonderheit wird auch in (5.30) für die antizipierte Zielsetzung bzw. das Top-Down Kriterium $C_{t=1\dots T}^{TB}$ und in (5.31) für das antizipierte Entscheidungsfeld $\widehat{A}_{t=1}^B$ berücksichtigt. Die antizipierte Zielsetzung besteht zum einen aus der realen Zielsetzung der Basis-Ebene für die Periode $t = 1$ ($C_{t=1}^B$) und zum anderen aus den antizipierten Zielsetzungen der Basis-Ebene der Perioden $t = 2 \dots T$, indem die reale Zielsetzung der Basis-Ebene der ersten Periode mit einem Gewichtungsfaktor für jede Periode multipliziert wird ($\widehat{g}c_t^{AF,t=1} C_{t=1}^B$) (siehe (5.30)). Das antizipierte Entscheidungsfeld besteht nur aus dem realen Entscheidungsfeld der Basis-Ebene für die Periode $t = 1$ ($A_{t=1}^B$) (siehe (5.31)).

Die Antizipationsfunktion $AF(IN)$ entspricht der antizipierten optimalen Entscheidung der Basis-Ebene für die erste Periode $\widehat{a}_{t=1}^{B*}$ (siehe (5.32)), welche sich durch eine Maximierung der antizipierten Zielsetzung $\widehat{C}_{IN,t=1\dots T}^B$ unter Beachtung des antizipierten Entscheidungsfeldes $\widehat{A}_{IN,t=1}^B$ und des antizipierten Informationsstatus \widehat{I}_{IN}^B der Basis-Ebene ergibt. Dabei sind die Bestandteile von der aktuellen Instruktion der Top-Ebene IN abhängig. Das Ergebnis der Antizipationsfunktion beeinflusst letztlich auch die optimale Entscheidung der Top-Ebene $a_{t=1\dots T}^{T*}$, welche in (5.33) definiert ist. Hier wird neben dem privaten Kriterium der Top-Ebene auch die antizipierte Zielsetzung der Basis-Ebene in der Zielsetzung maximiert und der antizipierte Informationsstatus muss zusätzlich berücksichtigt werden.

Als Ergebnis lassen sich mit dieser Antizipationsfunktion alle Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung sowie zusätzliche Kapazitätsbedarfe für die betrachtete Periode exakt und für alle weiteren Perioden approximiert antizipieren.

Teilweise explizit exakte Antizipationsfunktion mit zwei Perioden

Falls sich im langfristigen Planungszeitraum Strukturveränderungen ergeben, kann die Antizipation der Basis-Ebene für spätere Perioden auf Basis der Antizipation der ersten Periode nicht mehr korrekt sein, zum Beispiel weil Standorte geschlossen wurden. Deshalb wird im Folgenden eine teilweise explizit exakte Antizipationsfunktion mit zwei Perioden vorgestellt, die die Basis-Ebene nicht nur für die erste Periode $t = 1$, sondern auch für eine weitere Periode $t = tt$ exakt antizipiert. Dazu werden die nachstehenden Symbole zusätzlich benötigt.

Indizes

tt Ausgewählte zweite Periode der Antizipationsfunktion

Daten

$\hat{g}c_t^{AF,t=tt}$ Gewichtungsfaktor für Zielsetzung aus der Periode $t = tt$ für die Periode t

Modell

$$\widehat{M}_{t=1\dots T}^B = \widehat{M}_{t=1\dots T}^B(\widehat{C}_{t=1\dots T}^B, \widehat{A}_{t=1\wedge t=tt}^B, \widehat{I}^B) \quad (5.34)$$

$$\widehat{C}_{t=1\dots T}^B = C_{t=1\dots T}^{TB} = C_{t=1}^B + \sum_{t=2}^{tt-1} (\hat{g}c_t^{AF,t=1} C_{t=1}^B) + C_{t=tt}^B + \sum_{t=tt+1}^T (\hat{g}c_t^{AF,t=tt} C_{t=tt}^B) \quad (5.35)$$

$$\widehat{A}_{t=1\wedge t=tt}^B := \{\hat{a}_{t=1\wedge t=tt}^{B*} : A_{t=1}^B \wedge A_{t=tt}^B\} \quad (5.36)$$

$$AF(IN) = \hat{a}_{t=1\wedge t=tt}^{B*} = \arg \min_{\hat{a}_{t=1\wedge t=tt}^B \in \widehat{A}_{IN,t=1\wedge t=tt}^B} \{\widehat{C}_{IN,t=1\dots T}^B(\hat{a}_{t=1\wedge t=tt}^B) | \widehat{I}_{IN}^B\} \quad (5.37)$$

$$a_{t=1\dots T}^{T*} = \arg \min_{a_{t=1\dots T}^T \in A_{t=1\dots T}^T} \{C_{t=1\dots T}^{TT}(a_{t=1\dots T}^T) + \widehat{C}_{t=1\dots T}^B(AF(IN)) | I^T, \widehat{I}_{IN}^B\} \quad (5.38)$$

Der Unterschied zur Antizipationsfunktion mit nur einer Periode besteht darin, dass die Basis-Ebene nun zusätzlich für eine zweite Periode $t = tt$ exakt antizipiert wird. Dies hat zur Folge, dass das antizipierte Modell der Basis-Ebene ein antizipiertes Entscheidungsfeld $\widehat{A}_{t=1\wedge t=tt}^B$ berücksichtigt, dass für die Perioden $t = 1$ und $t = tt$ gilt (siehe (5.34)).

Die antizipierte Zielsetzung $\widehat{C}_{t=1\dots T}^B$, welche auch hier als Top-Down Kriterium $C_{t=1\dots T}^{TB}$ dargestellt wird, setzt sich aus der realen Zielsetzung der Basis-Ebene der ersten ($C_{t=1}^B$) und einer zweiten Periode ($C_{t=tt}^B$) sowie den antizipierten Zielsetzungen für die restlichen Perioden zusammen (siehe (5.35)). Um die Zielsetzungen der restlichen Perioden zu antizipieren, wird für die Perioden $t = 2 \dots tt - 1$ die reale Zielsetzung der Basis-Ebene der ersten Periode mit einem Gewichtungsfaktor für jede Periode multipliziert ($\widehat{g}_t^{AF,t=1} C_{t=1}^B$) und für die Perioden $t = tt + 1 \dots T$ die reale Zielsetzung der Basis-Ebene einer zweiten Periode mit einem Gewichtungsfaktor für jede Periode multipliziert ($\widehat{g}_t^{AF,t=tt} C_{t=tt}^B$). (5.36) beschreibt das antizipierte Entscheidungsfeld $\widehat{A}_{t=1 \wedge t=tt}^B$, welches neben dem realen Entscheidungsfeld der Basis-Ebene für die erste Periode $A_{t=1}^B$ auch das reale Entscheidungsfeld der Basis-Ebene für eine zweite Periode $A_{t=tt}^B$ enthält.

Durch die Maximierung der antizipierten Zielsetzung $\widehat{C}_{IN,t=1\dots T}^B$ mit Berücksichtigung des antizipierten Entscheidungsfeldes $\widehat{A}_{IN,t=1 \wedge t=tt}^B$ und antizipierten Informationsstatus \widehat{I}_{IN}^B , die von der aktuellen Instruktion der Top-Ebene IN abhängig sind, ergibt sich die antizipierte optimale Entscheidung der Basis-Ebene für die Perioden $t = 1$ und $t = tt$ ($\widehat{a}_{t=1 \wedge t=tt}^{B*}$), welche dem Ergebnis der Antizipationsfunktion $AF(IN)$ entspricht (siehe (5.37)). Die Auswirkung der Antizipationsfunktion auf die optimale Entscheidung der Top-Ebene $a_{t=1\dots T}^{T*}$ wird in (5.38) analog zu (5.33) dargestellt.

Die vorgestellten teilweise explizit exakten Antizipationsfunktionen mit einer und zwei Perioden lassen sich unproblematisch implementieren, da sie die Basis-Ebene für bestimmte Perioden exakt abbilden. Sie sind auch mühelos auf andere hierarchische Planungssituationen anwendbar, insbesondere wenn unterschiedliche Fristigkeiten auf den betrachteten Planungsebenen vorliegen. Je nach Häufigkeit von erheblichen Strukturveränderungen im Planungszeitraum der Top-Ebene, wäre auch eine Antizipation von drei und mehr Perioden denkbar. Der Rechenaufwand nähert sich dann aber der perfekten Antizipation.

5.2 Varianten der hierarchischen Koordination mit den entwickelten Antizipationsfunktionen

Nachdem die allgemeinen Formulierungen der entwickelten Antizipationsfunktionen vorgestellt wurden, werden diese im weiteren Verlauf auf die vorliegende Planungssituation angewandt, um die Koordination der langfristigen Standortplanung (Top-Ebene) und mittelfristigen Produktionsplanung (Basis-Ebene) zu verbessern.

Dazu werden insgesamt vier konkrete Antizipationsfunktionen für die Koordination der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung aufgestellt und beschrieben. Zwei der Antizipationsfunktionen basieren auf der explizit approximierten

Antizipation und zwei Antizipationsfunktionen setzen die teilweise explizit exakte Antizipation um.

Die folgenden Punkte zeigen die genaue Einordnung der entwickelten Antizipationsfunktionen.

- Explizit approximierte Antizipation:
 - Mengenmäßig explizit approximierte Antizipationsfunktion
 - Kapazitätsmäßig explizit approximierte Antizipationsfunktion
- Teilweise explizit exakte Antizipation:
 - Teilweise explizit exakte Antizipationsfunktion mit einer Periode
 - Teilweise explizit exakte Antizipationsfunktion mit zwei Perioden

5.2.1 Mengenmäßig explizit approximierte Antizipationsfunktion

Als erste der beiden explizit approximierten Antizipationsfunktionen wird eine mengenmäßig explizit approximierte Antizipationsfunktion (ExApMe) vorgestellt, die die allgemeine Formulierung aus Kapitel 5.1.1 verwendet und einen hohen Detaillierungsgrad der antizipierten Basis-Ebene bzw. mittelfristigen Produktionsplanung anhand von konkreten Entscheidungsmengen besitzt.

Die Antizipationsfunktion wird direkt in das Modell der Standortplanung integriert, weshalb zunächst die notwendigen Symbole und anschließend das Modell der Standortplanung mit mengenmäßig explizit approximierter Antizipationsfunktion vorgestellt werden.

Daten

cb_{kp}^{AF}	Kosten für Backordermenge von Markt k für Produktgruppe p
cl_{sp}^{AF}	Lagerkostensatz von Produktgruppe p an Standort s
cls_{kp}^{AF}	Kosten für Lost Sales von Markt k für Produktgruppe p
cr_{sp}^{AF}	Rüstkosten für Produktgruppe p an Standort s
crp_s^{AF}	Kosten je Rüstübergang zwischen Produktgruppen an Standort s
ct_{srp}^{AF}	Transportkosten von Standort s zu Standort r für Produktgruppe p
cz_s^{AF}	Kosten für Zusatzkapazitäten an Standort s
dg_{kpm}^{AF}	Anteil der Nachfrage von Markt k für Produktgruppe p in Periode m innerhalb eines Jahres

$lmax_s^{AF}$	Maximaler Lagerbestand an Standort s
M^{AF}	Hinreichend große Zahl
ra_{sp}^{AF}	Rüstzeit von Produktgruppe p an Standort s
rap_s^{AF}	Rüstzeit je Rüstübergang zwischen Produktgruppen an Standort s
$zmax_s^{AF}$	Maximale Zusatzkapazitäten an Standort s
π^{AF}	Anteil der Backordermenge, der nach einer Periode als Lost Sales auftritt
$L_{spt,m=0}^{AF}$	Antizipierter Lageranfangsbestand von Produktgruppe p an Standort s in Periode $m = 0$ und Periode t
$B_{skpt,m=0}^{AF}$	Antizipierte Backordermenge von Produktgruppe p an Standort s für Markt k in Periode $m = 0$ und Periode t

Variablen

B_{skptm}^{AF}	Antizipierte Backordermenge von Produktgruppe p an Standort s für Markt k in Periode m und Periode t
KB_{stm}^{AF}	Antizipierte vorhandene Kapazität in Form von Backordermengen an Standort s in Periode m und Periode t
KL_{stm}^{AF}	Antizipierte vorhandene Kapazität in Form von Lagerbestand an Standort s in Periode m und Periode t
KL_{stm}^{AF}	Antizipierte vorhandene Kapazität in Form von Lost Sales an Standort s in Periode m und Periode t
KM_{stm}^{AF}	Antizipierter Kapazitätsmangel an Standort s in Periode m und Periode t
KT_{srtm}^{AF}	Antizipierte vorhandene Kapazität in Form von Transportmengen von Standort s an Standort r in Periode m und Periode t
KU_{stm}^{AF}	Antizipierter Kapazitätsüberschuss an Standort s in Periode m und Periode t
KUA_{stm}^{AF}	Antizipierte in Anspruch genommene Kapazität des Kapazitätsüberschusses an Standort s in Periode m und Periode t
L_{sptm}^{AF}	Antizipierter Lagerbestand von Produktgruppe p an Standort s am Ende der Periode m und Periode t
LS_{skptm}^{AF}	Antizipierte Lost Sales von Produktgruppe p an Standort s für Markt k in Periode m und Periode t

RP_{sptm}^{AF}	1, wenn für Produktgruppe p an Standort s in Periode m und Periode t gerüstet wird; 0, sonst
RPR_{stm}^{AF}	Anzahl an Rüstvorgängen zwischen Produktgruppen an Standort s in Periode m und Periode t
T_{srptm}^{AF}	Antizipierte Transportmengen von Produktgruppe p aus Standort s an Standort r in Periode m und Periode t
Z_{stm}^{AF}	Antizipierte Zusatzkapazitäten an Standort s in Periode m und Periode t

Mathematisches Modell

$$\max C_{t=1\dots T}^{TT} + \widehat{C}_{t=1\dots T}^{B,ExApMe} \quad (5.39)$$

$$C_{t=1\dots T}^{TT} = (3.1) \quad (5.40)$$

$$\begin{aligned} \widehat{C}_{t=1\dots T}^{B,ExApMe} = & - \sum_{t=1}^T \left(\sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} (p_{kp}^{TM} - cx_{skp}^{TM}) \left(\sum_{m=1}^M LS_{skptm}^{AF} \right) + \sum_{s \in S} \sum_{m=1}^M cz_s^{AF} Z_{stm}^{AF} + \right. \\ & \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} \sum_{m=1}^M cl_{sp}^{AF} L_{sptm}^{AF} + \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} \sum_{m=1}^M cr_{sp}^{AF} RP_{sptm}^{AF} + \sum_{s \in S} \sum_{m=1}^M crp_s^{AF} RPR_{stm}^{AF} + \\ & \left. \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{m=1}^M (cb_{kp}^{AF} B_{skptm}^{AF} + cl_{skp}^{AF} LS_{skptm}^{AF}) + \sum_{s \in S} \sum_{r \in S} \sum_{p \in P} \sum_{m=1}^M ct_{srp}^{AF} T_{srptm}^{AF} \right) (1+z)^{-(t-1)} \end{aligned} \quad (5.41)$$

U.d.N.:

$$(3.2) - (3.17)$$

$$\begin{aligned} \frac{k_s^{TM} Y K_{st}^{TM}}{12} - \sum_{p \in P} ra_{sp}^{AF} RP_{sptm}^{AF} - rap_s^{AF} RPR_{stm}^{AF} - \\ \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} (a_{sp}^{TM} dg_{kpm}^{AF} X D_{skpt}^{TM}) = KU_{stm}^{AF} - KM_{stm}^{AF} \quad \forall s \in S, t = 1 \dots T, \\ m = 1 \dots M \end{aligned} \quad (5.42)$$

$$\begin{aligned} KL_{stm-1}^{AF} + Z_{stm}^{AF} + KU_{stm}^{AF} + KB_{stm}^{AF} + KLS_{stm}^{AF} + \sum_{r \in S} KT_{rstm}^{AF} = \\ KL_{stm}^{AF} + KM_{stm}^{AF} + KB_{st,m-1}^{AF} + \sum_{r \in S} KT_{srmt}^{AF} \quad \forall s \in S, t = 1 \dots T, \\ m = 1 \dots M \end{aligned} \quad (5.43)$$

$$KL_{stm}^{AF} = \sum_{p \in P} a_{sp}^{TM} L_{sptm}^{AF} \quad \forall s \in S, t = 1 \dots T, m = 0 \dots M \quad (5.44)$$

$$KB_{stm}^{AF} = \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} a_{sp}^{TM} B_{skptm}^{AF} \quad \forall s \in S, t = 1 \dots T, m = 0 \dots M \quad (5.45)$$

$$KLS_{stm}^{AF} = \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} a_{sp}^{TM} LS_{skptm}^{AF} \quad \forall s \in S, t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (5.46)$$

$$KLS_{stm}^{AF} = KB_{st,m-1}^{AF} \pi^{AF} \quad \forall s \in S, t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (5.47)$$

$$KT_{srpm}^{AF} = \sum_{p \in P} a_{sp}^{TM} T_{srptm}^{AF} \quad \forall s \in S, r \in S, t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (5.48)$$

$$KUA_{stm}^{AF} \leq KU_{stm}^{AF} \quad \forall s \in S, t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (5.49)$$

$$L_{sptm}^{AF} \leq \text{max}_s^{AF} Y P_{spt}^{TM} \quad \forall s \in S, p \in P, t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (5.50)$$

$$\sum_{p \in P} L_{sptm}^{AF} \leq \text{max}_s^{AF} Y K_{st}^{TM} \quad \forall s \in S, t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (5.51)$$

$$Z_{stm}^{AF} \leq \text{max}_s^{AF} Y K_{st}^{TM} \quad \forall s \in S, t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (5.52)$$

$$\sum_{k \in K} dg_{kpm}^{AF} X D_{skpt}^{TM} \leq M^{AF} R P_{sptm}^{AF} \quad \forall s \in S, p \in P, t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (5.53)$$

$$R P R_{stm}^{AF} \geq \sum_{p \in P} R P_{sptm}^{AF} - 1 \quad \forall s \in S, t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (5.54)$$

$$\begin{aligned} & Z_{stm}^{AF}, L_{sptm}^{AF}, B_{skptm}^{AF}, LS_{skptm}^{AF}, T_{srptm}^{AF}, \\ & K U_{stm}^{AF}, K M_{stm}^{AF}, K U A_{stm}^{AF} \geq 0 \quad \forall s \in S, r \in S, k \in K, p \in P, \\ & t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \end{aligned} \quad (5.55)$$

$$R P_{sptm}^{AF} \in \{0, 1\} \quad \forall s \in S, p \in P, t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (5.56)$$

$$R P R_{stm}^{AF} \geq 0 \quad \forall s \in S, t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (5.57)$$

Wie erläutert, ist die Antizipationsfunktion in das Modell der Standortplanung integriert. Deshalb wird die bisherige Zielfunktion, welche bislang nur das private Kriterium

der Standortplanung $C_{t=1...T}^{TT}$ enthielt, um die antizipierte Zielsetzung der mittelfristigen Produktionsplanung $\widehat{C}_{t=1...T}^{B,ExpMe}$ erweitert und maximiert (siehe (5.39)). (5.40) setzt die bisherige Zielfunktion (3.1) als privates Kriterium der Standortplanung ein. Die antizipierte Zielsetzung der mittelfristigen Produktionsplanung wird in (5.41) definiert, welche sich nur aus Kosten zusammensetzt und dementsprechend durch ein negatives Vorzeichen vom privaten Kriterium abgezogen wird. Die antizipierten Kosten setzen sich aus Einnahmeverlusten durch Lost Sales sowie Kosten für Zusatzkapazitäten, Lagerhaltung, Rüstvorgänge für Produktgruppen, Rüstvorgänge zwischen unterschiedlichen Produktgruppen, Backordermengen, Lost Sales und Transportmengen zwischen Standorten zusammen. Aufgrund der Langfristigkeit der Standortplanung werden die gesamten Kosten zudem mit dem Kapitalzinssatz abgezinst. Somit entspricht die angewandte antizipierte Zielsetzung der mittelfristigen Produktionsplanung auch der allgemein formulierten antizipierten Zielsetzung (5.19), welche ebenfalls alle Kosten für antizipierte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung und zusätzliche Kapazitätsbedarfe berücksichtigt.

Die Nebenbedingungen der Standortplanung (3.2) bis (3.17) bleiben weiterhin bestehen und werden durch die Restriktionen der Antizipationsfunktion ergänzt.

Die Restriktionen (5.42) und (5.43) stellen die essentiellen Nebenbedingungen der Antizipationsfunktion dar. (5.42) berechnen die antizipierten Kapazitätsüberschüsse und -mängel (KU_{stm}^{AF} bzw. KM_{stm}^{AF}). Dazu werden von den vorhandenen monatlichen Kapazitäten die antizipierten Rüstzeiten für Produktgruppen und antizipierten Rüstzeiten zwischen unterschiedlichen Produktgruppen sowie die antizipierten monatlichen Kapazitätsbedarfe anhand der Jahresabsatzmengen ($a_{sp}^{TM} dg_{kpm}^{AF} X D_{skpt}^{TM}$) abgezogen. Zum Ausgleich der Kapazitätsmängel dienen die Kapazitätsbilanzgleichungen (5.43). Diese stellen sicher, dass die antizipierten vorhandenen Kapazitäten in Form von Lost Sales der letzten Periode, Zusatzkapazitäten, in Anspruch genommenen Kapazitätsüberschüssen, Backordermengen und Lost Sales sowie Transportmengen zum betrachteten Standort, den antizipierten vorhandenen Kapazitäten in Form von Lost Sales der aktuellen Periode, Kapazitätsmängeln, Backordermengen der letzten Periode sowie Transportmengen vom betrachteten Standort entsprechen.

(5.44) bis (5.46) und (5.48) definieren die antizipierten vorhandenen Kapazitäten in Form von Lagerbestand, Backordermengen, Lost Sales und Transportmengen zwischen Standorten. Dazu werden die zugehörigen antizipierten Mengen jeweils mit dem Produktionskoeffizienten a_{sp}^{TM} multipliziert, um die Mengen in Kapazitäten umzuwandeln. (5.47) bewirken, dass sich die antizipierten vorhandenen Kapazitäten in Form von Lost Sales der aktuellen Periode, aus dem vorgegebenen Anteil π^{AF} der antizipierten vorhandenen Kapazitäten in Form von Backordermengen der letzten Periode ergeben.

Die antizipierten in Anspruch genommenen Kapazitätsüberschüsse KUA_{stm}^{AF} werden mit (5.49) durch die antizipierten Kapazitätsüberschüsse KU_{stm}^{AF} begrenzt. Weitere Begrenzungen stellen die Nebenbedingungen (5.50) bis (5.52) dar. (5.50) beschränken den antizipierten Lagerbestand einer Produktgruppe p auf den maximalen Lagerbestand

$lmax_s^{AF}$, wenn für die entsprechende Produktgruppe in Periode t eine Produkt-Werk-Allokation YP_{spt}^{TM} am Standort vorgesehen ist. Die grundsätzliche Begrenzung der antizipierten Lagerbestände wird durch (5.51), je nach Standortkapazität YK_{st}^{TM} , sichergestellt. Analog dazu stellen (5.52) sicher, dass die antizipierten Zusatzkapazitäten die maximale Zusatzkapazität $zmax_s^{AF}$ in Verbindung mit der vorhandenen Standortkapazität nicht überschreiten.

Die Rüstbedingungen werden durch (5.53) und (5.54) beschrieben. Ob für eine Produktgruppe p in einem bestimmten Monat m gerüstet werden muss, antizipieren (5.53) als Big M Restriktionen, wobei die Jahresabsatzmengen mit dem Gewichtungsfaktor dg_{kpm}^{AF} multipliziert werden, um die monatlichen Absatzmengen zu antizipieren. (5.54) berechnen die antizipierte Anzahl an Rüstübergängen zwischen unterschiedlichen Produktgruppen, indem von der Summe der Rüstvorgänge der einzelnen Produktgruppen ein Rüstvorgang abgezogen wird.

(5.55) bis (5.57) stellen die Binär- und Nichtnegativitätsbedingungen dar.

Das vorgestellte Modell enthält somit alle Bestandteile der allgemein formulierten explizit approximierten Antizipationsfunktion und kann nun zur besseren Übersicht in die Notation nach Schneeweiß gebracht werden.

Modell der Top-Ebene

Das Modell der Top-Ebene bzw. Standortplanung setzt sich analog zum Modell der Top-Ebene aus Kapitel 4.1 aus den Gleichungen (4.1) bis (4.4) und der Instruktion (4.9) zusammen, wobei die Definition der Zielsetzung (4.2) durch die Zielsetzung (5.58) ersetzt wird.

$$C_{t=1\dots T}^T = C_{t=1\dots T}^{TT} \quad (5.40)$$

Modell der Basis-Ebene

Auch das Modell der Basis-Ebene bzw. mittelfristigen Produktionsplanung entspricht dem Modell der Basis-Ebene aus Kapitel 4.1 mit den Gleichungen (4.5) bis (4.8). Als Reaktion dient jedoch die Gleichung (5.59).

$$RE_{t=1}^* = \{cx_{skp}^{TM}, a_{sp}^{TM}, p_{kp}^{TM}, cb_{kp}^{AF}, cl_{sp}^{AF}, cls_{kp}^{AF}, cr_{sp}^{AF}, crp_s^{AF}, ct_{srp}^{AF}, cz_s^{AF}, dg_{kpm}^{AF}, lmax_s^{AF}, ra_{sp}^{AF}, rap_s^{AF}, zmax_s^{AF}, \pi^{AF}\} \quad (5.59)$$

Mengenmäßig explizit approximierte Antizipationsfunktion (ExApMe)

Die Notation des antizipierten Modells der Basis-Ebene bzw. mittelfristigen Produktionsplanung und der angewandten Antizipation wird nachfolgend genauer beschrieben.

$$\widehat{M}_{t=1\dots T}^{B,ExApMe} = \widehat{M}_{t=1\dots T}^{B,ExApMe}(\widehat{C}_{t=1\dots T}^{B,ExApMe}, \widehat{A}_{t=1\dots T}^{B,ExApMe}, \widehat{I}^B) \quad (5.60)$$

$$\widehat{C}_{t=1\dots T}^{B,ExApMe} = C_{t=1\dots T}^{TB} = (5.41) \quad (5.61)$$

$$\widehat{A}_{t=1\dots T}^{B,ExApMe} := \{\widehat{a}_{t=1\dots T}^{B,ExApMe*} : (5.42) - (5.57)\} \quad (5.62)$$

$$AF(IN) = \widehat{a}_{t=1\dots T}^{B,ExApMe*} = \arg \max_{\substack{\widehat{a}_{t=1\dots T}^{B,ExApMe} \\ \in \widehat{A}_{t=1\dots T}^{B,ExApMe}}} \{\widehat{C}_{IN,t=1\dots T}^{B,ExApMe}(\widehat{a}_{t=1\dots T}^{B,ExApMe}) | \widehat{I}_{IN}^B\} \quad (5.63)$$

$$a_{t=1\dots T}^{T*} = \arg \max_{a_{t=1\dots T}^T \in A_{t=1\dots T}^T} \{C_{t=1\dots T}^{TT}(a_{t=1\dots T}^T) + \widehat{C}_{t=1\dots T}^{B,ExApMe}(AF(IN)) | I^T, \widehat{I}_{IN}^B\} \quad (5.64)$$

(5.60) definiert das antizipierte Modell der Basis-Ebene bzw. mittelfristigen Produktionsplanung mit mengenmäßig explizit approximierter Antizipationsfunktion $\widehat{M}_{t=1\dots T}^{B,ExApMe}$, welches sich aus der antizipierten Zielsetzung $\widehat{C}_{t=1\dots T}^{B,ExApMe}$, dem antizipierten Entscheidungsfeld $\widehat{A}_{t=1\dots T}^{B,ExApMe}$ und dem antizipierten Informationsstatus \widehat{I}^B zusammensetzt.

Die antizipierte Zielsetzung wird durch (5.61) genauer beschrieben und stellt das Top-Down Kriterium der Top-Ebene bzw. Standortplanung $C_{t=1\dots T}^{TB}$ dar. Dieses entspricht der vorgestellten Zielsetzung in (5.41) und bezieht die Kosten der Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung sowie der zusätzlichen Kapazitätsbedarfe ein. Die Nebenbedingungen (5.42) bis (5.57) stellen das antizipierte Entscheidungsfeld dar (siehe (5.62)).

Das Ergebnis der Antizipationsfunktion $AF(IN)$ entspricht der antizipierten optimalen Entscheidung der mittelfristigen Produktionsplanung $\widehat{a}_{t=1\dots T}^{B,ExApMe*}$. Es kommt durch die Maximierung der antizipierten Zielsetzung $\widehat{C}_{IN,t=1\dots T}^{B,ExApMe}$ unter Beachtung des antizipierten Entscheidungsfeldes $\widehat{A}_{IN,t=1\dots T}^{B,ExApMe}$ und des antizipierten Informationsstatus \widehat{I}_{IN}^B , welche von der Instruktion der Standortplanung IN abhängig sind, zustande (siehe (5.63)). Die Antizipationsfunktion verändert abschließend auch die optimale Entscheidung der Standortplanung $a_{t=1\dots T}^{T*}$, indem die antizipierte Zielsetzung sowie der antizipierte Informationsstatus der mittelfristigen Produktionsplanung ebenfalls in die Entscheidungsfindung einbezogen werden, wie in (5.64) zu erkennen ist.

Nachdem das konkrete mathematische Modell der Antizipationsfunktion sowie die Modellbeschreibungen in der Notation nach Schneeweiß vorgestellt wurden, müssen für die in der Antizipationsfunktion benötigten Daten entsprechende Aggregationsberechnungen definiert werden, damit die Daten, sinnvoll aggregiert, als Reaktion der mittelfristigen Produktionsplanung an die Standortplanung weitergegeben werden können.

Da keine zusätzliche Instruktion von der Standort- an die mittelfristige Produktionsplanung übergeben wird, wird weiterhin die in Kapitel 4.3 definierte Disaggregation für die vorliegende Planungssituation (4.18) bis (4.21) angenommen.

Aggregation für die Daten der Reaktion

Die Aggregationsberechnungen aus Kapitel 4.3 für die grundsätzlich benötigten Daten

cx_{skp}^{TM} , a_{sp}^{TM} und p_{kp}^{TM} ((4.15) - (4.17)) werden beibehalten. Für alle weiteren Daten, die die mittelfristige Produktionsplanung per Reaktion der Standortplanung bzw. der Antizipationsfunktion zur Verfügung stellt, sind die Aggregationsberechnungen im Folgenden beschrieben.

$$cb_{kp}^{AF} = \sum_{i \in PG_p} \frac{\sum_{m=1}^M B_{skim}^{BM}}{\sum_{i' \in PG_p} \sum_{m=1}^M B_{ski'm}^{BM}} \cdot cb_{ki}^{BM} \quad \forall k \in K, p \in P \quad (5.65)$$

$$cl_{sp}^{AF} = \sum_{i \in PG_p} \frac{\sum_{m=1}^M L_{sim}^{BM}}{\sum_{i' \in PG_p} \sum_{m=1}^M L_{si'm}^{BM}} \cdot cl_{si}^{BM} \quad \forall s \in S, p \in P \quad (5.66)$$

$$cls_{kp}^{AF} = \sum_{i \in PG_p} \frac{\sum_{m=1}^M LS_{skim}^{BM}}{\sum_{i' \in PG_p} \sum_{m=1}^M LS_{ski'm}^{BM}} \cdot cls_{ki}^{BM} \quad \forall k \in K, p \in P \quad (5.67)$$

$$cr_{sp}^{AF} = \sum_{i \in PG_p} \frac{\sum_{m=1}^M R_{sim}^{BM}}{\sum_{i' \in PG_p} \sum_{m=1}^M R_{si'm}^{BM}} \cdot cr_{si}^{BM} \quad \forall s \in S, p \in P \quad (5.68)$$

$$crp_s^{AF} = crp_s^{BM} \quad \forall s \in S \quad (5.69)$$

$$ct_{srp}^{AF} = \sum_{i \in PG_p} \frac{\sum_{m=1}^M T_{srim}^{BM}}{\sum_{i' \in PG_p} \sum_{m=1}^M T_{sri'm}^{BM}} \cdot ct_{sri}^{BM} \quad \forall s \in S, r \in S, p \in P \quad (5.70)$$

$$cz_s^{AF} = cz_s^{BM} \quad \forall s \in S \quad (5.71)$$

$$dg_{kpm}^{AF} = \frac{\sum_{i \in PG_p} d_{kim}^{BM}}{\sum_{i' \in PG_p} \sum_{m'=1}^M d_{ki'm'}^{BM}} \quad \forall k \in K, p \in P, m = 1 \dots M \quad (5.72)$$

$$lmax_s^{AF} = lmax_s^{BM} \quad \forall s \in S \quad (5.73)$$

$$ra_{sp}^{AF} = \sum_{i \in PG_p} \frac{\sum_{m=1}^M R_{sim}^{BM}}{\sum_{i' \in PG_p} \sum_{m=1}^M R_{si'm}^{BM}} \cdot ra_{si}^{BM} \quad \forall s \in S, p \in P \quad (5.74)$$

$$rap_s^{AF} = rap_s^{BM} \quad \forall s \in S \quad (5.75)$$

$$zmax_s^{AF} = zmax_s^{BM} \quad \forall s \in S \quad (5.76)$$

$$\pi^{AF} = \pi^{BM} \quad (5.77)$$

Wie bei der Aggregation in Kapitel 4.3, wird auch hier eine *LP-Aggregation* (*Berechnung: Gewichtung und Addition*) für alle Daten angewandt. Ebenso wird bei der gewichteten Aggregation im Falle einer 0 im Nenner auf eine Gleichgewichtung zurückgegriffen.

Eine gewichtete Aggregation von produktbezogenen Daten auf produktgruppenbezogene Daten findet für die Kosten von Backordermengen cb_{kp}^{AF} (in (5.65)), Lagerhaltung cl_{sp}^{AF} (in (5.66)), Lost Sales cls_{kp}^{AF} (in (5.67)), Rüstvorgängen cr_{sp}^{AF} (in (5.68)) und Transportmengen zwischen Standorten ct_{srp}^{AF} (in (5.70)) sowie für Rüstzeiten ra_{sp}^{AF} (in (5.74)) statt. Je Produkt i der betrachteten Produktgruppe p wird ein Gewichtungsfaktor anhand der zugehörigen Entscheidungsvariablen ermittelt. Der Gewichtungsfaktor entspricht dem Anteil, der über alle Perioden m aufsummierten Ausprägungen der Entscheidungsvariablen des Produktes an den gesamten aufsummierten Entscheidungsvariablen aller Produkte der Produktgruppe. Der Gewichtungsfaktor jedes Produktes wird anschließend mit den produktbezogenen Daten multipliziert und über alle Produkte aufsummiert, so dass ein gewichteter aggregierter Wert entsteht.

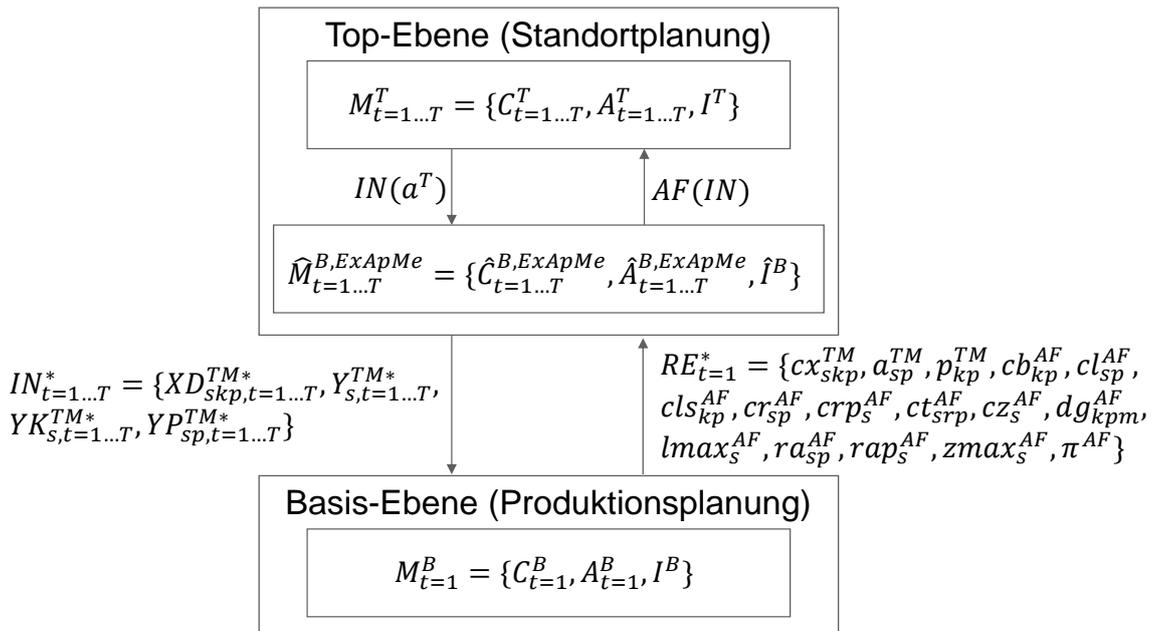


Abbildung 5.1: Iterative hierarchische Planung mit mengenmäßig explizit approximierter Antizipationsfunktion

Eine ebenfalls gewichtete Aggregation findet für den Anteil der Nachfrage für Produktgruppe p in Periode m innerhalb eines Jahres in (5.72) statt (dg_{kpm}^{AF}). Die über alle Produkte einer Produktgruppe aufsummierte Nachfrage einer Periode m wird ins

Verhältnis zur gesamten aufsummierten Nachfrage aller Produkte der Produktgruppe und Perioden gesetzt. Allerdings wird dieser Anteil nicht mit weiteren Daten multipliziert, sondern direkt an die Standortplanung weitergegeben.

Die Daten der Kosten für Rüstübergänge zwischen Produktgruppen crp_s^{AF} (in (5.69)), Kosten für Zusatzkapazitäten cz_s^{AF} (in (5.71)), maximale Lagerbestände $lmax_s^{AF}$ (in (5.73)), Rüstzeiten zwischen Produktgruppen rap_s^{AF} (in (5.75)), maximale Zusatzkapazitäten $zmax_s^{AF}$ (in (5.76)) sowie der Anteil der Backordermenge, der nach einer Periode als Lost Sales auftritt π^{AF} (in (5.77)), entsprechen den Daten der mittelfristigen Produktionsplanung und werden somit gleichgesetzt.

Abbildung 5.1 stellt das Schema der entwickelten Koordination der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung mit mengenmäßig explizit approximierter Antizipationsfunktion dar.

Der Planungsablauf wird durch den folgenden Algorithmus (Algorithmus 3) beschrieben. Dabei wird die mittelfristige Produktionsplanung, wie in Kapitel 4.5 erläutert, zu Vergleichszwecken nicht nur für die erste Periode $t = 1$, sondern für alle Perioden $t = 1 \dots T$ sukzessiv ausgeführt.

Algorithmus 3 Iterative hierarchische Planung mit mengenmäßig explizit approximierter Antizipationsfunktion

```

1:  $\bar{a}_{it=0}^T = 0$ 
2: Löse  $M_{t=1\dots T}^T$ 
3: Übergebe  $IN_{t=1\dots T}^*$ 
4: Löse  $M_{t=1}^B$ 
5: Übergebe  $RE_{t=1}^*$ 
6: for  $it = 1 \dots itmax$  do
7:   Löse  $M_{t=1\dots T}^T$  mit  $\widehat{M}_{t=1\dots T}^{B,ExpMe}$ 
8:   Übergebe  $IN_{t=1\dots T}^*$ 
9:    $\bar{a}_{it}^T = a_{t=1\dots T}^{T*}$ 
10:  if  $\bar{a}_{it}^T = \bar{a}_{it-1}^T \pm \epsilon$  then
11:    Break
12:  end if
13:  Löse  $M_{t=1}^B$ 
14:  Übergebe  $RE_{t=1}^*$ 
15: end for
16: for  $t = 1 \dots T$  do
17:   Löse  $M_t^B$ 
18: end for
19:  $Kapitalwert = CY^T(C_{t=1\dots T}^T(a_{t=1\dots T}^{T*})) + \sum_{t=1}^T (C_{IN^*,t}^B(a_t^{B*}))(1+z)^{-(t-1)}$ 
20: Rollierende Planung: Wiederhole Algorithmus in Periode  $t = 2$  für  $t = 2 \dots T + 1$ ,
    in Periode  $t = 3$  für  $t = 3 \dots T + 2$ , usw.

```

Der Algorithmus orientiert sich grundsätzlich am Algorithmus der iterativen hierarchischen Planung aus Kapitel 4.5 (Algorithmus 2). Unterschiede bestehen nur in der Initialisierung (Zeilen 2 bis 5) und dem Modell der Top-Ebene bzw. Standortplanung während der iterativen Planung (Zeile 7). In den Zeilen 2 bis 5 werden zur Initialisierung, analog zu Betge und Leisten (2005, vgl. S. 57-58) sowie Betge (2006, vgl. S. 179-181), die Modelle der Top- und Basis-Ebene bzw. Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung einmalig ausgeführt, um aktuelle Daten für die Antizipationsfunktion zu erhalten. Dabei wird analog zum Algorithmus der iterativen hierarchischen Planung (Algorithmus 2) beim erstmaligen Lösen der Standortplanung von gleichgewichteten aggregierten Daten der mittelfristigen Produktionsplanung ausgegangen. Das Modell der Standortplanung während der iterativen Planung in Zeile 7 berücksichtigt zusätzlich die entwickelte mengenmäßig explizit approximierten Antizipationsfunktion $\widehat{M}_{t=1\dots T}^{B,ExApMe}$. Der weitere Ablauf des Algorithmus ist identisch mit dem des Algorithmus der iterativen hierarchischen Planung, weshalb für weitere Beschreibungen auf Kapitel 4.5 verwiesen sei.

5.2.2 Kapazitätsmäßig explizit approximierten Antizipationsfunktion

Die zweite explizit approximierten Antizipationsfunktion nutzt die Engpasskapazitäten in den einzelnen Werken zur Antizipation (ExApKa) und besitzt einen geringeren Detaillierungsgrad als die zuvor vorgestellte mengenmäßig explizit approximierten Antizipationsfunktion auf Basis von Produktgruppen.

Die Formulierung der Antizipationsfunktion erfolgt, analog zur mengenmäßig explizit approximierten Antizipationsfunktion, in der Standortplanung. Dabei werden einige Symbole und Bestandteile aus dem mathematischen Modell der mengenmäßig explizit approximierten Antizipationsfunktion übernommen. Zusätzliche Symbole und das mathematische Modell werden im Folgenden dargestellt.

Daten

a_s^{AF}	Produktionskoeffizient an Standort s
cb_s^{AF}	Kosten für Kapazität in Form von Backordermengen an Standort s
cl_s^{AF}	Kosten für Kapazität in Form von Lagerbestand an Standort s
cls_s^{AF}	Kosten für Kapazität in Form von Lost Sales an Standort s
ct_{sr}^{AF}	Kosten für Kapazität in Form von Transportmengen von Standort s zu Standort r
cx_s^{AF}	Produktions- und Transportkosten für Absatzmengen an Standort s
p_s^{AF}	Absatzpreis an Standort s

$KB_{st,m=0}^{AF}$ Antizipierte vorhandene Anfangs-Kapazität in Form von Backordermengen an Standort s in Periode $m = 0$ und Periode t

$KL_{st,m=0}^{AF}$ Antizipierte vorhandene Anfangs-Kapazität in Form von Lagerbestand an Standort s in Periode $m = 0$ und Periode t

Mathematisches Modell

$$\max C_{t=1\dots T}^{TT} + \widehat{C}_{t=1\dots T}^{B,ExApKa} \quad (5.78)$$

$$C_{t=1\dots T}^{TT} = (3.1) \quad (5.79)$$

$$\begin{aligned} \widehat{C}_{t=1\dots T}^{B,ExApKa} = & - \sum_{t=1}^T \left(\sum_{s \in S} \sum_{m=1}^M \left((p_s^{AF} - cx_s^{AF}) KLS_{stm}^{AF} + cz_s^{AF} Z_{stm}^{AF} + \right. \right. \\ & \left. \left. cl_s^{AF} KL_{stm}^{AF} + cb_s^{AF} KB_{stm}^{AF} + cl_s^{AF} KLS_{stm}^{AF} \right) + \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} \sum_{m=1}^M cr_{sp}^{AF} RP_{sptm}^{AF} + \right. \\ & \left. \sum_{s \in S} \sum_{m=1}^M cr_p^{AF} RPR_{stm}^{AF} + \sum_{s \in S} \sum_{r \in S} \sum_{m=1}^M ct_{sr}^{AF} KT_{srtm}^{AF} \right) (1+z)^{-(t-1)} \end{aligned} \quad (5.80)$$

U.d.N.:

$$(3.2) - (3.17)$$

$$(5.42) - (5.43), (5.47), (5.49), (5.52) - (5.54), (5.56) - (5.57)$$

$$KL_{stm}^{AF} \leq a_s^{AF} lmax_s^{AF} YK_{st}^{TM} \quad \forall s \in S, t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \quad (5.81)$$

$$\begin{aligned} Z_{stm}^{AF}, KL_{stm}^{AF}, KB_{stm}^{AF}, KLS_{stm}^{AF}, KT_{srtm}^{AF}, \\ KU_{stm}^{AF}, KM_{stm}^{AF}, KUA_{stm}^{AF} \geq 0 \quad \forall s \in S, r \in S, t = 1 \dots T, m = 1 \dots M \end{aligned} \quad (5.82)$$

Den größten Unterschied im Vergleich zur mengenmäßig explizit approximierten Antizipationsfunktion stellen die vernachlässigten antizipierten Entscheidungsvariablen in Form von Mengen, wie beispielsweise Backordermengen, dar. Die kapazitätsmäßig explizit approximierten Antizipationsfunktion verwendet nur Kapazitäten zur Antizipation und benötigt somit weniger Restriktionen als die mengenmäßige Variante. Allerdings werden stärker aggregierte Daten verwendet, die nicht mehr die Detaillierung der mengenmäßig explizit approximierten Antizipationsfunktion erreichen.

Die Zielfunktion (5.78) setzt sich aus dem privaten Kriterium $C_{t=1\dots T}^{TT}$ und der antizipierten Zielsetzung der mittelfristigen Produktionsplanung $\widehat{C}_{t=1\dots T}^{B,ExApKa}$ zusammen und

wird maximiert. Das private Kriterium entspricht weiterhin der Zielfunktion der Standortplanung (3.1) (siehe (5.79)). Die antizipierte Zielsetzung der mittelfristigen Produktionsplanung wird in (5.80) vorgestellt. Analog zur antizipierten Zielsetzung der mittelfristigen Produktionsplanung der mengenmäßig explizit approximierten Antizipationsfunktion (5.41), werden auch hier die antizipierten Kosten für Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung und zusätzliche Kapazitätsbedarfe berechnet, welche sich aus Einnahmeverlusten durch Lost Sales sowie Kosten für Zusatzkapazitäten, Kapazitäten in Form von Lagerbestand, Kapazitäten in Form von Backordermengen, Kapazitäten in Form von Lost Sales, Rüstvorgänge für Produktgruppen, Rüstvorgänge zwischen unterschiedlichen Produktgruppen und Kapazitäten in Form von Transportmengen zwischen Standorten zusammensetzen. Die gesamten antizipierten Kosten werden letztendlich mit dem Kapitalzinssatz abgezinst und gehen mit einem negativen Vorzeichen in die Zielfunktion ein.

Die Nebenbedingungen der Standortplanung (3.2) bis (3.17) werden ebenso berücksichtigt, wie die Restriktionen (5.42) bis (5.43), (5.47), (5.49), (5.52) bis (5.54) und (5.56) bis (5.57) der mengenmäßig explizit approximierten Antizipationsfunktion. Dies betrifft die Nebenbedingungen, die bereits nur Kapazitäten berücksichtigen oder Rüstbedingungen darstellen.

Als zusätzliche Restriktionen stellen (5.81) sicher, dass die antizipierten Kapazitäten in Form von Lagerbestand KL_{stm}^{AF} die maximalen vorhandenen Kapazitäten in Form von Lagerbestand $(a_s^{AF} lmax_s^{AF} YK_{st}^{TM})$ nicht übersteigen. (5.82) stellen die Nichtnegativitätsbedingungen dar.

Somit beinhaltet auch das vorgestellte Modell der kapazitätsmäßig explizit approximierten Antizipationsfunktion alle Bestandteile der allgemein formulierten explizit approximierten Antizipationsfunktion aus Kapitel 5.1.1. Nachfolgend werden die Modelle der Top- und Basis-Ebene bzw. Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung sowie die entwickelte Antizipationsfunktion in der Notation nach Schneeweiß dargestellt.

Modell der Top-Ebene

Die Gleichungen des Modells der Top-Ebene bzw. Standortplanung (4.1) bis (4.4) sowie die Instruktion (4.9) aus Kapitel 4.1 gelten auch hier, mit der Ausnahme, dass die Definition der Zielsetzung (4.2) durch die nachfolgende Zielsetzung (5.83) ersetzt wird.

$$C_{t=1\dots T}^T = C_{t=1\dots T}^{TT} = (5.79) \tag{5.83}$$

Modell der Basis-Ebene

Ebenso gelten die Gleichungen (4.5) bis (4.8) aus Kapitel 4.1 für das Modell der Basis-

Ebene bzw. mittelfristigen Produktionsplanung, welche durch die Gleichung der Reaktion (5.84) ergänzt werden.

$$RE_{t=1}^* = \{cx_{skp}^{TM}, a_{sp}^{TM}, p_{kp}^{TM}, a_s^{AF}, cb_s^{AF}, cl_s^{AF}, cls_s^{AF}, cr_{sp}^{AF}, crp_s^{AF}, ct_{sr}^{AF}, cx_s^{AF}, cz_s^{AF}, dg_{kpm}^{AF}, lmax_s^{AF}, p_s^{AF}, ra_{sp}^{AF}, rap_s^{AF}, zmax_s^{AF}, \pi^{AF}\} \quad (5.84)$$

Kapazitätsmäßig explizit approximierte Antizipationsfunktion (ExApKa)

Das antizipierte Modell der Basis-Ebene bzw. mittelfristigen Produktionsplanung mit der kapazitätsmäßig explizit approximierten Antizipationsfunktion wird nachfolgend in der Notation nach Schneeweiß aufgeführt.

$$\widehat{M}_{t=1\dots T}^{B, ExApKa} = \widehat{M}_{t=1\dots T}^{B, ExApKa}(\widehat{C}_{t=1\dots T}^{B, ExApKa}, \widehat{A}_{t=1\dots T}^{B, ExApKa}, \widehat{I}^B) \quad (5.85)$$

$$\widehat{C}_{t=1\dots T}^{B, ExApKa} = C_{t=1\dots T}^{TB} = (5.80) \quad (5.86)$$

$$\widehat{A}_{t=1\dots T}^{B, ExApKa} := \{\widehat{a}_{t=1\dots T}^{B, ExApKa*} : (5.42) - (5.43), (5.47), (5.49), (5.52) - (5.54), (5.56) - (5.57), (5.81) - (5.82)\} \quad (5.87)$$

$$AF(IN) = \widehat{a}_{t=1\dots T}^{B, ExApKa*} = \arg \max_{\substack{\widehat{a}_{t=1\dots T}^{B, ExApKa*} \\ \widehat{a}_{t=1\dots T}^{B, ExApKa*} \in \widehat{A}_{IN, t=1\dots T}^{B, ExApKa}}} \{\widehat{C}_{IN, t=1\dots T}^{B, ExApKa}(\widehat{a}_{t=1\dots T}^{B, ExApKa*}) | \widehat{I}_{IN}^B\} \quad (5.88)$$

$$a_{t=1\dots T}^{T*} = \arg \max_{a_{t=1\dots T}^T \in A_{t=1\dots T}^T} \{C_{t=1\dots T}^{TT}(a_{t=1\dots T}^T) + \widehat{C}_{t=1\dots T}^{B, ExApKa}(AF(IN)) | I^T, \widehat{I}_{IN}^B\} \quad (5.89)$$

$\widehat{M}_{t=1\dots T}^{B, ExApKa}$ steht für das antizipierte Modell der Basis-Ebene bzw. mittelfristigen Produktionsplanung, welches die kapazitätsmäßig explizit approximierten Antizipationsfunktion nutzt, und wird in (5.85) definiert. Es besteht aus der antizipierten Zielsetzung $\widehat{C}_{t=1\dots T}^{B, ExApKa}$, dem antizipierten Entscheidungsfeld $\widehat{A}_{t=1\dots T}^{B, ExApKa}$ und dem antizipierten Informationsstatus \widehat{I}^B der mittelfristigen Produktionsplanung.

(5.86) beschreibt die antizipierte Zielsetzung als Top-Down Kriterium $C_{t=1\dots T}^{TB}$, das die bereits definierte Zielsetzung (5.80) beinhaltet. Die Nebenbedingungen (5.42) bis (5.43), (5.47), (5.49), (5.52) bis (5.54), (5.56) bis (5.57) und (5.81) bis (5.82) bilden das antizipierte Entscheidungsfeld (siehe (5.87)).

Die antizipierte optimale Entscheidung der mittelfristigen Produktionsplanung $\widehat{a}_{t=1\dots T}^{B, ExApKa*}$, die gleichzeitig das Ergebnis der Antizipationsfunktion $AF(IN)$ darstellt, wird in (5.88) definiert und ergibt sich aus der Maximierung der antizipierten Zielsetzung $\widehat{C}_{IN, t=1\dots T}^{B, ExApKa}$. Dabei müssen allerdings das antizipierte Entscheidungsfeld $\widehat{A}_{IN, t=1\dots T}^{B, ExApKa}$ und der antizipierte Informationsstatus \widehat{I}_{IN}^B beachtet werden, die wiederum von der aktuellen

Instruktion IN der Top-Ebene bzw. Standortplanung abhängen. Zuletzt beeinflussen die antizipierte Zielsetzung $\widehat{C}_{t=1\dots T}^{B,ExApKa}$ und der antizipierte Informationsstatus \widehat{I}_{IN}^B der mittelfristigen Produktionsplanung auch die optimale Entscheidung der Standortplanung $a_{t=1\dots T}^{T*}$ (siehe (5.89)).

Um die für die kapazitätsmäßig explizit approximierten Antizipationsfunktion notwendigen Daten per Reaktion von der mittelfristigen Produktionsplanung an die Standortplanung reibungslos zu übergeben, werden nachfolgend Aggregationsberechnungen vorgestellt, die die detaillierten Daten der mittelfristigen Produktionsplanung sinnvoll aggregieren.

Analog zur mengenmäßig explizit approximierten Antizipationsfunktion wird weiterhin die Disaggregation der Gleichungen (4.18) bis (4.21) aus Kapitel 4.3 angenommen.

Aggregation für die Daten der Reaktion

Die Aggregation der Daten cx_{skp}^{TM} , a_{sp}^{TM} und p_{kp}^{TM} wird wie in (4.15) bis (4.17) aus Kapitel 4.3 durchgeführt.

$$a_s^{AF} = \sum_{i \in I} \frac{\sum_{m=1}^M X_{sim}^{BM}}{\sum_{i' \in I} \sum_{m=1}^M X_{si'm}^{BM}} \cdot a_{si}^{BM} \quad \forall s \in S \quad (5.90)$$

$$cb_s^{AF} = \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \frac{\sum_{m=1}^M B_{skim}^{BM}}{\sum_{k' \in K} \sum_{i' \in I} \sum_{m=1}^M B_{sk'i'm}^{BM}} \cdot \frac{cb_{ki}^{BM}}{a_{si}^{BM}} \quad \forall s \in S \quad (5.91)$$

$$cl_s^{AF} = \sum_{i \in I} \frac{\sum_{m=1}^M L_{sim}^{BM}}{\sum_{i' \in I} \sum_{m=1}^M L_{si'm}^{BM}} \cdot \frac{cl_{si}^{BM}}{a_{si}^{BM}} \quad \forall s \in S \quad (5.92)$$

$$cls_s^{AF} = \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \frac{\sum_{m=1}^M LS_{skim}^{BM}}{\sum_{k' \in K} \sum_{i' \in I} \sum_{m=1}^M LS_{sk'i'm}^{BM}} \cdot \frac{cls_{ki}^{BM}}{a_{si}^{BM}} \quad \forall s \in S \quad (5.93)$$

$$ct_{sr}^{AF} = \sum_{i \in I} \frac{\sum_{m=1}^M T_{srim}^{BM}}{\sum_{i' \in I} \sum_{m=1}^M T_{sri'm}^{BM}} \cdot \frac{ct_{sri}^{BM}}{a_{si}^{BM}} \quad \forall s \in S, r \in S \quad (5.94)$$

$$cx_s^{AF} = \sum_{i \in I} \frac{\sum_{m=1}^M X_{sim}^{BM}}{\sum_{i' \in I} \sum_{m=1}^M X_{si'm}^{BM}} \cdot \frac{cx_{si}^{BM}}{a_{si}^{BM}} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \frac{\sum_{m=1}^M (XD_{skim}^{BM} + B_{ski,m-1}^{BM} - LS_{skim}^{BM} - B_{skim}^{BM})}{\sum_{k' \in K} \sum_{i' \in I} \sum_{m=1}^M (XD_{sk'i'm}^{BM} + B_{sk'i',m-1}^{BM} - LS_{sk'i'm}^{BM} - B_{sk'i'm}^{BM})} \cdot \frac{cd_{ski}^{BM}}{a_{si}^{BM}} \quad \forall s \in S \quad (5.95)$$

$$p_s^{AF} = \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \frac{\sum_{m=1}^M (XD_{skim}^{BM} + B_{ski,m-1}^{BM} - LS_{skim}^{BM} - B_{skim}^{BM})}{\sum_{k' \in K} \sum_{i' \in I} \sum_{m=1}^M (XD_{sk'i'm}^{BM} + B_{sk'i',m-1}^{BM} - LS_{sk'i'm}^{BM} - B_{sk'i'm}^{BM})} \cdot \frac{p_{ki}^{BM}}{a_{si}^{BM}} \quad \forall s \in S \quad (5.96)$$

Für die Daten cr_{sp}^{AF} , crp_s^{AF} , cz_s^{AF} , dg_{kpm}^{AF} , $lmax_s^{AF}$, ra_{sp}^{AF} , rap_s^{AF} , $zmax_s^{AF}$ und π^{AF} werden die Aggregationsberechnungen der mengenmäßig explizit approximierten Antizipationsfunktion (5.68) bis (5.69) und (5.71) bis (5.77) aus Kapitel 5.2.1 übernommen.

Grundsätzlich wird bei den betrachteten Aggregationsberechnungen eine *LP-Aggregation (Berechnung: Gewichtung)* angewandt, die bei einer 0 im Nenner eine Gleichgewichtung einsetzt. Da die kapazitätsmäßig explizit approximierten Antizipationsfunktion mit Kapazitäten rechnet, müssen die zugehörigen detaillierten Daten, deren Dimensionen für Entscheidungsmengen gelten, so aggregiert werden, dass sie für Kapazitäten geeignet sind. Dementsprechend ist eine stärkere Aggregation im Vergleich zur mengenmäßig explizit approximierten Antizipationsfunktion durchzuführen.

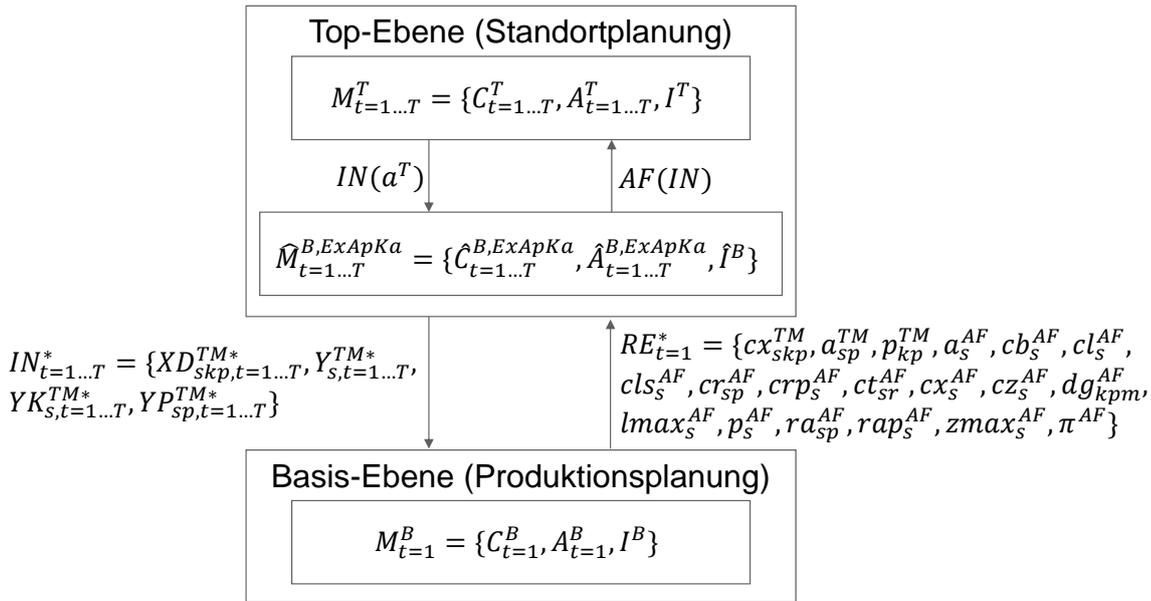


Abbildung 5.2: Iterative hierarchische Planung mit kapazitätsmäßig explizit approximierter Antizipationsfunktion

Die gewichtete Aggregationsberechnung findet für Produktionskoeffizienten a_s^{AF} (in (5.90)), Kosten für Kapazität in Form von Backordermengen cb_s^{AF} (in (5.91)), von Lagerbestand cl_s^{AF} (in (5.92)), von Lost Sales cls_s^{AF} (in (5.93)) und von Transportmengen zwischen Standorten ct_{sr}^{AF} (in (5.94)) sowie für Produktions- und Transportkosten cx_s^{AF}

(in (5.95)) und Absatzpreise p_s^{AF} (in (5.96)) statt. Als Gewichtungsfaktor dienen, wie zuvor, Anteile der Ausprägungen einzelner zugehöriger Entscheidungsvariablen an den gesamten aufsummierten zugehörigen Entscheidungsvariablen. Anschließend werden die Gewichtungsfaktoren mit den jeweiligen Daten multipliziert und durch den Produktionskoeffizienten a_{si}^{BM} geteilt, damit die Daten für Kapazitäten geeignet sind. Im Vergleich zu Kapitel 5.2.1 ergeben sich, neben der Division durch den Produktionskoeffizienten, weitere Unterschiede in der Berechnung durch die stärkere Aggregation, so dass die detaillierten Daten letztendlich nur noch vom Standort s abhängig sind.

Das Schema der entwickelten Koordination der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung mit kapazitätsmäßig explizit approximierter Antizipationsfunktion stellt Abbildung 5.2 dar.

Der aufgeführte Algorithmus (Algorithmus 4) beschreibt den Planungsablauf der Koordination mit kapazitätsmäßig explizit approximierter Antizipationsfunktion, der, bis auf Zeile 7, identisch mit dem Algorithmus der iterativen hierarchischen Planung mit mengenmäßig explizit approximierter Antizipationsfunktion (Algorithmus 3) ist. Somit sei für weitere Beschreibungen auf das genannte Kapitel verwiesen. Lediglich die Antizipationsfunktion $\widehat{M}_{t=1\dots T}^{B,ExApKa}$ ersetzt in Zeile 7 die zuvor eingesetzte Antizipationsfunktion.

Algorithmus 4 Iterative hierarchische Planung mit kapazitätsmäßig explizit approximierter Antizipationsfunktion

- 1: $\bar{a}_{it=0}^T = 0$
 - 2: Löse $M_{t=1\dots T}^T$
 - 3: Übergebe $IN_{t=1\dots T}^*$
 - 4: Löse $M_{t=1}^B$
 - 5: Übergebe $RE_{t=1}^*$
 - 6: **for** $it = 1 \dots itmax$ **do**
 - 7: Löse $M_{t=1\dots T}^T$ mit $\widehat{M}_{t=1\dots T}^{B, ExApKa}$
 - 8: Übergebe $IN_{t=1\dots T}^*$
 - 9: $\bar{a}_{it}^T = a_{t=1\dots T}^{T*}$
 - 10: **if** $\bar{a}_{it}^T = \bar{a}_{it-1}^T \pm \epsilon$ **then**
 - 11: Break
 - 12: **end if**
 - 13: Löse $M_{t=1}^B$
 - 14: Übergebe $RE_{t=1}^*$
 - 15: **end for**
 - 16: **for** $t = 1 \dots T$ **do**
 - 17: Löse M_t^B
 - 18: **end for**
 - 19: $Kapitalwert = CY^T(C_{t=1\dots T}^T(a_{t=1\dots T}^{T*})) + \sum_{t=1}^T (C_{IN^*,t}^B(a_t^{B*}))(1+z)^{-(t-1)}$
 - 20: Rollierende Planung: Wiederhole Algorithmus in Periode $t = 2$ für $t = 2 \dots T + 1$,
in Periode $t = 3$ für $t = 3 \dots T + 2$, usw.
-

5.2.3 Teilweise explizit exakte Antizipationsfunktion mit einer Periode

Einen anderen Ansatz verfolgt die teilweise explizit exakte Antizipationsfunktion mit einer Periode (ExEx1), welche die allgemeine Formulierung der teilweise explizit exakten Antizipationsfunktion aus Kapitel 5.1.2 verwendet. Die nachfolgende Antizipationsfunktion antizipiert für die erste Periode $t = 1$ die Basis-Ebene bzw. mittelfristige Produktionsplanung exakt und nutzt die Ergebnisse zur approximierten Antizipation der restlichen Perioden $t = 2 \dots T$.

Die exakte Antizipation greift auf bekannte Symbole der mittelfristigen Produktionsplanung zurück. Deshalb wird nachfolgend nur das mathematische Modell der Standortplanung mit teilweise explizit exakter Antizipationsfunktion mit einer Periode vorgestellt.

Mathematisches Modell

$$\max C_{t=1\dots T}^{TT} + \widehat{C}_{t=1\dots T}^{B,ExEx1} \quad (5.97)$$

$$C_{t=1\dots T}^{TT} = \sum_{t=2}^T \left(\sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} (p_{kp}^{TM} - cx_{skp}^{TM}) X D_{skpt}^{TM} \right) (1+z)^{-(t-1)} - \sum_{t=1}^T \left(\sum_{s \in S} (cy_s^{TM} Y_{st}^{TM} + cyo_s^{TM} Y O_{st}^{TM} + cys_s^{TM} Y S_{st}^{TM}) + \sum_{g \in G} cyg_g^{TM} Y G_{gt}^{TM} \right) (1+z)^{-(t-1)} \quad (5.98)$$

$$\widehat{C}_{t=1\dots T}^{B,ExEx1} = C_{t=1}^B + \sum_{t=2}^T (\widehat{g}_t^{AF,t=1} C_{t=1}^B) \quad (5.99)$$

$$C_{t=1}^B = (3.18) \quad (5.100)$$

$$\begin{aligned} \sum_{t=2}^T (\widehat{g}_t^{AF,t=1} C_{t=1}^B) = & - \sum_{t=2}^T \left(\sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} (p_{kp}^{TM} - cx_{skp}^{TM}) \left(\sum_{i \in PG_p} \sum_{m=1}^M L S_{skim}^{BM} \right) + \right. \\ & \sum_{s \in S} \sum_{m=1}^M cz_s^{BM} Z_{sm}^{BM} + \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M cl_{si}^{BM} L_{sim}^{BM} + \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M cr_{si}^{BM} R_{sim}^{BM} + \\ & \sum_{s \in S} \sum_{m=1}^M crp_s^{BM} R P R_{sm}^{BM} + \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M cb_{ki}^{BM} B_{skim}^{BM} + \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M cls_{ki}^{BM} L S_{skim}^{BM} + \\ & \left. \sum_{s \in S} \sum_{r \in S} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M ct_{sri}^{BM} T_{srim}^{BM} \right) \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \left(\frac{d_{kpt}^{TM}}{d_{kp,t=1}^{TM}} \right) (1+z)^{-(t-1)} \end{aligned} \quad (5.101)$$

U.d.N.

(3.2) - (3.17)

(3.22) - (3.28), (3.32) - (3.33)

$$\sum_{i \in I} a_{si}^{BM} X_{sim}^{BM} + \sum_{i \in I} r a_{si}^{BM} R_{sim}^{BM} + r a p_s^{BM} R P R_{sm}^{BM} \leq k_s^{BM} Y K_{s,t=1}^{TM} + Z_{sm}^{BM} \quad \forall s \in S, m = 1 \dots M \quad (5.102)$$

$$\sum_{i \in PG_p} a_{si}^{BM} X_{sim}^{BM} + \sum_{i \in PG_p} r a_{si}^{BM} R_{sim}^{BM} + r a p_s^{BM} R P R_{sm}^{BM} \leq (k p_{sp}^{BM} + z max_s^{BM}) Y P_{sp,t=1}^{TM} \quad \forall s \in S, p \in P, m = 1 \dots M \quad (5.103)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{i \in PG_p} X D_{skim}^{BM} = X D_{skp,t=1}^{TM} \quad \forall s \in S, k \in K, p \in P \quad (5.104)$$

$$Z_{sm}^{BM} \leq z max_s^{BM} Y K_{s,t=1}^{TM} \quad \forall s \in S, m = 1 \dots M \quad (5.105)$$

$$\sum_{i \in I} L_{sim}^{BM} \leq l max_s^{BM} Y K_{s,t=1}^{TM} \quad \forall s \in S, m = 1 \dots M \quad (5.106)$$

$$\sum_{i \in PG_p} L_{sim}^{BM} \leq l max_s^{BM} Y P_{sp,t=1}^{TM} \quad \forall s \in S, p \in P, m = 1 \dots M \quad (5.107)$$

Die Zielfunktion (5.97) wird maximiert und setzt sich aus dem privaten Kriterium der Standortplanung $C_{t=1 \dots T}^{TT}$ und der antizipierten Zielsetzung der mittelfristigen Produktionsplanung $\widehat{C}_{t=1 \dots T}^{B,ExEx1}$ zusammen. (5.98) wandelt die bisherige Zielfunktion der Standortplanung ab, indem die Differenz aus Erlösen und Produktions- sowie Transportkosten von Absatzmengen nur für die Perioden $t = 2 \dots T$ aufsummiert wird. Grund dafür ist die exakte Antizipation der mittelfristigen Produktionsplanung für die Periode $t = 1$, welche detailliertere Kosten und Erlöse in der Standortplanung berücksichtigt. Die antizipierte Zielsetzung der mittelfristigen Produktionsplanung wird durch (5.99) genauer definiert und beinhaltet die exakt antizipierte Zielsetzung der mittelfristigen Produktionsplanung für die erste Periode $t = 1$ ($C_{t=1}^B$), sowie die approximiert antizipierte Zielsetzung der mittelfristigen Produktionsplanung für die restlichen Perioden $t = 2 \dots T$ ($\widehat{g}c_t^{AF,t=1} C_{t=1}^B$). $C_{t=1}^B$ entspricht der Zielfunktion der mittelfristigen Produktionsplanung (3.18) (siehe (5.100)). (5.101) definiert die antizipierte Zielsetzung der Perioden $t = 2 \dots T$, indem die Kosten der Zielfunktion der mittelfristigen Produktionsplanung für Periode $t = 1$ mit einem periodenabhängigen Gewichtungsfaktor multipliziert und über die Perioden

$t = 2 \dots T$ aufsummiert sowie mit dem Kapitalzinssatz abgezinst werden. Wie erwähnt, werden nur die Kosten der Zielfunktion der mittelfristigen Produktionsplanung für die Perioden $t = 2 \dots T$ verwendet, da die konkreten Erlöse durch die Zielfunktion der Standortplanung für die genannten Perioden berücksichtigt werden. Als Gewichtungsfaktor dient das Verhältnis der gesamten Nachfrage der jeweiligen Periode (d_{kpt}^{TM}) zur gesamten Nachfrage der ersten Periode $t = 1$ ($d_{kp,t=1}^{TM}$).

Die Nebenbedingungen der Standortplanung (3.2) bis (3.17) gelten weiterhin, ebenso wie diejenigen Restriktionen der mittelfristigen Produktionsplanung, die keine Verknüpfungen zur Standortplanung besitzen ((3.22) bis (3.28) sowie (3.32) bis (3.33)). Die Nebenbedingungen der mittelfristigen Produktionsplanung, die Entscheidungen der Standortplanung als Daten berücksichtigen ((3.19) bis (3.21) sowie (3.29) bis (3.31)), werden durch die Restriktionen (5.102) bis (5.107) ersetzt, denn diese berücksichtigen die Entscheidungen der Standortplanung als Variablen. In den Nebenbedingungen (5.102), (5.105) und (5.106) sind dies die Anteile der Standortkapazität $YK_{s,t=1}^{TM}$ je Standort s in Periode $t = 1$, in den Nebenbedingungen (5.103) und (5.107) die Produkt-Werk-Allokationen $YP_{sp,t=1}^{TM}$ je Standort s und Produktgruppe p in Periode $t = 1$ und in den Nebenbedingungen (5.104) die Jahresabsatzmengen $XD_{skp,t=1}^{TM}$ je Standort s , Markt k und Produktgruppe p in Periode $t = 1$.

Das Modell der Top-Ebene bzw. Standortplanung, inklusive der teilweise explizit exakten Antizipationsfunktion mit einer Periode, setzt die allgemein formulierte teilweise explizit exakte Antizipationsfunktion aus Kapitel 5.1.2 für eine Periode um und wird nachstehend in die Notation nach Schneeweiß überführt.

Modell der Top-Ebene

Das Modell der Top-Ebene bzw. Standortplanung verwendet erneut die Gleichungen (4.1) bis (4.4) sowie die Instruktion (4.9) aus Kapitel 4.1 und tauscht die Definition der Zielsetzung (4.2) durch die nachfolgende Zielsetzung (5.108) aus.

$$C_{t=1\dots T}^T = C_{t=1\dots T}^{TT} \quad (5.98)$$

Modell der Basis-Ebene

Das Modell der Basis-Ebene bzw. mittelfristigen Produktionsplanung setzt sich aus den Gleichungen (4.5) bis (4.8) sowie der Reaktion (4.10) aus Kapitel 4.1 zusammen.

Teilweise explizit exakte Antizipationsfunktion mit einer Periode (ExEx1)

Die teilweise explizit exakte Antizipationsfunktion mit einer Periode wird im antizipierten Modell der Basis-Ebene bzw. mittelfristigen Produktionsplanung angewandt und wie folgt in der Notation nach Schneeweiß formuliert.

$$\widehat{M}_{t=1\dots T}^{B,ExEx1} = \widehat{M}_{t=1\dots T}^{B,ExEx1}(\widehat{C}_{t=1\dots T}^{B,ExEx1}, \widehat{A}_{t=1}^{B,ExEx1}, \widehat{I}^B) \quad (5.109)$$

$$\widehat{C}_{t=1\dots T}^{B,ExEx1} = C_{t=1\dots T}^{TB} = C_{t=1}^B + \sum_{t=2}^T (\widehat{g}c_t^{AF,t=1} C_{t=1}^B) = (5.99) - (5.101) \quad (5.110)$$

$$\widehat{A}_{t=1}^{B,ExEx1} := \{\widehat{a}_{t=1}^{B,ExEx1*} : A_{t=1}^B = (3.22) - (3.28), (3.32) - (3.33), (5.102) - (5.107)\} \quad (5.111)$$

$$AF(IN) = \widehat{a}_{t=1}^{B,ExEx1*} = \arg \max_{\widehat{a}_{t=1}^{B,ExEx1} \in \widehat{A}_{IN,t=1}^{B,ExEx1}} \{\widehat{C}_{IN,t=1\dots T}^{B,ExEx1}(\widehat{a}_{t=1}^{B,ExEx1}) | \widehat{I}_{IN}^B\} \quad (5.112)$$

$$a_{t=1\dots T}^{T*} = \arg \max_{a_{t=1\dots T}^T \in A_{t=1\dots T}^T} \{C_{t=1\dots T}^{TT}(a_{t=1\dots T}^T) + \widehat{C}_{t=1\dots T}^{B,ExEx1}(AF(IN)) | I^T, \widehat{I}_{IN}^B\} \quad (5.113)$$

Das antizipierte Modell der Basis-Ebene bzw. mittelfristigen Produktionsplanung $\widehat{M}_{t=1\dots T}^{B,ExEx1}$ wird durch die antizipierte Zielsetzung $\widehat{C}_{t=1\dots T}^{B,ExEx1}$, das antizipierte Entscheidungsfeld $\widehat{A}_{t=1}^{B,ExEx1}$ und den Informationsstatus \widehat{I}^B gebildet (siehe (5.109)).

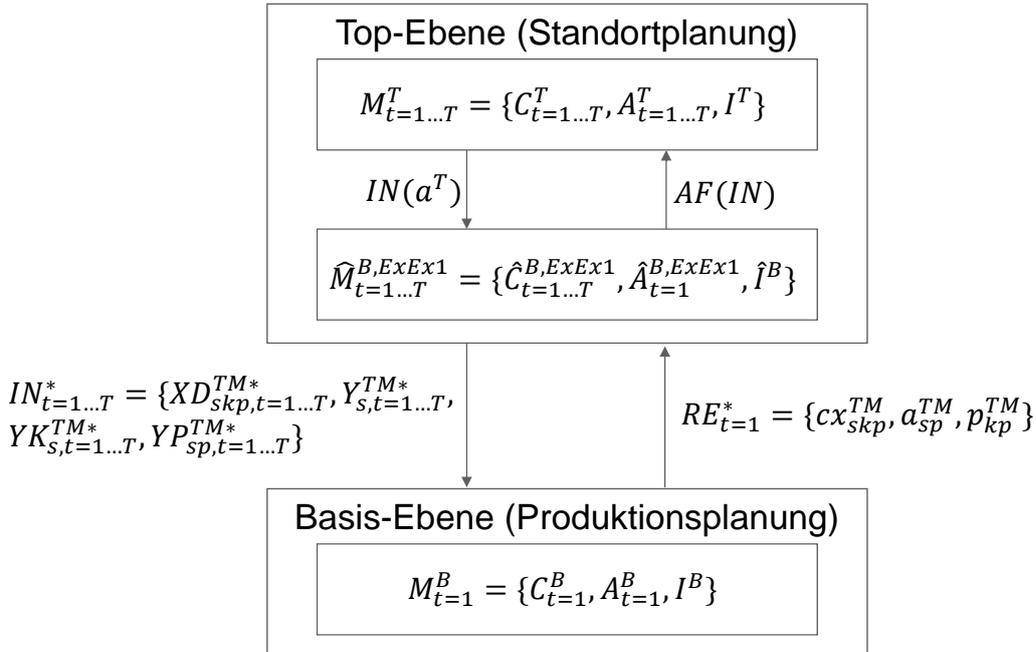


Abbildung 5.3: Iterative hierarchische Planung mit teilweise explizit exakter Antizipationsfunktion mit einer Periode

(5.110) beschreibt die antizipierte Zielsetzung der mittelfristigen Produktionsplanung als Top-Down Kriterium der Top-Ebene bzw. Standortplanung $C_{t=1\dots T}^{TB}$. Es setzt sich aus der exakten Zielsetzung der mittelfristigen Produktionsplanung $C_{t=1}^B$ für die erste

Periode $t = 1$ und den approximiert antizipierten Zielsetzungen der mittelfristigen Produktionsplanung ($\widehat{g}c_t^{AF,t=1} C_{t=1}^B$) für die Perioden $t = 2 \dots T$ zusammen und wird durch die Gleichungen (5.99) bis (5.101) konkret formuliert.

Das antizipierte Entscheidungsfeld der mittelfristigen Produktionsplanung berücksichtigt nur die erste Periode $t = 1$, da es das exakte Entscheidungsfeld der mittelfristigen Produktionsplanung $A_{t=1}^B$ für diese Periode verwendet, welches sich aus den Gleichungen (3.22) bis (3.28), (3.32) bis (3.33) sowie (5.102) bis (5.107) ergibt (siehe (5.111)).

Somit wird auch die optimale Entscheidung der mittelfristigen Produktionsplanung $\widehat{a}_{t=1}^{B,ExEx1*}$ nur für die erste Periode $t = 1$ antizipiert. Die antizipierte optimale Entscheidung stellt das Ergebnis der Antizipationsfunktion $AF(IN)$ dar und wird, wie in (5.112) aufgeführt, durch eine Maximierung der antizipierten Zielsetzung $\widehat{C}_{IN,t=1\dots T}^{B,ExEx1}$ unter Beachtung des antizipierten Entscheidungsfeldes $\widehat{A}_{IN,t=1}^{B,ExEx1}$ und antizipierten Informationsstatus \widehat{I}_{IN}^B erreicht, wobei diese von der aktuellen Instruktion IN der Standortplanung abhängen. Die antizipierte Zielsetzung sowie der antizipierte Informationsstatus beeinflussen zudem die optimale Entscheidung der Standortplanung $a_{t=1\dots T}^{T*}$ (siehe (5.113)).

Durch die exakte Antizipation werden, neben den bisherigen, keine zusätzlichen Daten per Instruktion oder Reaktion zwischen den Planungsebenen ausgetauscht, weshalb für die Aggregation die Gleichungen (4.15) bis (4.17) und für die Disaggregation die Gleichungen (4.18) bis (4.21) aus Kapitel 4.3 gelten.

Algorithmus 5 Iterative hierarchische Planung mit teilweise explizit exakter Antizipationsfunktion mit einer Periode

- 1: $\bar{a}_{it=0}^T = 0$
 - 2: **for** $it = 1 \dots itmax$ **do**
 - 3: Löse $M_{t=1\dots T}^T$ mit $\widehat{M}_{t=1\dots T}^{B,ExEx1}$ für Periode $t = 1$
 - 4: Übergebe $IN_{t=1\dots T}^*$
 - 5: $\bar{a}_{it}^T = a_{t=1\dots T}^{T*}$
 - 6: **if** $\bar{a}_{it}^T = \bar{a}_{it-1}^T \pm \epsilon$ **then**
 - 7: Break
 - 8: **end if**
 - 9: Löse $M_{t=1}^B$
 - 10: Übergebe $RE_{t=1}^*$
 - 11: **end for**
 - 12: **for** $t = 1 \dots T$ **do**
 - 13: Löse M_t^B
 - 14: **end for**
 - 15: $Kapitalwert = CY^T(C_{t=1\dots T}^T(a_{t=1\dots T}^{T*})) + \sum_{t=1}^T (C_{IN^*,t}^B(a_t^{B*}))(1+z)^{-(t-1)}$
 - 16: Rollierende Planung: Wiederhole Algorithmus in Periode $t = 2$ für $t = 2 \dots T + 1$, in Periode $t = 3$ für $t = 3 \dots T + 2$, usw.
-

Die iterative hierarchische Planung der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung mit teilweise explizit exakter Antizipationsfunktion mit einer Periode wird in Abbildung 5.3 dargestellt. Der zugehörige Algorithmus (Algorithmus 5) beschreibt den Planungsablauf und basiert grundsätzlich auf dem Algorithmus der iterativen hierarchischen Planung (Algorithmus 2) aus Kapitel 4.5. Allerdings wird in Zeile 3 neben dem Modell der Top-Ebene bzw. Standortplanung zusätzlich die teilweise explizit exakte Antizipationsfunktion mit einer Periode $\widehat{M}_{t=1\dots T}^{B,ExEx1}$ angewandt. Weitere Änderungen werden nicht vorgenommen, weshalb für weitere Beschreibungen auf Kapitel 4.5 verwiesen sei.

5.2.4 Teilweise explizit exakte Antizipationsfunktion mit zwei Perioden

Die teilweise explizit exakte Antizipationsfunktion mit zwei Perioden (ExEx2) stellt eine Erweiterung zur Variante mit einer Periode dar. Gründe dafür sind, wie im vorangehenden Kapitel erläutert, mögliche Strukturveränderungen im Planungszeitraum, die bewirken, dass die Ergebnisse der exakt antizipierten ersten Periode, für die Antizipation der weiteren Perioden nicht mehr passend sind. Deshalb nutzt die nachstehende teilweise explizit exakte Antizipationsfunktion nicht nur die exakte Antizipation der Basis-Ebene bzw. mittelfristigen Produktionsplanung für die erste Periode $t = 1$, sondern antizipiert eine weitere Periode $t = tt$ exakt, um auch bei möglichen Strukturveränderungen passende Ergebnisse zu ermitteln. Die restlichen Perioden $t = 2 \dots tt - 1$ und $t = tt + 1 \dots T$ werden auf Basis der beiden exakt antizipierten Perioden, approximiert antizipiert.

Zunächst wird das mathematische Modell der Standortplanung mit teilweise explizit exakter Antizipationsfunktion mit zwei Perioden definiert und erläutert.

Mathematisches Modell

$$\max C_{t=1\dots T}^{TT} + \widehat{C}_{t=1\dots T}^{B,ExEx2} \quad (5.114)$$

$$\begin{aligned} C_{t=1\dots T}^{TT} = & \sum_{t=2}^{tt-1} \left(\sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} (p_{kp}^{TM} - cx_{skp}^{TM}) X D_{skpt}^{TM} \right) (1+z)^{-(t-1)} + \\ & \sum_{t=tt+1}^T \left(\sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} (p_{kp}^{TM} - cx_{skp}^{TM}) X D_{skpt}^{TM} \right) (1+z)^{-(t-1)} - \sum_{t=1}^T \left(\sum_{s \in S} (cy_s^{TM} Y_{st}^{TM} + \right. \\ & \left. cy_o_s^{TM} Y O_{st}^{TM} + cy_s^{TM} Y S_{st}^{TM}) + \sum_{g \in G} cy_g^{TM} Y G_{gt}^{TM} \right) (1+z)^{-(t-1)} \end{aligned} \quad (5.115)$$

$$\widehat{C}_{t=1\dots T}^{B,ExEx2} = C_{t=1\dots T}^{TB} = C_{t=1}^B + \sum_{t=2}^{tt-1} (\widehat{g}_t^{AF,t=1} C_{t=1}^B) + C_{t=tt}^B + \sum_{t=tt+1}^T (\widehat{g}_t^{AF,t=tt} C_{t=tt}^B) \quad (5.116)$$

$$\begin{aligned} C_t^B = & \left(\sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M (p_{ki}^{BM} - cd_{ski}^{BM})(XD_{skitm}^{BM} + B_{skit,m-1}^{BM} - \right. \\ & LS_{skitm}^{BM} - B_{skitm}^{BM}) - \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M cx_{si}^{BM} X_{sitm}^{BM} - \sum_{s \in S} \sum_{m=1}^M cz_s^{BM} Z_{stm}^{BM} - \\ & \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M cl_{si}^{BM} L_{sitm}^{BM} - \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M cr_{si}^{BM} R_{sitm}^{BM} - \sum_{s \in S} \sum_{m=1}^M crp_s^{BM} RPR_{stm}^{BM} - \\ & \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M cb_{ki}^{BM} B_{skitm}^{BM} - \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M cl_{ski}^{BM} LS_{skitm}^{BM} - \\ & \left. \sum_{s \in S} \sum_{r \in S} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M ct_{sri}^{BM} T_{sritm}^{BM} \right) (1+z)^{-(t-1)} \end{aligned} \quad (5.117)$$

$$C_{t=1}^B = C_t^B \text{ mit } t = 1 \quad (5.118)$$

$$C_{t=tt}^B = C_t^B \text{ mit } t = tt \quad (5.119)$$

$$\begin{aligned} \sum_{t=t_{min}}^{t_{max}} (\widehat{g}_t^{AF,t=t_{fix}} C_{t=t_{fix}}^B) = & - \sum_{t=t_{min}}^{t_{max}} \left(\sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} (p_{kp}^{TM} - cx_{skp}^{TM}) \right. \\ & \left(\sum_{i \in PG_p} \sum_{m=1}^M LS_{skit,t=t_{fix},m}^{BM} + \sum_{s \in S} \sum_{m=1}^M cz_s^{BM} Z_{s,t=t_{fix},m}^{BM} + \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M cl_{si}^{BM} L_{st,t=t_{fix},m}^{BM} + \right. \\ & \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M cr_{si}^{BM} R_{st,t=t_{fix},m}^{BM} + \sum_{s \in S} \sum_{m=1}^M crp_s^{BM} RPR_{s,t=t_{fix},m}^{BM} + \\ & \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M cb_{ki}^{BM} B_{skit,t=t_{fix},m}^{BM} + \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M cl_{ski}^{BM} LS_{skit,t=t_{fix},m}^{BM} + \\ & \left. \left. \sum_{s \in S} \sum_{r \in S} \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^M ct_{sri}^{BM} T_{srit,t=t_{fix},m}^{BM} \right) \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \left(\frac{d_{kpt}^{TM}}{d_{kp,t=t_{fix}}^{TM}} \right) (1+z)^{-(t-1)} \end{aligned} \quad (5.120)$$

$$\sum_{t=2}^{tt-1} (\hat{g}c_t^{AF,t=1} C_{t=1}^B) = \sum_{t=t_{min}}^{t_{max}} (\hat{g}c_t^{AF,t=t_{fix}} C_{t=t_{fix}}^B) \text{ mit } t_{min} = 2, t_{max} = tt - 1, t_{fix} = 1 \quad (5.121)$$

$$\sum_{t=tt+1}^T (\hat{g}c_t^{AF,t=tt} C_{t=tt}^B) = \sum_{t=t_{min}}^{t_{max}} (\hat{g}c_t^{AF,t=t_{fix}} C_{t=t_{fix}}^B) \text{ mit } t_{min} = tt + 1, t_{max} = T, t_{fix} = tt \quad (5.122)$$

U.d.N.

(3.2) - (3.17)

(3.35) - (3.49) mit $t = 1$ und $t = tt$

(5.114) beschreibt die Zielfunktion, die sich aus dem privaten Kriterium der Standortplanung $C_{t=1...T}^{TT}$ und der antizipierten Zielsetzung der mittelfristigen Produktionsplanung mit teilweise explizit exakter Antizipationsfunktion mit zwei Perioden $\hat{C}_{t=1...T}^{B,ExEx2}$ zusammensetzt. Das private Kriterium betrachtet, analog zu (5.98) aus dem vorangehenden Kapitel, Erlöse sowie Produktions- und Transportkosten von Absatzmengen nur für die Perioden, die nicht exakt antizipiert werden, im betrachteten Fall die Perioden $t = 2 \dots tt - 1$ und $t = tt + 1 \dots T$ (siehe (5.115)). Die antizipierte Zielsetzung der mittelfristigen Produktionsplanung bzw. das Top-Down Kriterium der Standortplanung $C_{t=1...T}^{TB}$ besteht aus den exakten Zielsetzungen der mittelfristigen Produktionsplanung für die Perioden $t = 1$ und $t = tt$ ($C_{t=1}^B$ bzw. $C_{t=tt}^B$) sowie den approximiert antizipierten Zielsetzungen der mittelfristigen Produktionsplanung für die Perioden $t = 2 \dots tt - 1$ und $t = tt + 1 \dots T$ ($\hat{g}c_t^{AF,t=1} C_{t=1}^B$ bzw. $\hat{g}c_t^{AF,t=tt} C_{t=tt}^B$) (siehe (5.116)). Eine allgemeine exakte Zielsetzung der mittelfristigen Produktionsplanung für eine bestimmte Periode t (C_t^B) stellt (5.117) dar und verwendet dabei die Bestandteile der mittelfristigen Produktionsplanung aus der Zielfunktion des Gesamtmodells (3.34). So besitzt jede Variable den Index t und die gesamte Zielfunktion wird mit einem Kapitalzinssatz abgezinst. Diese allgemeine Form wird anschließend von den beiden exakt antizipierten Zielsetzungen der mittelfristigen Produktionsplanung $C_{t=1}^B$ und $C_{t=tt}^B$ genutzt, so dass für die allgemeine Form C_t^B $t = 1$ bzw. $t = tt$ gilt (siehe (5.118) bzw. (5.119)). Eine verallgemeinerte Darstellung der approximiert antizipierten Zielsetzung der mittelfristigen Produktionsplanung für weitere Perioden ($\hat{g}c_t^{AF,t=t_{fix}} C_{t=t_{fix}}^B$) stellt (5.120) analog zu (5.101) dar. Es werden die exakten Kosten der Zielfunktion der mittelfristigen Produktionsplanung für eine bestimmte Periode t_{fix} berücksichtigt und mit einem Gewichtungsfaktor für jede Periode multipliziert. Zudem werden die Kosten über die Perioden $t = t_{min} \dots t_{max}$ aufsummiert und mit einem Kapitalzinssatz abgezinst. Der Gewichtungsfaktor wird ebenfalls analog zu (5.101) durch Nachfragen gebildet. (5.121) nutzt die vorgestellte allgemeine Formulierung der approximiert antizipierten Zielsetzung der mittelfristigen Produktionsplanung für die Perioden $t = 2 \dots tt - 1$. Dazu werden die entsprechenden Werte

$t_{min} = 2$, $t_{max} = tt - 1$ und $t_{fix} = 1$ festgelegt. Ebenso verfährt (5.122) für die approximiert antizipierte Zielsetzung der mittelfristigen Produktionsplanung der Perioden $t = tt + 1 \dots T$, indem die Werte $t_{min} = tt + 1$, $t_{max} = T$ und $t_{fix} = tt$ gesetzt werden.

Als Nebenbedingungen gelten abermals die Restriktionen der Standortplanung (3.2) bis (3.17). Weitere Restriktionen sind für die exakt antizipierten Perioden $t = 1$ und $t = tt$ zu beachten. Dazu werden die Nebenbedingungen der mittelfristigen Produktionsplanung im Gesamtmodell (3.35) bis (3.49) verwendet, da diese bereits mit dem Index t ausgestattet sind und folglich für die Perioden $t = 1$ und $t = tt$ gelten.

Nachstehend wird das aufgestellte Modell der Top-Ebene bzw. Standortplanung mit teilweise explizit exakter Antizipationsfunktion mit zwei Perioden formal in der Notation nach Schneeweiß dargestellt. Es orientiert sich ebenfalls an der zugehörigen allgemeinen Formulierung der teilweise explizit exakten Antizipationsfunktion aus Kapitel 5.1.2.

Modell der Top-Ebene

Die Gleichungen (4.1) bis (4.4) sowie die Instruktion (4.9) aus Kapitel 4.1 definieren das Modell bzw. die Instruktion der Top-Ebene bzw. Standortplanung. (5.123) ersetzt jedoch die Definition der Zielsetzung (4.2).

$$C_{t=1\dots T}^T = C_{t=1\dots T}^{TT} \quad (5.115) \quad (5.123)$$

Modell der Basis-Ebene

Das Modell der Basis-Ebene bzw. mittelfristigen Produktionsplanung wird analog zum Modell der teilweise explizit exakten Antizipationsfunktion mit einer Periode gebildet und verwendet die Gleichungen (4.5) bis (4.8) sowie die Reaktion (4.10) aus Kapitel 4.1.

Teilweise explizit exakte Antizipationsfunktion mit zwei Perioden (ExEx2)

Nachfolgend wird das antizipierte Modell der Basis-Ebene bzw. mittelfristigen Produktionsplanung mit teilweise explizit exakter Antizipationsfunktion mit zwei Perioden in der Notation nach Schneeweiß vorgestellt.

$$\widehat{M}_{t=1\dots T}^{B,ExEx2} = \widehat{M}_{t=1\dots T}^{B,ExEx2}(\widehat{C}_{t=1\dots T}^{B,ExEx2}, \widehat{A}_{t=1\wedge t=tt}^{B,ExEx2}, \widehat{I}^B) \quad (5.124)$$

$$\widehat{C}_{t=1\dots T}^{B,ExEx2} = C_{t=1\dots T}^{TB} = C_{t=1}^B + \sum_{t=2}^{tt-1} \widehat{g}c_t^{AF,t=1} C_{t=1}^B + C_{t=tt}^B + \sum_{t=tt}^T \widehat{g}c_t^{AF,t=tt} C_{t=tt}^B = \quad (5.116) - (5.122) \quad (5.125)$$

$$\widehat{A}_{t=1\wedge t=tt}^{B,ExEx2} := \{\widehat{a}_{t=1\wedge t=tt}^{B,ExEx2*} : A_{t=1}^B \wedge A_{t=tt}^B = (3.35) - (3.49) \text{ mit } t = 1 \text{ und } t = tt\} \quad (5.126)$$

$$AF(IN) = \hat{a}_{t=1 \wedge t=tt}^{B, ExEx2*} = \arg \max_{\substack{\hat{a}_{t=1 \wedge t=tt}^{B, ExEx2} \in \hat{A}_{IN, t=1 \wedge t=tt}^{B, ExEx2}}} \{ \hat{C}_{IN, t=1 \dots T}^{B, ExEx2}(\hat{a}_{t=1 \wedge t=tt}^{B, ExEx2}) | \hat{I}_{IN}^B \} \quad (5.127)$$

$$a_{t=1 \dots T}^{T*} = \arg \max_{a_{t=1 \dots T}^T \in A_{t=1 \dots T}^T} \{ C_{t=1 \dots T}^{TT}(a_{t=1 \dots T}^T) + \hat{C}_{t=1 \dots T}^{B, ExEx2}(AF(IN)) | I^T, \hat{I}_{IN}^B \} \quad (5.128)$$

(5.124) beschreibt das antizipierte Modell der Basis-Ebene bzw. mittelfristigen Produktionsplanung $\hat{M}_{t=1 \dots T}^{B, ExEx2}$, welches aus der antizipierten Zielsetzung $\hat{C}_{t=1 \dots T}^{B, ExEx2}$, dem antizipierten Entscheidungsfeld $\hat{A}_{t=1 \wedge t=tt}^{B, ExEx2}$ und dem Informationsstatus \hat{I}^B besteht.

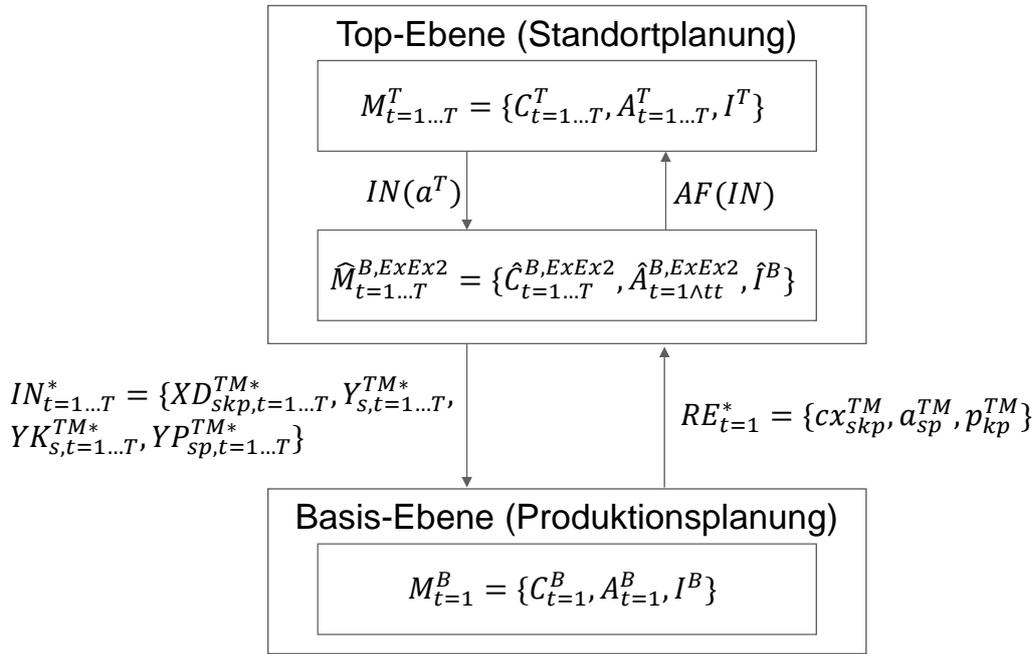


Abbildung 5.4: Iterative hierarchische Planung mit teilweise explizit exakter Antizipationsfunktion mit zwei Perioden

Die exakt antizipierten Zielsetzungen der mittelfristigen Produktionsplanung für die Perioden $t = 1$ und $t = tt$ ($C_{t=1}^B$ bzw. $C_{t=tt}^B$) sowie die approximiert antizipierten Zielsetzungen der mittelfristigen Produktionsplanung für die Perioden $t = 2 \dots tt - 1$ und $t = tt + 1 \dots T$ ($\hat{g}_t^{AF, t=1} C_{t=1}^B$ bzw. $\hat{g}_t^{AF, t=tt} C_{t=tt}^B$) stellen die antizipierte Zielsetzung der mittelfristigen Produktionsplanung bzw. das Top-Down Kriterium der Top-Ebene bzw. Standortplanung $C_{t=1 \dots T}^{TB}$ dar und werden durch (5.116) bis (5.122) konkret formuliert (siehe (5.125)). Das antizipierte Entscheidungsfeld der mittelfristigen Produktionsplanung besteht aus den exakten Entscheidungsfeldern der mittelfristigen Produktionsplanung für die Perioden $t = 1$ und $t = tt$ ($A_{t=1}^B$ bzw. $A_{t=tt}^B$), die durch die Nebenbedin-

gungen (3.35) bis (3.49) für die Perioden $t = 1$ und $t = tt$ beschrieben werden (siehe (5.126)).

Die antizipierte optimale Entscheidung der mittelfristigen Produktionsplanung für die Perioden $t = 1$ und $t = tt$ ($\widehat{a}_{t=1 \wedge t=tt}^{B,ExEx2*}$) bzw. das Ergebnis der Antizipationsfunktion $AF(IN)$ wird in (5.127) formuliert und durch eine Maximierung der antizipierten Zielsetzung $\widehat{C}_{IN,t=1..T}^{B,ExEx2}$ erreicht, wobei das antizipierte Entscheidungsfeld $\widehat{A}_{IN,t=1 \wedge t=tt}^{B,ExEx2}$ und der antizipierte Informationsstatus \widehat{I}_{IN}^B berücksichtigt werden müssen, die von der aktuellen Instruktion IN der Standortplanung abhängig sind. Die optimale Entscheidung der Standortplanung $a_{t=1..T}^{T*}$ beachtet letztendlich die antizipierte Zielsetzung sowie den antizipierten Informationsstatus der mittelfristigen Produktionsplanung (siehe (5.128)).

Analog zur teilweise explizit exakten Antizipationsfunktion mit einer Periode werden keine zusätzlichen Daten per Instruktion oder Reaktion zwischen den Planungsebenen übergeben. Aus diesem Grund gelten die Gleichungen (4.15) bis (4.17) bzw. (4.18) bis (4.21) aus Kapitel 4.3 für die Aggregation bzw. Disaggregation der bestehenden Daten.

Abschließend wird die entwickelte Koordinationsform mit teilweise explizit exakter Antizipationsfunktion mit zwei Perioden in Abbildung 5.4 dargestellt.

Algorithmus 6 Iterative hierarchische Planung mit teilweise explizit exakter Antizipationsfunktion mit zwei Perioden

- 1: $\bar{a}_{it=0}^T = 0$
 - 2: $tt = \lfloor \frac{T}{2} \rfloor$
 - 3: **for** $it = 1 \dots itmax$ **do**
 - 4: Löse $M_{t=1..T}^T$ mit $\widehat{M}_{t=1..T}^{B,ExEx2}$ für Perioden $t = 1$ und $t = tt$
 - 5: Übergebe $IN_{t=1..T}^*$
 - 6: $\bar{a}_{it}^T = a_{t=1..T}^{T*}$
 - 7: **if** $\bar{a}_{it}^T = \bar{a}_{it-1}^T \pm \epsilon$ **then**
 - 8: Break
 - 9: **end if**
 - 10: Löse $M_{t=1}^B$
 - 11: Übergebe $RE_{t=1}^*$
 - 12: Setze tt neu
 - 13: **end for**
 - 14: **for** $t = 1 \dots T$ **do**
 - 15: Löse M_t^B
 - 16: **end for**
 - 17: $Kapitalwert = CY^T(C_{t=1..T}^T(a_{t=1..T}^{T*})) + \sum_{t=1}^T (C_{IN^*,t}^B(a_t^{B*}))(1+z)^{-(t-1)}$
 - 18: Rollierende Planung: Wiederhole Algorithmus in Periode $t = 2$ für $t = 2 \dots T + 1$, in Periode $t = 3$ für $t = 3 \dots T + 2$, usw.
-

Zusätzlich beschreibt der dargestellte Algorithmus (Algorithmus 6) den Planungsablauf, welcher erneut auf dem Algorithmus der iterativen hierarchischen Planung (Algorithmus 2) aus Kapitel 4.5 aufbaut. Abweichungen finden sich jedoch in den Zeilen 2, 3 und 12. In Zeile 2 wird die zweite exakt zu antizipierende Periode $t = tt$ erstmals gesetzt. In diesem Fall wird beispielsweise die Periode in der Mitte des Planungszeitraumes gewählt und gegebenenfalls abgerundet. Als Abweichung in Zeile 3 wird das Modell der Top-Ebene bzw. Standortplanung mit der teilweise explizit exakten Antizipationsfunktion mit zwei Perioden $\widehat{M}_{t=1\dots T}^{B,ExEx2}$ für die Perioden $t = 1$ und $t = tt$ ausgeführt. In Zeile 12 wird die zweite exakt zu antizipierende Periode $t = tt$ innerhalb der iterativen Planung neu gesetzt. Dabei kann beispielsweise das Ergebnis der letzten Standortplanung überprüft werden und eine Periode mit einer Strukturveränderung als Periode $t = tt$ gewählt werden. Weitere grundsätzliche Beschreibungen des Algorithmus finden sich in Kapitel 4.5.

6 Testrechnungen

6.1 Testaufbau

Um den Vorteil der entwickelten Antizipationsfunktionen für eine hierarchische Koordination hinsichtlich der Lösungsgüte zu validieren, wurden Testrechnungen, sowohl für herkömmliche Varianten der hierarchischen Koordination ohne Antizipation, als auch für die Varianten der hierarchischen Koordination mit Antizipation durchgeführt und ausgewertet.

Die Testrechnungen wurden auf einem 8-Kernrechner mit Prozessoren vom Typ Intel Xeon E5410 mit jeweils 2,33 GHz durchgeführt. Als Betriebssystem wurde Microsoft Windows Vista Business 64 Bit mit Service Pack 2 verwendet, das auf einen 16 GB RAM Arbeitsspeicher zugreifen konnte. Zur Entwicklung und Durchführung der Testrechnungen diente die Entwicklungsumgebung Eclipse SDK 4.2.1 mit Java JDK 1.7.0.11 64 Bit, die Datenbanksoftware sowie die zugehörigen Datenbanken von Microsoft Access Professional Plus 2010 64 Bit und die Optimierungssoftware Fico Xpress 7.2.1 64 Bit mit dem zugehörigen Editor IVE sowie der Modellierungssprache Mosel.

Die unterschiedlichen Varianten der hierarchischen Koordination, für die Testrechnungen durchgeführt wurden, basieren auf den bereits vorgestellten Modellen dieser Arbeit und werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

6.1.1 Varianten der hierarchischen Koordination ohne Antizipation

Variante 1: Simultanplanung

Die Simultanplanung basiert auf dem in Kapitel 3.3 entwickelten Gesamtmodell, das die langfristige Standort- und mittelfristige Produktionsplanung simultan für einen langfristigen Planungszeitraum löst und somit keine Antizipation berücksichtigt. Diese aufgrund der simultanen Lösung der mittelfristigen Produktionsplanung aber auch nicht benötigt. Für dieses Modell wurde kein expliziter Algorithmus zum Planungsablauf angegeben, da das Gesamtmodell nur einmalig gelöst werden muss, um das optimale Ergebnis zu erhalten. Die Lösung der Simultanplanung stellt auch das optimale Gesamtergebnis für alle anderen Varianten dar und dient als Benchmark.

Variante 2: Top-Down Planung

Die Top-Down Planung wurde als weitere Variante der hierarchischen Koordination ohne Antizipation ausgeführt und basiert auf den Erläuterungen und dem Algorithmus in Kapitel 4.5 (Algorithmus 1).

Variante 3: Iterative hierarchische Planung

Als Erweiterung zur Top-Down Planung wurde die iterative hierarchische Planung betrachtet und als dritte Variante ausgeführt. Die Planung basiert auf den Ausführungen in Kapitel 4.5 und dem dort beschriebenen Algorithmus (Algorithmus 2).

6.1.2 Varianten der hierarchischen Koordination mit Antizipation

Variante 4: Iterative hierarchische Planung mit mengenmäßig explizit approximierter Antizipationsfunktion (ExApMe)

Als Variante der hierarchischen Koordination mit Antizipation wurde die iterative hierarchische Planung mit mengenmäßig explizit approximierter Antizipationsfunktion (ExApMe) verwendet, deren Beschreibung sich in Kapitel 5.2.1 wiederfindet. Der zugehörige Algorithmus zum Planungsablauf befindet sich ebenfalls dort (Algorithmus 3).

Variante 5: Iterative hierarchische Planung mit kapazitätsmäßig explizit approximierter Antizipationsfunktion (ExApKa)

Die iterative hierarchische Planung mit kapazitätsmäßig explizit approximierter Antizipationsfunktion (ExApKa) stellte die fünfte Variante dar und orientiert sich an der Beschreibung in Kapitel 5.2.2 und dem dort erläuterten Algorithmus zum Planungsablauf (Algorithmus 4).

Variante 6: Iterative hierarchische Planung mit teilweise explizit exakter Antizipationsfunktion mit einer Periode (ExEx1)

Die sechste Variante wurde durch die iterative hierarchische Planung mit teilweise explizit exakter Antizipationsfunktion mit einer Periode (ExEx1) gebildet, welche in Kapitel 5.2.3 genauer beschrieben ist. Der Planungsablauf wird im dortigen Algorithmus definiert (Algorithmus 5).

Variante 7: Iterative hierarchische Planung mit teilweise explizit exakter Antizipationsfunktion mit zwei Perioden (ExEx2)

Die siebte und letzte Variante war die iterative hierarchische Planung mit teilweise explizit exakter Antizipationsfunktion mit zwei Perioden (ExEx2) und wurde, wie in Kapitel 5.2.4 beschrieben, mit dem zugehörigen Algorithmus zum Planungsablauf (Algorithmus 6) ausgeführt. In den Testrechnungen entsprach die zweite betrachtete Periode $t = tt$ aus Komplexitätsgründen immer der mittleren Periode des Planungszeitraumes.

6.1.3 Prämissen und Testscenarien

Aus Komplexitäts- und Vergleichbarkeitsgründen wurde bei den Testrechnungen keine rollierende Planung durchgeführt. Zwar wäre dies technisch möglich gewesen, zum Vergleich der Lösungsgüte ist eine konkrete Durchführung jedoch nicht notwendig und würde die Komplexität zu sehr erhöhen. Zudem wurde auf der untergeordneten Planungsebene eine sukzessive Planung für alle Perioden $t = 1 \dots T$ durchgeführt, wie in den einzelnen Algorithmen bereits berücksichtigt, um eine Vergleichbarkeit der Gesamtergebnisse zwischen allen Varianten zu erreichen.

Die Testrechnungen wurden mit zwei Szenarien durchgeführt, wobei sich diese als „kleines“ und „großes“ Szenario definieren lassen. Variationen bezüglich der Voreinstellungen bestehen hauptsächlich in den Dimensionen der Szenarios, wie die nachfolgenden Tabellen 6.1 und 6.2 zeigen.

Kleines Szenario

Daten	Vorgabe
Anzahl der geografischen Standorte	4
Anzahl der Standorte / Standortkonfigurationen	8 (2 Standortkonfigurationen je geo. Standort)
Anzahl der Produkte	4
Anzahl der Produktgruppen	2
Anzahl der Märkte	8
Planungszeitraum der mittelfristigen Produktionsplanung	12 Monate
Planungszeitraum der Standortplanung	10 Jahre

Tabelle 6.1: Dimensionen des kleinen Szenarios

Das kleine Szenario betrachtet vier geografische Standorte, die in Verbindung mit zwei möglichen Standortkonfigurationen je geografischem Standort, zu acht potentiellen Standorten führen. Weiter berücksichtigt das Szenario vier Produkte, die zu zwei Produktgruppen mit jeweils zwei Produkten aggregiert werden. Es müssen acht Märkte bedient werden. Der langfristige Planungszeitraum der Standortplanung beträgt zehn Jahre und der mittelfristige Planungszeitraum zwölf Monate.

Es wird eine Greenfield-Planung angenommen. Zudem liegen Nachfragen vor, die langfristig einem Trend folgen, der abnehmend, konstant oder zunehmend sein kann. Mittelfristig kann die Nachfrage stark oder schwach saisonal sein, wobei im mittelfristigen Planungszeitraum nur ein Saisonzyklus auftritt.

Für die mathematischen Modelle führt dies im Fall der mittelfristigen Produktionsplanung zu 19936 Nebenbedingungen, 14304 reellwertigen Variablen und 576 binären Variablen sowie im Fall der langfristigen Standortplanung zu 2832 Nebenbedingungen, 1824 reellwertigen Variablen und 464 binären Variablen. Weitere Angaben zur Anzahl an Nebenbedingungen, reellwertigen und binären Variablen der einzelnen Modelle im kleinen Szenario befinden sich im Anhang A.2.1 in Tabelle A.9.

Großes Szenario

Daten	Vorgabe
Anzahl der geografischen Standorte	8
Anzahl der Standorte / Standortkonfigurationen	16 (2 Standortkonfigurationen je geo. Standort)
Anzahl der Produkte	12
Anzahl der Produktgruppen	4
Anzahl der Märkte	16
Planungszeitraum der mittelfristigen Produktionsplanung	12 Monate
Planungszeitraum der Standortplanung	10 Jahre

Tabelle 6.2: Dimensionen des großen Szenarios

Das große Szenario beinhaltet mit acht geografischen Standorten doppelt so viele wie das kleine Szenario, die in Verbindung mit den beiden möglichen Standortkonfigurationen zu 16 potentiellen Standorten führen. Es werden zwölf Produkte in vier Produktgruppen betrachtet. Über den langfristigen Planungszeitraum von zehn Jahren und den mittelfristigen Planungszeitraum von zwölf Monaten müssen 16 Märkte bedient werden.

Analog zum kleinen Szenario wird ebenfalls eine Greenfield-Planung angenommen und die Nachfrage unterliegt einem langfristigen Trend sowie mittelfristigen Schwankungen.

Die Dimensionen des großen Szenarios führen beispielsweise im Modell der mittelfristigen Produktionsplanung zu 211904 Nebenbedingungen, 159168 reellwertigen Variablen und 3072 binären Variablen. Das Modell der langfristigen Standortplanung besitzt 15424 Nebenbedingungen, 11680 reellwertige Variablen und 1280 binäre Variablen. Detaillierte Angaben zur Anzahl an Nebenbedingungen, reellwertigen und binären Variablen der einzelnen Modelle im großen Szenario werden im Anhang A.2.2 in Tabelle A.14 dargestellt.

6.2 Erzeugung der Testdaten und Ablauf der Testrechnungen

Um die Testrechnungen durchführen zu können mussten Testdaten für alle, in den vorgestellten Modellen eingesetzten Daten erzeugt werden. Dafür wurde ein Java-Programm entwickelt, das die Testdaten erzeugt und den mathematischen Optimierungsmodellen über Microsoft Access Datenbanken zur Verfügung stellt.

Die detaillierte Beschreibung der Erzeugung jedes einzelnen Testdatensatzes wäre an dieser Stelle zu aufwendig. Es werden darum im Folgenden nur die Erzeugungen der Testdaten der Nachfrage sowie Absatzpreise genauer beschrieben. Detaillierte Beschreibungen zur Erzeugung aller weiteren Testdaten befinden sich im Anhang (siehe Anhang A.1).

Die genauen Einstellungen der Szenarien, die für die erzeugten Testdaten vorgenommen wurden, befinden sich ebenfalls im Anhang (siehe Anhang A.2.1 für die Einstellungen des kleinen Szenarios und Anhang A.2.2 für die Einstellungen des großen Szenarios).

Erzeugung der Testdaten für die Nachfrage

Für die Nachfrage in den behandelten mathematischen Modellen und Antizipationsfunktionen ist die Abbildung von saisonalen Nachfrageschwankungen und dynamischen Veränderungen der Nachfrage besonders wichtig. Aus diesem Grund musste gezielt darauf geachtet werden, dass die erzeugten Testdaten der Nachfrage diese Eigenschaften sowohl im mittelfristigen, als auch im langfristigen Planungszeitraum aufweisen.

Da die in der Standortplanung genutzte aggregierte Nachfrage d_{kpt}^{TM} eine Aggregation der detaillierten Nachfrage d_{kitm}^{BM} darstellt, wurden die Testdaten nur für die detaillierte Nachfrage erzeugt. Die Testdaten wurden je Markt k und Produkt i einzeln erstellt, um relativ identische Daten der Nachfrage auszuschließen. Anschließend wurden besondere Berechnungen für die einzelnen Perioden m und t vorgenommen, um die beschriebenen dynamischen Veränderungen darzustellen. Der nachfolgende Algorithmus definiert die Erzeugung der Testdaten für die Nachfrage (Algorithmus 7).

Als Basis der Testdaten diente eine gleichverteilte Zufallszahl a_i (siehe Zeile 3), deren Gleichverteilung zwischen einem vorgegebenen Minimum Min und Maximum Max lag (siehe Zeile 1). Diese Zufallszahl wurde je Produkt i gezogen und stellte den Mittelwert der grundsätzlichen Normalverteilung für die monatliche Nachfrage des Produktes i dar. Die Standardabweichung wurde durch die Division des Mittelwertes durch einen konstanten Wert $const$ errechnet (siehe Zeilen 2 bis 5).

Anschließend wurde je Markt k und Produkt i eine gleichverteilte Zufallszahl zwischen null und eins gezogen, um die mittelfristige Nachfrage $Saison_{ki}$ festzulegen (siehe Zeilen 6 und 7). War die Zufallszahl kleiner oder gleich 0,5, wurde von einer relativ konstanten Nachfrage ausgegangen und je Jahr t und Monat m eine Zufallszahl aus der gegebenen Normalverteilung als Nachfrage c_{kitm} gezogen (siehe Zeilen 9 bis 11). War die gleichverteilte Zufallszahl größer als 0,5, wurde von einer saisonalen Nachfrage ausgegangen (siehe Zeile 15). Dies hatte zur Folge, dass die je Jahr t und Monat m gezogene Zufallszahl

aus der gegebenen Normalverteilung mit einem zusätzlichen Faktor des entsprechenden Monats multipliziert wurde. Für die Monate eins bis drei und zehn bis zwölf war dies der Faktor 0,8, für die Monate vier und fünf sowie acht und neun der Faktor 1,15 und für die Monate sechs und sieben der Faktor 1,3 (siehe Zeilen 16 bis 25). Die Nachfragespitzen sollten sich so in den Monaten sechs und sieben bilden, wobei sich durch die Normalverteilung auch andere Nachfragespitzen ergeben konnten.

Algorithmus 7 Erzeugung der Testdaten für die Nachfrage

```
1: Setze  $Min$ ,  $Max$  und  $const$ 
2: for  $i \in I$  do
3:    $a_i = GV(Min; Max)$ 
4:   Erzeuge  $NV_i(a_i; \frac{a_i}{const})$ 
5: end for
6: for  $k \in K, i \in I$  do
7:    $Saison_{ki} = GV(0; 1)$ 
8:    $Trend_{ki} = GV(0; 2)$ 
9:   if  $Saison_{ki} \leq 0,5$  then
10:    for  $t = 1 \dots T, m = 1 \dots M$  do
11:       $c_{kitm} = NV_i(a_i; \frac{a_i}{const})$ 
12:       $d_{kitm}^{BM} = c_{kitm} \cdot (1 + \frac{(Trend_{ki}-1)}{T})$ 
13:    end for
14:  end if
15:  if  $Saison_{ki} > 0,5$  then
16:    for  $t = 1 \dots T, m = 1 \dots M$  do
17:      if  $m \in \{1, 2, 3, 10, 11, 12\}$  then
18:         $c_{kitm} = 0,8 \cdot NV_i(a_i; \frac{a_i}{const})$ 
19:      end if
20:      if  $m \in \{4, 5, 8, 9\}$  then
21:         $c_{kitm} = 1,15 \cdot NV_i(a_i; \frac{a_i}{const})$ 
22:      end if
23:      if  $m \in \{6, 7\}$  then
24:         $c_{kitm} = 1,3 \cdot NV_i(a_i; \frac{a_i}{const})$ 
25:      end if
26:       $d_{kitm}^{BM} = c_{kitm} \cdot (1 + (\frac{(Trend_{ki}-1)}{T} \cdot t))$ 
27:    end for
28:  end if
29: end for
```

Um langfristige Veränderungen abzubilden, wurde ein langfristiger Trend $Trend_{ki}$ je Markt k und Produkt i durch eine gleichverteilte Zufallszahl abgebildet (siehe Zeile 8). Diese Zufallszahl lag zwischen null und zwei, was den Prozentsatz der Nachfrage am

Ende des Planungszeitraumes abbilden sollte. Die Nachfrage zu Beginn des Planungszeitraumes wurde als 100% angenommen und über den gesamten Planungszeitraum linear verändert, um den Prozentsatz der Zufallszahl am Ende des Planungszeitraumes zu erreichen. Bei einer Zufallszahl von null und einem Planungszeitraum von zehn Jahren, hätte sich der Trend jedes Jahr um 10% verringert. Die gezogene Zufallszahl für den langfristigen Trend wurde letztendlich mit den zuvor generierten Monatsnachfragen c_{kitm} für das jeweilige Jahr multipliziert, um die zu erzeugende Nachfrage d_{kitm}^{BM} zu bestimmen (siehe Zeilen 12 und 26).

Abbildung 6.1 zeigt einen beispielhaften Verlauf einer erzeugten Nachfrage eines Marktes für ein Produkt über zehn Jahre mit langfristig abnehmendem Trend und mittelfristig saisonaler Nachfrage.

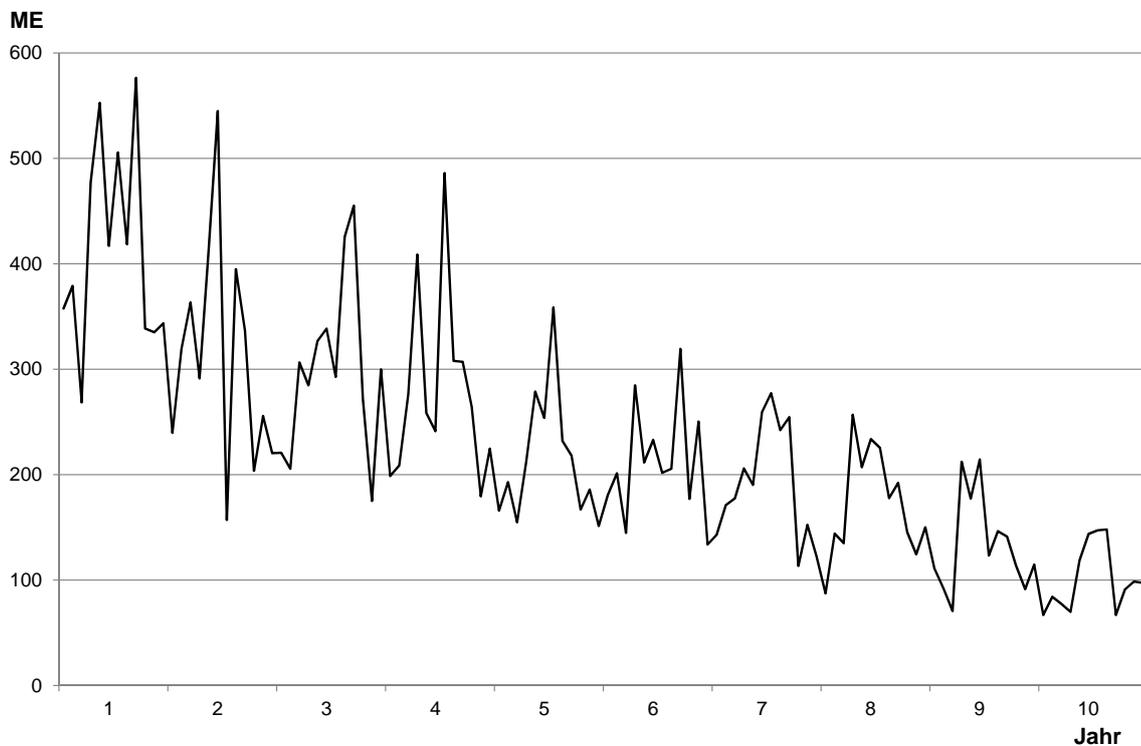


Abbildung 6.1: Beispielhaft erzeugte Nachfrage eines Marktes für ein Produkt über zehn Jahre

Erzeugung der Testdaten für Absatzpreise

Auf den Unterschied zwischen verschiedenen Produktgruppen wurde bei der Erzeugung der Testdaten für Absatzpreise besonderes geachtet, da davon ausgegangen wurde, dass Absatzpreise zwischen Produktgruppen variieren.

Auch an dieser Stelle wurden nur die Testdaten für die produktbezogenen Absatzpreise p_{ki}^{BM} erzeugt, da die produktgruppenbezogenen Absatzpreise p_{kp}^{TM} die detaillierten Absatzpreise aggregieren. Den Vorgang zur Erzeugung der Testdaten für Absatzpreise verdeutlicht der folgende Algorithmus (Algorithmus 8).

Algorithmus 8 Erzeugung der Testdaten für Absatzpreise

```
1: Setze  $gMin$ ,  $gMax$ ,  $mean$  und  $const$ 
2: for  $p \in P$  do
3:    $g_p = GV(gMin; gMax)$ 
4:   for  $i \in PG_p$  do
5:     Erzeuge  $NV_i(mean \cdot g_p; \frac{mean \cdot g_p}{const})$ 
6:   end for
7: end for
8: for  $k \in K, i \in I$  do
9:    $p_{ki}^{BM} = NV_i(mean \cdot g_p; \frac{mean \cdot g_p}{const})$ 
10:  if  $p_{ki}^{BM} < (mean \cdot gMin)$  then
11:     $p_{ki}^{BM} = (mean \cdot gMin)$ 
12:  end if
13:  if  $p_{ki}^{BM} > (mean \cdot gMax)$  then
14:     $p_{ki}^{BM} = (mean \cdot gMax)$ 
15:  end if
16: end for
```

Je Produktgruppe p wurde eine gleichverteilte Zufallszahl zwischen einem vorgegebenen Minimum $gMin$ und Maximum $gMax$ als Produktgruppenwert g_p gezogen (siehe Zeilen 1 bis 3). Dieser diente dazu, die Absatzpreise der Produkte innerhalb der Produktgruppe ähnlich und zwischen Produktgruppen unterschiedlich zu gestalten. Anschließend wurde für jedes Produkt i der Produktgruppe eine Normalverteilung erstellt, die als Mittelwert einen konstanten Mittelwert $mean$ mit dem zugehörigen Produktgruppenwert g_p multipliziert. Die Standardabweichung ergab sich aus der Division des berechneten Mittelwertes durch einen konstanten Wert (siehe Zeilen 4 bis 6).

Der Absatzpreis p_{ki}^{BM} wurde darauffolgend je Markt k und Produkt i durch eine Zufallszahl der Normalverteilung erzeugt (siehe Zeilen 8 und 9). Untere und obere Schranken für die Absatzpreise verhinderten extreme Ausreißer sowohl nach oben als auch nach unten, die durch die Normalverteilung möglich waren. Als Schranken galten die minimalen und maximalen Werte der Produktgruppenwerte $gMin$ bzw. $gMax$ in Verbindung mit dem konstanten Mittelwert $mean$. Lag die gezogene normalverteilte Zufallszahl des Absatzpreises darunter bzw. darüber, wurden genau die Schrankenwerte eingesetzt (siehe Zeilen 10 bis 15).

Ablauf der Testrechnungen

Um die Testrechnungen der einzelnen Varianten für mehrere unterschiedliche Testdaten durchzuführen, wurden je Szenario 30 Testinstanzen mit entsprechend unterschiedlichen Testdaten erzeugt.

Anschließend wurden Testrechnungen mit allen Varianten für jede Testinstanz der beiden Szenarien durchgeführt. Dabei folgten die Berechnungen den beschriebenen Algorithmen der Varianten, bis auf die bereits genannten Ausnahmen, beispielsweise die rollierende Planung.

Als Abbruchkriterien wurden eine zeitliche Grenze, eine maximale Anzahl an Iterationen und ϵ -Umgebungen vorgegeben. Die zeitliche Grenze lag im ersten Szenario pauschal bei 1,5 Stunden bzw. 5400 Sekunden je Lösung eines Modells und betrug im zweiten Szenario 2 Stunden bzw. 7200 Sekunden. Es durften maximal zehn Iterationen durchgeführt werden. Somit ergaben sich beispielsweise im ersten Szenario maximale Lösungsdauern der iterativen Planungen von $1,5 \cdot 2 \cdot 10 = 30$ Stunden, da bei der iterativen Planung die Modelle der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung jeweils maximal 1,5 Stunden gelöst werden durften und dies über maximal zehn Iterationen. Eine Ausnahme bildete die Variante der Simultanplanung, die keine iterative Planung verwendet, aber aufgrund des Gesamtmodells eine größere Rechenzeit benötigt. Hier wurde die zeitliche Grenze mit der maximalen Anzahl an Iterationen multipliziert, so dass das Simultanmodell im ersten Szenario eine zeitliche Grenze von 15 Stunden und im zweiten Szenario eine zeitliche Grenze von 20 Stunden einhalten musste. Um die iterative Planung bei sich wiederholenden oder nur noch minimal verändernden Ergebnissen abzubrechen, wurde eine ϵ -Umgebung als Abbruchkriterium eingeführt. Wicht das Ergebnis einer neuen Lösung der Standortplanung innerhalb der iterativen Planung nicht mehr als 0,005 bzw. 0,5% von dem Ergebnis der vorherigen Lösung der Standortplanung ab, so wurde die iterative Planung abgebrochen.

6.3 Auswertung der Ergebnisse

Die Testrechnungen wurden wie beschrieben durchgeführt und werden im Folgenden genauer untersucht. Da im großen Szenario keine Testinstanz vom Simultanmodell in der gegebenen Zeit gelöst werden konnte, werden in erster Linie die Ergebnisse des kleinen Szenarios analysiert, da für dieses Szenario alle Varianten, insbesondere auch das Simultanmodell, in der vorgegebenen Zeit optimal gelöst werden konnten. Die Ergebnisse des großen Szenarios dienen letztendlich dazu, einen Ausblick auf die Leistung der Varianten bei größeren Testinstanzen zu geben.

Kleines Szenario

Je Testinstanz und Variante wurde das Gesamtergebnis (Gesamtergebnis = Kapitalwert der entscheidungsrelevanten Kosten und Erlöse vor Steuern bestehend aus den Stand-

ortkosten der Standortplanung und den Deckungsbeiträgen der mittelfristigen Produktionsplanung für alle Perioden $t = 1 \dots T$) verwendet, um Gaps zu berechnen. Die Gaps geben die prozentuale Abweichung des Gesamtergebnisses einer Variante für eine Testinstanz (Aktuelles Gesamtergebnis) vom optimalen Gesamtergebnis für diese Testinstanz (Lösung von Variante 1) an ($Gap = \frac{\text{Optimales Gesamtergebnis} - \text{Aktuelles Gesamtergebnis}}{\text{Optimales Gesamtergebnis}}$). Zudem wurde die Rechenzeit gespeichert. Diese beinhaltet die gesamte Dauer des jeweiligen Algorithmus einer Variante, bis auf die rollierende Planung.

Tabelle 6.3 fasst die Ergebnisse der Testrechnungen des kleinen Szenarios mit durchschnittlichen Gaps in Prozent und durchschnittlichen Rechenzeiten in Sekunden je Variante zusammen. Die detaillierten Gesamtergebnisse, Gaps und Rechenzeiten je Testinstanz und Variante des kleinen Szenarios befinden sich im Anhang A.3 in den Tabellen A.18, A.19 und A.20.

	Gaps in Prozent	Rechenzeiten in Sekunden
Variante 1	0,00	4837,10
Variante 2	16,53	9,70
Variante 3	16,58	21,30
Variante 4	10,90	261,13
Variante 5	10,91	226,20
Variante 6	14,16	174,60
Variante 7	12,14	410,67

Tabelle 6.3: Durchschnittliche Gaps und Rechenzeiten der Varianten des kleinen Szenarios

Variante 1 stellt bei allen Testinstanzen das optimale Gesamtergebnis dar und weist somit einen durchschnittlichen Gap von 0% auf. Allerdings benötigt Variante 1 aufgrund der Modellgröße auch die höchste durchschnittliche Rechenzeit von 4837,1 Sekunden und entfällt somit als mögliche Alternative für den weiteren Einsatz. Die Varianten ohne Antizipation (Varianten 2 und 3) weisen im Durchschnitt einen Gap von 16,53% bzw. 16,58% auf, wobei festzuhalten ist, dass die Top-Down Planung minimal besser abschneidet als die iterative hierarchische Planung. Beide Varianten ohne Antizipation schneiden im Vergleich der durchschnittlichen Gaps zu den Varianten mit Antizipation (Varianten 4 bis 7) schlechter ab, besitzen mit 9,70 Sekunden bzw. 21,30 Sekunden aber deutlich niedrigere Rechenzeiten im Durchschnitt. Die Varianten mit explizit approximierter Antizipationsfunktion (Varianten 4 und 5) schneiden mit einem durchschnittlichen Gap von 10,90% bzw. 10,91% am besten ab und führen auch zu besseren Gesamtergebnissen als die Varianten mit teilweise explizit exakter Antizipationsfunktion (Varianten 6 und 7) mit einem durchschnittlichen Gap von 14,16% bzw. 12,14%. Vergleicht man die durch-

schnittlichen Rechenzeiten der Varianten mit Antizipation, fällt auf, dass diese deutlich höher sind als die durchschnittlichen Rechenzeiten der Varianten ohne Antizipation, aber auch untereinander stark variieren. So besitzt Variante 6 die niedrigste durchschnittliche Rechenzeit mit 174,60 Sekunden der Varianten mit Antizipation, gefolgt von Variante 5 mit 226,20 Sekunden, Variante 4 mit 261,13 Sekunden und Variante 7 mit 410,67 Sekunden. Die besonders hohe Rechenzeit von Variante 7 ist darin begründet, dass die Modellgröße durch die beiden exakt antizipierten Perioden deutlich steigt und damit auch die Rechenzeit beeinflusst.

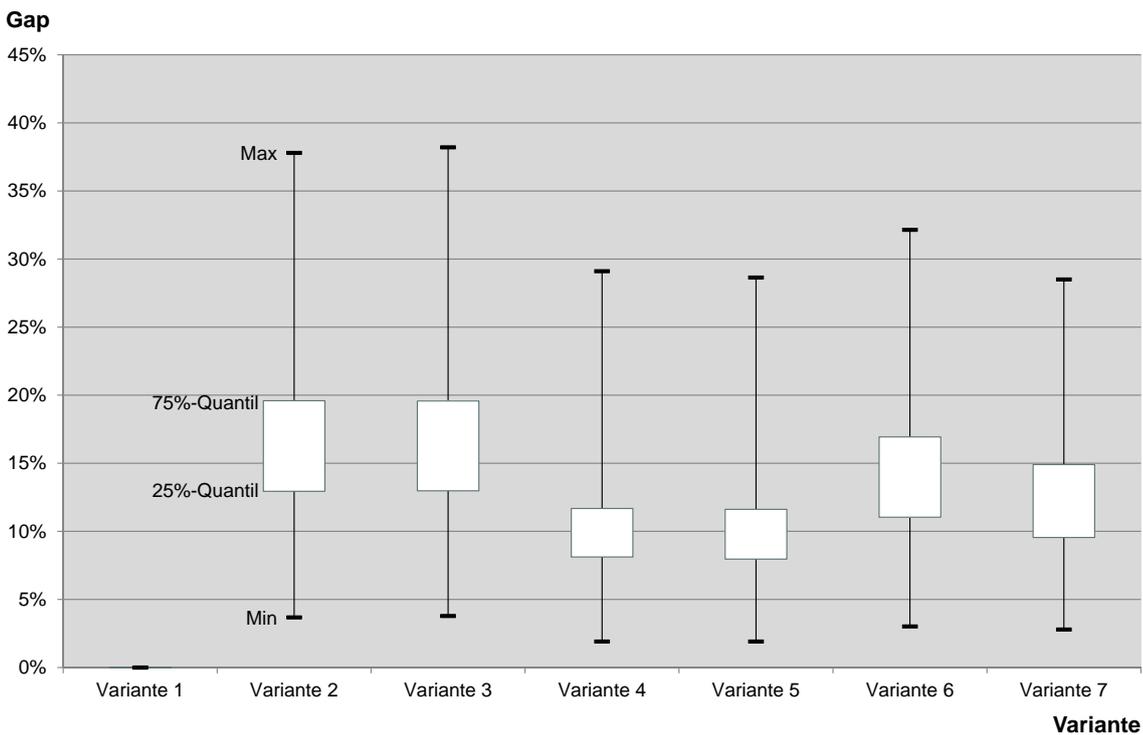


Abbildung 6.2: Verteilung der Gaps des kleinen Szenarios je Variante mit Minimum, Maximum, 25%- und 75%-Quantilen

Neben den reinen Durchschnittswerten zeigen die Abbildungen 6.2 und 6.3 die Verteilungen der Gaps (in Prozent) und Rechenzeiten (in Sekunden) des kleinen Szenarios je Variante an. Dabei werden je Variante die maximalen und minimalen Gaps bzw. Rechenzeiten aller Testinstanzen aufgezeigt. Zusätzlich zeigen die Rechtecke den Bereich an, in dem die mittleren 50% der Gaps bzw. Rechenzeiten aller Testinstanzen liegen. Unter und über den Grenzen der Rechtecke liegen jeweils weitere 25% der Gaps bzw. Rechenzeiten aller Testinstanzen, weshalb die Grenzen als 25%- bzw. 75%-Quantile bezeichnet werden.

Die Gaps von Variante 1 liegen auch in dieser Abbildung aufgrund des optimalen Gesamtergebnisses für alle Testinstanzen bei 0%. Die Verteilungen der Gaps der Varianten 2 und 3 besitzen sowohl zwischen dem Minimum und Maximum als auch zwischen den 25%- und 75%-Quantilen die größten Spannweiten. So liegen die maximalen Gaps bei ca. 38% und die minimalen Gaps bei ca. 4%. Die 25%- und 75%-Quantile der Gaps liegen bei ca. 13% und ca. 20%. Sowohl die Spannweiten zwischen den minimalen und maximalen Gaps, als auch zwischen den 25%- und 75%-Quantilen der Gaps fallen bei den Varianten 4 und 5 geringer aus (Minimum: ca. 2%, Maximum: ca. 29%, 25%-Quantil: ca. 8%, 75%-Quantil: ca. 12%). Damit wird deutlich, dass die Varianten 4 und 5 insgesamt zuverlässigere und bessere Gesamtergebnisse liefern, als die Varianten 2 und 3. Die Verteilung der Gaps der Variante 6 weist dagegen wieder größere Spannweiten zwischen Minimum und Maximum sowie den 25%- und 75%-Quantilen der Gaps auf (Minimum: ca. 3%, Maximum: ca. 32%, 25%-Quantil: ca. 11%, 75%-Quantil: ca. 17%). Im Gegensatz dazu liegt die Verteilung der Gaps von Variante 7 mit einem Minimum von ca. 3%, einem Maximum von ca. 29%, einem 25%-Quantil von ca. 10% und einem 75%-Quantil von ca. 15% nah an den Verteilungen der Varianten 4 und 5. Abschließend lässt sich feststellen, dass bei allen Varianten, außer Variante 1, relativ große Spannweiten zwischen den jeweiligen minimalen und maximalen Gaps bestehen, die Varianten 4 und 5 dabei die zuverlässigsten und besten Gesamtergebnisse liefern, was durch die geringste Spannweite und Lage der 25%- und 75%-Quantile zum Ausdruck kommt.

Ein anderes Bild liefert die Verteilung der Rechenzeiten des kleinen Szenarios. Die Verteilung der Rechenzeiten der ersten Variante ist nicht eingezeichnet, da selbst die minimale Rechenzeit bei 2917 Sekunden liegt und somit deutlich höhere Rechenzeiten im Gegensatz zu allen anderen Varianten bestehen. Dies ist durch die mehrfach beschriebene Komplexität und Größe des Simultanmodells begründet, weshalb es nur als Benchmark für das optimale Gesamtergebnis genutzt wird. Große Unterschiede weisen die Verteilungen der Rechenzeiten der Varianten ohne Antizipation (Varianten 2 und 3) im Gegensatz zu den Varianten mit Antizipation (Varianten 4 bis 7) auf. Während die Varianten 2 und 3 minimal 8 bzw. 14 Sekunden und maximal 11 bzw. 33 Sekunden benötigen, liegt die minimale Rechenzeit aller Varianten mit Antizipation bei 95 Sekunden (Variante 6). Dieser enorme Unterschied ist durch den zusätzlichen Rechenaufwand einer Antizipation begründet. Betrachtet man die einzelnen Varianten mit Antizipation genauer, so weisen die Varianten 4 und 7 große Spannweiten bei der Verteilung der Rechenzeiten auf (Minimum: 139 bzw. 245 Sekunden, Maximum: 606 bzw. 748 Sekunden, 25%-Quantil: ca. 214 bzw. ca. 307 Sekunden, 75%-Quantil: ca. 281 bzw. ca. 488 Sekunden). Die besten Verteilungen der Rechenzeiten der Varianten mit Antizipation besitzen die Varianten 5 und 6 mit einem Minimum von 160 bzw. 95 Sekunden, einem Maximum von 341 bzw. 318 Sekunden, einem 25%-Quantil von ca. 199 bzw. ca. 146 Sekunden und einem 75%-Quantil von ca. 235 bzw. ca. 205 Sekunden. Dabei liegen die Rechenzeiten der Variante 6 zwar etwas unterhalb von denen der Variante 5, weist allerdings größere Spannweiten als Variante 5 auf.

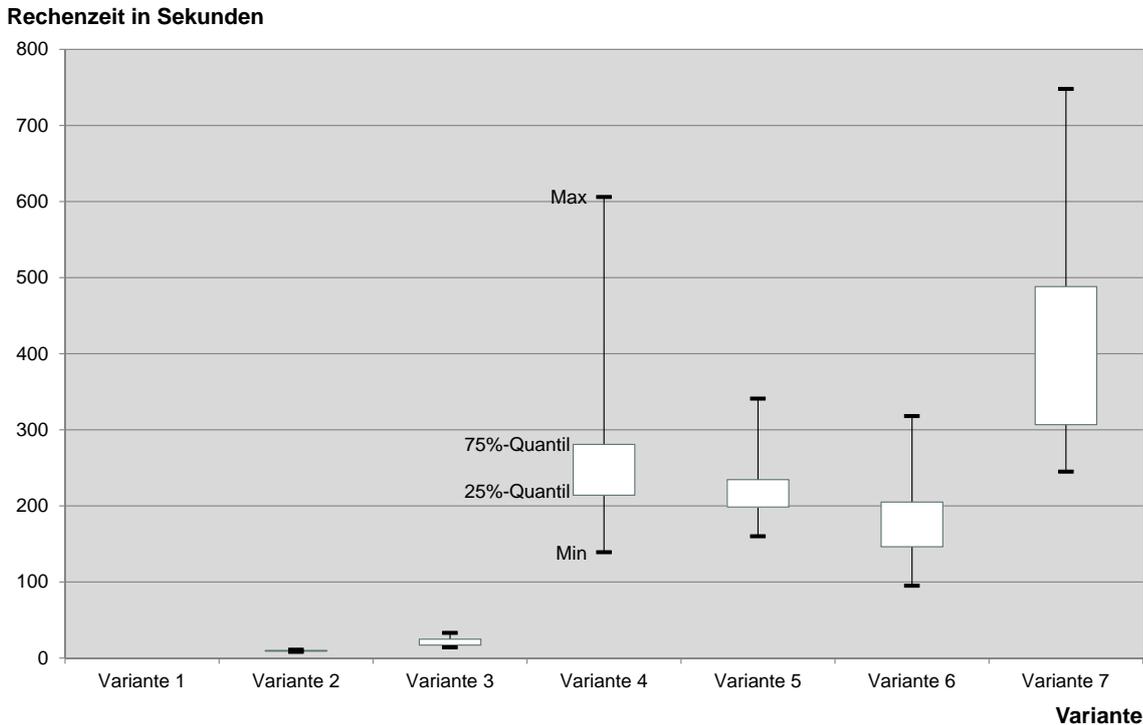


Abbildung 6.3: Verteilung der Rechenzeiten des kleinen Szenarios je Variante mit Minimum, Maximum, 25%- und 75%-Quantilen

Fasst man sowohl die durchschnittlichen Gaps und Rechenzeiten als auch die zugehörigen Verteilungen zusammen, so erweist sich Variante 5 mit der kapazitätsmäßig explizit approximierten Antizipationsfunktion als beste Alternative zur Maximierung der Gesamtergebnisse. Sie weist mit 10,91% (neben Variante 4 mit mengenmäßig explizit approximierter Antizipationsfunktion) die geringsten durchschnittlichen Gaps auf und besitzt mit 226,20 Sekunden, im Vergleich zu Variante 4, eine niedrigere durchschnittliche Rechenzeit. Dies belegen auch die Verteilungen der Gaps und Rechenzeiten, die für Variante 5 die geringsten Spannweiten der Varianten mit Antizipation aufweisen. Zudem liefert Variante 5, bis auf eine einzige Testinstanz (TI9), immer bessere Gaps als die Varianten ohne Antizipation (Varianten 2 und 3) und führt bei den meisten Testinstanzen zusammen mit Variante 4 zu den besten Gaps (siehe Tabelle A.19 im Anhang). Allerdings sind mit der Durchführung von Variante 5 deutlich höhere Rechenzeiten als bei den Varianten ohne Antizipation (Varianten 2 und 3) verbunden. Stellt dies im Anwendungsfall ein Problem dar, dann wäre Variante 2 als Top-Down Planung eine Alternative, die durchschnittlich 9,70 Sekunden an Rechenzeit benötigt, aber auch nur einen durchschnittlichen Gap von 16,53% erreicht.

Um die Ergebnisse der Testrechnungen genauer zu untersuchen und die bisherigen Aussagen zu unterstreichen, werden die Gesamtergebnisse und Rechenzeiten der Testinstanzen aller Varianten paarweise mit einem Wilcoxon Vorzeichen-Rang-Test für zwei verbundene Stichproben verglichen. Für eine allgemeine Beschreibung des Wilcoxon Vorzeichen-Rang-Tests mit einer Stichprobe sei auf Fahrmeir et al. (2011, S. 441-445) verwiesen. Da hier der Wilcoxon Vorzeichen-Rang-Test für zwei verbundene Stichproben angewandt wird, folgen die weiteren Erläuterungen zusätzlich den Ausführungen in Tiede und Voß (2000, S. 195-198).

Der Wilcoxon Vorzeichen-Rang-Test für zwei verbundene Stichproben prüft, ob zwei Stichproben X_1 und X_2 mit je m Elementen der gleichen Grundpopulation bzw. Verteilung angehören. Es wird angenommen, dass sich die Stichproben X_1 und X_2 jeweils stetig und symmetrisch um ihren Median verteilen. Stammen beide Datensätze aus derselben Grundpopulation, so besitzen sie den gleichen Median und die Differenz der Mediane ist null (vgl. Tiede und Voß, 2000, S. 195-196).

Es werden drei Hypothesen aufgestellt (A, B, C). (A) unterstellt als Null-Hypothese, dass die Mediane beider Stichproben X_1 und X_2 gleich sind. Die Null-Hypothese von (B) besagt, dass der Median der ersten Stichprobe X_1 kleiner gleich dem Median der zweiten Stichprobe X_2 ist. (C) unterstellt als Null-Hypothese, dass der Median der ersten Stichprobe X_1 größer gleich dem Median der zweiten Stichprobe X_2 ist. Es werden für jeden Vergleich zweier Varianten absolute Paardifferenzen über die Gesamtergebnisse bzw. Rechenzeiten gebildet. Anschließend werden die absoluten Paardifferenzen in eine Rangfolge gebracht und mit einem positiven oder negativen Vorzeichen versehen, je nachdem ob die Paardifferenz positiv oder negativ ist. Zuletzt werden je Hypothese Prüfvariablen durch Aufsummieren der Ränge gebildet, die anschließend mit einem vorgegebenen kritischen Wert verglichen werden. Liegt der Wert der Prüfvariable unter dem kritischen Wert, so kann die zugehörige Hypothese verworfen werden. Der kritische Wert ist abhängig vom Signifikanzniveau, welches im vorliegenden Fall 0,05 bzw. 5% beträgt. Der zugehörige kritische Wert bei $n = 30$ Testinstanzen liegt bei 152 (vgl. Schlittgen, 2012, S. 507).

	Var. 1	Var. 2	Var. 3	Var. 4	Var. 5	Var. 6	Var. 7
Variante 1	-	Var. 1					
Variante 2	Var. 1	-	n.s.	Var. 4	Var. 5	Var. 6	Var. 7
Variante 3	Var. 1	n.s.	-	Var. 4	Var. 5	Var. 6	Var. 7
Variante 4	Var. 1	Var. 4	Var. 4	-	n.s.	Var. 4	Var. 4
Variante 5	Var. 1	Var. 5	Var. 5	n.s.	-	Var. 5	Var. 5
Variante 6	Var. 1	Var. 6	Var. 6	Var. 4	Var. 5	-	Var. 7
Variante 7	Var. 1	Var. 7	Var. 7	Var. 4	Var. 5	Var. 7	-

Tabelle 6.4: Variantenvergleich der Gesamtergebnisse des kleinen Szenarios mit dem Wilcoxon Vorzeichen-Rang-Test (n.s. = nicht signifikant, Var. = Variante)

Das Ergebnis des Wilcoxon Vorzeichen-Rang-Tests für den Variantenvergleich der Gesamtergebnisse des kleinen Szenarios stellt Tabelle 6.4 dar. Dabei werden die Gesamtergebnisse von jeweils zwei Varianten miteinander verglichen und die Variante mit dem signifikant besseren Gesamtergebnis in der Tabelle aufgeführt. Zur besseren Übersicht enthält die Tabelle gespiegelte Ergebnisse ober- und unterhalb der Diagonale. Die detaillierten Ergebnisse der Prüfvariablen je Hypothese und Variantenvergleich sind im Anhang in Tabelle A.21 aufgeführt. Die Varianten 2 und 3 unterscheiden sich hinsichtlich der Gesamtergebnisse nicht signifikant (n.s.), sind aber signifikant niedriger als die Gesamtergebnisse aller anderen Varianten, wie die durchschnittlichen Gaps beider Varianten bereits vermuten ließen. Die Varianten 4 und 5 besitzen signifikant bessere Gesamtergebnisse als die Varianten 2, 3, 6 und 7, aber unterscheiden sich selbst nicht signifikant voneinander. Die Gesamtergebnisse der Varianten 6 und 7 liegen signifikant höher als die der Varianten 2 und 3. Zudem besitzt Variante 7 signifikant höhere Gesamtergebnisse als Variante 6.

	Var. 1	Var. 2	Var. 3	Var. 4	Var. 5	Var. 6	Var. 7
Variante 1	-	Var. 2	Var. 3	Var. 4	Var. 5	Var. 6	Var. 7
Variante 2	Var. 2	-	Var. 2				
Variante 3	Var. 3	Var. 2	-	Var. 3	Var. 3	Var. 3	Var. 3
Variante 4	Var. 4	Var. 2	Var. 3	-	n.s.	Var. 6	Var. 4
Variante 5	Var. 5	Var. 2	Var. 3	n.s.	-	n.s.	Var. 5
Variante 6	Var. 6	Var. 2	Var. 3	Var. 6	n.s.	-	Var. 6
Variante 7	Var. 7	Var. 2	Var. 3	Var. 4	Var. 5	Var. 6	-

Tabelle 6.5: Variantenvergleich der Rechenzeiten des kleinen Szenarios mit dem Wilcoxon Vorzeichen-Rang-Test (n.s. = nicht signifikant, Var. = Variante)

Die Ergebnisse des Wilcoxon Vorzeichen-Rang-Tests für die Rechenzeiten sind in Tabelle 6.5 aufgeführt. Hier werden die Rechenzeiten von jeweils zwei Varianten miteinander verglichen und die Variante mit der signifikant niedrigeren Rechenzeit in der Tabelle aufgeführt. Zur besseren Übersicht enthält auch diese Tabelle gespiegelte Ergebnisse ober- und unterhalb der Diagonale. Detaillierte Ergebnisse der Prüfvariablen für die Rechenzeiten je Hypothese und Variantenvergleich sind im Anhang in Tabelle A.22 aufgeführt. Die Rechenzeiten von Variante 1 stellen in diesem Fall die signifikant höchsten Rechenzeiten unter allen Varianten dar. Variante 2 besitzt im Gegensatz dazu die signifikant niedrigsten Rechenzeiten aller Varianten. Die Rechenzeiten von Variante 3 werden zwar von Variante 2 signifikant unterboten, liegen aber signifikant unter den Rechenzeiten der Varianten 1, 4, 5, 6 und 7. Eine besondere Situation stellt der Vergleich der Rechenzeiten der Varianten 4, 5 und 6 dar. Während die Rechenzeiten dieser Varianten signifikant unter denen der Varianten 1 und 7 liegen, sind untereinander Abweichungen zu erkennen. Zwischen den Varianten 4 und 5 sowie 5 und 6 herrschen keine signifikant

ten Unterschiede bezüglich der Rechenzeit, aber die Rechenzeiten von Variante 6 liegen signifikant unter denen der Variante 4. Variante 7 besitzt letztlich nur signifikant niedrigere Rechenzeiten gegenüber Variante 1.

Die Ergebnisse der Wilcoxon Vorzeichen-Rang-Tests für die Gesamtergebnisse und Rechenzeiten bestätigen die zuvor ermittelte Empfehlung von Variante 5 im Hinblick auf das Ziel der Maximierung der Gesamtergebnisse. Diese Variante liefert zusammen mit Variante 4 die signifikant besten Gesamtergebnisse (mit Ausnahme von Variante 1), wobei sich beide Varianten nicht signifikant voneinander unterscheiden. Betrachtet man die Rechenzeiten, unterscheiden sich diese zwar nicht signifikant, jedoch führen die durchschnittlichen Werte und Verteilungen der Rechenzeiten zu dem Schluss, dass Variante 5 etwas niedrigere Rechenzeiten benötigt, die zusätzlich keinen größeren Schwankungen innerhalb einer Spannweite unterliegen. Auch für die zeitsparende Alternative Variante 2 ergeben die Ergebnisse der Wilcoxon Vorzeichen-Rang-Tests, dass Variante 2 signifikant die niedrigsten Rechenzeiten besitzt, aber bei den Gesamtergebnissen bis auf Variante 3 allen anderen Varianten unterlegen ist.

Großes Szenario

Die Ergebnisse der Testrechnungen des großen Szenarios dienen dazu, einen Ausblick darauf zu geben, wie sich die entwickelten Antizipationsfunktionen bei größeren Testinstanzen verhalten. Detaillierte Auswertungen werden nicht vorgestellt, da für keine Testinstanz in der gegebenen Zeit eine sinnvolle Lösung durch das Simultanmodell gefunden werden konnte und die Testrechnungen für das Modell der Standortplanung bzw. Top-Ebene bei Varianten mit Antizipation bei einigen Testinstanzen bereits vor Finden der optimalen Lösung durch die zeitliche Grenze abgebrochen wurden, weshalb Abstände zwischen dem besten gefundenen Bound und der besten gefundenen ganzzahligen Lösung (im weiteren Verlauf als Optimalitätslücke bezeichnet) entstanden. Aus diesem Grund werden nur die durchschnittlichen Gaps, Rechenzeiten und Optimalitätslücken der Varianten des großen Szenarios in Tabelle 6.6 vorgestellt und erläutert. Auf weitere Auswertungen, wie beispielsweise einen Wilcoxon Vorzeichen-Rang-Test, wird verzichtet, da diese keine ausreichende Aussagekraft für das große Szenario besitzen.

Wie erwähnt, wurden für Variante 1 in der gegebenen Zeit keine sinnvollen Lösungen gefunden, weshalb für Variante 1 keine Daten in der Tabelle vorliegen und der Gap nicht mehr auf der optimalen Lösung von Variante 1 basiert. In diesem Fall bezieht sich der Gap je Testinstanz und Variante auf das beste gefundene Gesamtergebnis der Varianten 2 bis 7 je Testinstanz ($\text{Bestes Gesamtergebnis}$) ($\text{Gap} = \frac{\text{Bestes Gesamtergebnis} - \text{Aktuelles Gesamtergebnis}}{\text{Bestes Gesamtergebnis}}$). Die Optimalitätslücke wird je Testinstanz und Variante für das Modell der Standortplanung (je Variante entsprechend mit oder ohne Antizipation) betrachtet. Detaillierte Gaps, Rechenzeiten und Optimalitätslücken der Varianten des großen Szenarios befinden sich im Anhang A.3 in den Tabellen A.23, A.24 und A.25.

	Gaps in Prozent	Rechenzeiten in Sekunden	Optimalitätslücke in Prozent
Variante 1	-	-	-
Variante 2	2,00	172,47	0,00
Variante 3	1,99	467,67	0,00
Variante 4	1,77	43427,17	4,05
Variante 5	3,04	33723,80	6,07
Variante 6	22,50	67258,47	109,20
Variante 7	136,59	61357,23	-

Tabelle 6.6: Durchschnittliche Gaps, Rechenzeiten und Optimalitätslücken der Varianten des großen Szenarios

Die durchschnittlichen Gaps der Varianten ohne Antizipation (Varianten 2 und 3) liegen bei 2,00% bzw. 1,99%, wobei die Gesamtergebnisse der Varianten für eine bzw. zwei Testinstanzen das beste Gesamtergebnis darstellen. Die benötigte durchschnittliche Rechenzeit liegt bei 172,47 bzw. 467,67 Sekunden und alle Testinstanzen wurden innerhalb der gegebenen Zeit optimal gelöst (Optimalitätslücke jeweils bei 0,00%). Dies trifft nicht auf die Varianten mit Antizipation zu (Varianten 4 bis 7). Hier liegen die durchschnittlichen Optimalitätslücken für das Modell der Standortplanung bei 4,05% (Variante 4), 6,07% (Variante 5) sowie 109,20% (Variante 6). Da für Variante 7 bei einigen Testinstanzen in der vorgegebenen Zeit keine sinnvollen Lösungen gefunden wurden, kann keine durchschnittliche Optimalitätslücke berechnet werden. Trotz der Optimalitätslücken liegen die durchschnittlichen Gaps der Varianten mit Antizipation bei 1,77% (Variante 4), 3,04% (Variante 5), 22,50% (Variante 6) und 136,59% (Variante 7), wobei Variante 4 bei neun Testinstanzen, Variante 5 bei 14 Testinstanzen und Variante 6 bei vier Testinstanzen das beste Gesamtergebnis liefert (siehe Tabelle A.23 im Anhang). Festzustellen ist zudem, dass für Testinstanzen, bei denen für eine Variante mit Antizipation eine optimale Lösung für das Gesamtergebnis gefunden wurde, das beste Gesamtergebnis auch von einer Variante mit Antizipation erzeugt wird.

Als Beispiel soll die im kleinen Szenario empfohlene Variante 5 genauer untersucht werden. Diese findet bei 16 Testinstanzen eine für sich optimale Lösung. Große Optimalitätslücken besitzt die Variante zum Beispiel mit 121,89% bei Testinstanz 25 und 6,43% bei Testinstanz 20. Bei diesen Testinstanzen entstehen dadurch auch die größten Gaps mit 57,68% (TI25) und 11,51% (TI20). Vernachlässigt man diese Testinstanzen, so ergibt sich ein durchschnittlicher Gap von 0,79%, der unter den durchschnittlichen Gaps der Varianten 2 (2,09%), 3 (2,09%), 4 (1,80%), 6 (21,24%) und 7 (140,83%) liegt. Dies bestätigt die Beobachtungen des kleinen Szenarios, dass Variante 5 die besten Gesamtergebnisse liefert.

Allerdings müssen nicht nur die durchschnittlichen Gaps und Gesamtergebnisse der Varianten mit Antizipation betrachtet werden, sondern auch die zugehörigen durchschnittlichen Rechenzeiten. Hier fällt auf, dass diese mit 43427,17 (Variante 4), 33723,80 (Variante 5), 67258,47 (Variante 6) und 61357,23 Sekunden (Variante 7) erneut deutlich über denen der Varianten ohne Antizipation liegen. Im Fall von Variante 6 liegen die durchschnittlichen Rechenzeiten sogar über dem 389-fachen der durchschnittlichen Rechenzeiten von Variante 2. Diese Steigerung dürfte bei einer erneuten Vergrößerung des Szenarios nochmals zunehmen, weshalb an dieser Stelle ein Abwägen der Vorteile durch ein besseres Gesamtergebnis und Nachteile durch eine gesteigerte Rechenzeit wichtiger als zuvor ist.

Zusammenfassung der Ergebnisse der Testrechnungen

Die Ergebnisse der Testrechnungen des kleinen Szenarios zeigen, dass bei allen Testinstanzen durch die Anwendung von Antizipationsfunktionen ein besseres Gesamtergebnis im Vergleich zu herkömmlichen Koordinationsverfahren, wie der Top-Down Planung und iterativen hierarchischen Planung (Varianten 2 und 3), erreicht wird.

Dabei ist deutlich geworden, dass, im Hinblick auf die Maximierung des Gesamtergebnisses, die Varianten mit explizit approximierter Antizipationsfunktion (Varianten 4 und 5) besser abschneiden, als die Varianten mit teilweise explizit exakter Antizipationsfunktion (Varianten 6 und 7). Als beste Alternative wurde letztlich die kapazitätsmäßig explizit approximierte Antizipationsfunktion (Variante 5) vorgeschlagen, da hier die besten Gesamtergebnisse bei einer durchschnittlich niedrigeren Rechenzeit als bei der mengenmäßig explizit approximierten Antizipationsfunktion (Variante 4) erreicht werden.

Wie ebenfalls zu erkennen ist, führen die eingesetzten Antizipationsfunktionen zu besseren Gesamtergebnissen, aber auch zu höheren Rechenzeiten. Stellt dies im Anwendungsfall ein Problem dar, muss zwischen dem erreichbaren Gesamtergebnis und der Rechenzeit abgewogen werden. Vergleicht man beispielsweise die durchschnittlichen Gaps und Rechenzeiten des kleinen Szenarios der Varianten 2, als Variante mit niedriger Rechenzeit, und Variante 5, als Variante mit bestem Gesamtergebnis, so erreicht man mit Variante 5 eine durchschnittliche Verbesserung des Gaps von 5,62 Prozentpunkten, benötigt mit durchschnittlich 226,2 Sekunden allerdings mehr als das 23-fache an Rechenzeit. Diese deutliche Zunahme der Rechenzeit wird auch durch das große Szenario bestätigt, bei dem die durchschnittliche Rechenzeit von Variante 5 über der 195-fachen durchschnittlichen Rechenzeit von Variante 2 liegt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die in dieser Arbeit entwickelten Antizipationsfunktionen das Gesamtergebnis deutlich verbessern. Die entwickelten Antizipationsfunktionen sind somit für einen Einsatz in der Praxis geeignet. Es muss jedoch zwischen dem Aufwand durch höhere Rechenzeiten und dem Nutzen durch verbesserte Gesamtergebnisse abgewogen werden. Da für die langfristige Standortplanung seltener Planungsdurchläufe ausgeführt werden, kann eine gewisse Erhöhung der Rechenzeit zugunsten besserer Gesamtergebnisse in Kauf genommen werden.

7 Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden neue hierarchische Koordinationsformen auf Basis der HP vorgestellt, die neue Antizipationsfunktionen zur besseren Abschätzung einer untergeordneten Planungsebene beinhalten. Ziel ist die abgestimmte Optimierung beider Planungsebenen zur Verbesserung des Gesamtergebnisses. Durch eine erhöhte Abbildungsgenauigkeit der Prozesse der untergeordneten Planungsebene soll die Bereitstellung und Nutzung der Kapazitäten zudem verbessert werden. Dazu werden auf der übergeordneten Planungsebene die Auswirkungen der getroffenen Entscheidungen auf die untergeordnete Planungsebene mit Hilfe von Antizipationsfunktionen abgeschätzt, um dadurch bessere Lösungen für das gesamte Planungssystem auf der übergeordneten Planungsebene zu bestimmen. Als Anwendungsbeispiel werden die entwickelten hierarchischen Koordinationsformen mit Antizipationsfunktionen auf die Koordination der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung angewandt.

In Kapitel 2 werden die Planungsebenen und -aufgaben im SCM und die Grundlagen der HP erläutert. Neben einer allgemeinen Definition des SCM wird die SCP Matrix vorgestellt und die zugehörigen lang-, mittel- und kurzfristigen Planungsaufgaben näher beschrieben. Anschließend wird besonders auf die langfristige Standortplanung und die mittelfristige Produktionsplanung eingegangen, indem grundlegende Eigenschaften, zu treffende Entscheidungen sowie das Konzept der rollierenden Planung erklärt werden. Zusätzlich werden mathematische Modelle sowohl für die langfristige Standort- als auch für die mittelfristige Produktionsplanung vorgestellt, die im weiteren Verlauf der Arbeit als Basis für die aufgestellten Modelle dienen. Zur Erläuterung des Konzeptes der HP wird die Formalisierung nach Schneeweiß genutzt.

Nach der Klassifikation von hierarchischen Planungssystemen wird die hierarchische Planungsstruktur beschrieben. Diese besteht aus einer Top- und einer Basis-Ebene sowie einer antizipierten Basis-Ebene in der Top-Ebene. Verbunden sind die Top- und Basis-Ebene durch eine Instruktion und eine Reaktion. Für jede Ebene sowie für die Instruktion und Reaktion wird die formale Darstellung nach Schneeweiß vorgestellt. Eine besondere Beachtung findet die Beschreibung der antizipierten Basis-Ebene bzw. Antizipation, die nach Schneeweiß zur Unterscheidung in vier Typen deklariert wird (explizit exakt reaktiv, explizit approximiert reaktiv, implizit reaktiv und nicht-reaktiv). Da ein hierarchisches Planungssystem häufig unterschiedliche Aggregationsniveaus betrachtet, werden Vorgehensweisen zur Aggregation und Disaggregation vorgestellt. Abschließend

wird ein Literaturüberblick über einige Arbeiten gegeben, die sich mit der HP und HPP auseinandersetzen, mit dem Fokus auf bisher existierende Antizipationsfunktionen.

Die Beschreibung von Eigenschaften, mathematischen Modellen und der Koordination der behandelten langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung ist Inhalt des Kapitels 3. Nach der Einordnung der betrachteten langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung in die SCP Matrix werden die Eigenschaften der langfristigen Standortplanung in Form des Planungszeitraumes, der Dimension einer Periode, der Dimension der Produkte, der Dimension der Ressourcen, der Dimension der Kunden, der Entscheidungen, der Restriktionen und der Zielsetzung vorgestellt. Anschließend wird das mathematische Modell der langfristigen Standortplanung aufgestellt. Analog dazu werden die Eigenschaften und das mathematische Modell der mittelfristigen Produktionsplanung erläutert. Zu Vergleichszwecken wird zusätzlich ein Gesamtmodell aufgestellt, das die langfristige Standort- und mittelfristige Produktionsplanung simultan für einen langfristigen Planungszeitraum ausführt.

Im Anschluss werden Punkte aufgezeigt, die die Notwendigkeit einer Koordination der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung belegen. Dies sind beispielsweise unterschiedliche Fristigkeiten der Planungsebenen, Aggregations- und Disaggregationsfehler oder Folgekosten durch Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung auf der untergeordneten Planungsebene aufgrund von Kapazitätsengpässen. Um die Notwendigkeit zusätzlich zu begründen wird das Praxisbeispiel eines Konsumgüterherstellers vorgestellt, bei dessen Standort- und Produktionsplanung Schwachstellen auftreten, die ebenfalls eine Koordination erfordern. Ein Literaturüberblick, die Koordination der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung betreffend, führt zu dem Schluss, dass bislang keine Arbeiten existieren, die eine derartige Koordination betrachten. Folglich werden Voraussetzungen und Anforderungen an eine Koordination der beiden Planungsebenen definiert.

Nachdem die Notwendigkeit und die Anforderungen an eine Koordination dargestellt wurden, wird in Kapitel 4 das Konzept der HP auf die langfristige Standort- und mittelfristige Produktionsplanung übertragen, wobei die Darstellungsform nach Schneeweiß genutzt wird. Für die Top- und Basis-Ebene werden die aufgestellten mathematischen Modelle der langfristigen Standort- bzw. mittelfristigen Produktionsplanung verwendet. Ebenso werden die Instruktion und Reaktion sowie die genauen Verfahren zur Aggregation und Disaggregation für die betrachtete Planungssituation definiert. Die Antizipationsfunktion wird ebenfalls in der Notation nach Schneeweiß dargestellt, aber allgemein definiert, da im Kern der Arbeit mehrere Antizipationsfunktionen entwickelt und eingesetzt werden. Zuletzt werden die Top-Down Planung und die iterative hierarchische Planung als Varianten der hierarchischen Koordination ohne Antizipation und die zugehörigen Algorithmen zum jeweiligen Planungsablauf vorgestellt.

Kapitel 5 stellt mit der Entwicklung neuer hierarchischer Koordinationsformen den Kern der Arbeit dar. Um neue Antizipationsfunktionen zu entwickeln, werden zunächst die zu antizipierenden Bestandteile einer untergeordneten Planungsebene definiert. Die-

se werden als detaillierte Daten, zusätzliche Kapazitätsbedarfe, direkte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung und vor- oder nachgelagerte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung vorgestellt und mit konkreten Beispielen der betrachteten Planungssituation verknüpft. Anschließend werden allgemeine Formulierungen einer explizit approximierten und einer teilweise explizit exakten Antizipationsfunktion präsentiert, die die erwähnten Bestandteile einer untergeordneten Planungsebene abschätzen und in die Planung der übergeordneten Planungsebene einbinden. Zur konkreten Anwendung für die Koordination der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung werden zwei explizit approximierte Antizipationsfunktionen und zwei teilweise explizit exakte Antizipationsfunktionen mit einer und zwei Perioden aufgestellt. Dazu werden Erweiterungen des Modells der Standortplanung sowie spezielle Vorgehensweisen der Aggregation und Disaggregation erläutert. Zudem werden die Planungsabläufe einer iterativen hierarchischen Planung für jede entwickelte Antizipationsfunktion in Form von Algorithmen angegeben.

Das letzte Kapitel 6 beschreibt und analysiert Testrechnungen, die für die neuen hierarchischen Koordinationsformen durchgeführt wurden. Zunächst wird der Testaufbau mit genutzter Rechnerumgebung, den getesteten Varianten sowie den Prämissen und betrachteten Testszenarien, welche aus einem kleinen und einem großen Testszenario bestehen, erläutert. Anschließend wird die Erzeugung der Testdaten für die Nachfrage und Absatzpreise mit Algorithmen genauer beschrieben und der Ablauf der Testrechnungen mit Abbruchkriterien und weiteren Einstellungen dargestellt. Im letzten Abschnitt werden die Ergebnisse der Testrechnungen ausgewertet. Dies geschieht in erster Linie anhand des kleinen Szenarios, da hier für alle Testinstanzen und Varianten optimale Gesamtergebnisse ermittelt werden konnten. Neben durchschnittlichen Werten und Verteilungen der Gaps und Rechenzeiten je Variante werden Wilcoxon Vorzeichen-Rang-Tests für den Variantenvergleich der Gesamtergebnisse und Rechenzeiten angewandt. Es zeigt sich, dass die Varianten mit den entwickelten Antizipationsfunktionen signifikant bessere Gesamtergebnisse liefern als die Varianten ohne Antizipation. Allerdings sind damit höhere Rechenzeiten verbunden, die auch durch die Ergebnisse der Testrechnungen des großen Szenarios belegt werden. Letztendlich ist im Anwendungsfall zwischen dem Aufwand durch zusätzliche Rechenzeiten und dem Nutzen durch bessere Gesamtergebnisse abzuwägen.

7.2 Fazit

Die entwickelten Antizipationsfunktionen verbessern im Zuge einer iterativen hierarchischen Planung im Vergleich zu herkömmlichen Koordinationsverfahren, wie beispielsweise einer Top-Down Planung oder iterativen hierarchischen Planung ohne Antizipation, die Lösungsgüte. Dies wird durch umfangreiche Testrechnungen signifikant belegt.

Zudem erfüllen die aufgestellten Antizipationsfunktionen die formulierten Anforderungen. Sie sind durch die allgemeine Formulierung nicht nur für die Koordination der

langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung einsetzbar, sondern lassen sich auch auf andere Planungssituationen mit unterschiedlichen Aggregationsniveaus und Fristigkeiten übertragen. Ebenso lassen sich die in dieser Arbeit entwickelten Antizipationsfunktionen auf viele Anwendungen in der betrieblichen Praxis anwenden, zumal bestehende kommerzielle Planungssoftware eine derartige Koordination von lang- und mittelfristigen Planungsebenen mit Antizipation bisher nicht vorsieht und sich in dieser Hinsicht für eine Erweiterung anbietet.

Die Ergebnisse der Testrechnungen für die vier entwickelten Antizipationsfunktionen führen zu der Empfehlung, die kapazitätsmäßig explizit approximierten Antizipationsfunktion für die Koordination der langfristigen Standort- und mittelfristigen Produktionsplanung einzusetzen. Sie liefert signifikant die besten Gesamtergebnisse und weist im Vergleich zu den weiteren erstellten Antizipationsfunktionen die geringsten Rechenzeiten auf. Die Rechenzeit liegt allerdings bei allen iterativen hierarchischen Planungen mit Antizipation deutlich über der Rechenzeit der Planungen ohne Antizipation. Die Rechenzeit stellt damit ein Problem dar, das Anlass zur Weiterentwicklung der Antizipationsfunktionen gibt, mit dem Ziel, sie durch Modellumformungen oder andere Maßnahmen zu reduzieren. Im Anwendungsfall müsste folglich abgewogen werden, in welchem Maße eine höhere Rechenzeit akzeptabel ist, wenn dadurch Verbesserungen der Lösungsgüte erreicht werden.

Zusammenfassend wird das grundsätzliche Vorgehen der HP durch die in dieser Arbeit entwickelten Antizipationsfunktionen im Zusammenhang mit der iterativen hierarchischen Planung am Beispiel der bisher kaum untersuchten Koordination der langfristigen Standortplanung und mittelfristigen Produktionsplanung konkretisiert. Das führt zu neuen Erkenntnissen, die als Grundlage für weitere Forschungen dienen können.

7.3 Ausblick

Die entwickelten Antizipationsfunktionen und zugehörigen mathematischen Modelle lassen sich in verschiedene Richtungen erweitern und verbessern. Nachfolgend werden einige Vorschläge vorgestellt.

Übertragung auf andere Planungssituationen

Wie erwähnt, lässt sich die HP mit den aufgestellten Antizipationsfunktionen auch auf andere Planungssituationen bzw. Planungsebenen übertragen. Für zukünftige Forschungen wäre somit zu prüfen, für welche Planungssituationen dies sinnvoll und möglich ist. Ergänzend müsste untersucht werden, ob allgemeine Eigenschaften hinzugefügt werden müssten und welche Anpassungen der Antizipationsfunktionen für eine konkrete Planungssituation notwendig sind.

Verbesserungen der teilweise explizit exakten Antizipationsfunktionen

Für die teilweise explizit exakten Antizipationsfunktionen mit einer bzw. zwei Perioden bieten sich mehrere Verbesserungen und Erweiterungen an. Zum Beispiel könnten weitere Informationen der exakt antizipierten Perioden, wie Rüstzeiten, für die weiteren Perioden übernommen werden, um die Kapazitätsbedarfe noch genauer zu antizipieren. Eine weitere Verbesserung bietet sich für die Wahl der zweiten exakt zu antizipierenden Periode an. Am Ende jeder Iteration könnten die Ergebnisse der Standortplanung auf Strukturveränderung im Planungszeitraum überprüft werden und die Periode, in der eine erhebliche Strukturveränderung stattfindet als zweite exakt zu antizipierenden Periode festgelegt werden.

Verbesserung der Modelle und Lösungsverfahren zur Reduzierung der Rechenzeit

Wie durch die Ergebnisse der Testrechnungen ersichtlich ist, steht den verbesserten Gesamtergebnissen eine enorme Erhöhung der Rechenzeit durch die entwickelten Antizipationsfunktionen gegenüber. Daraus folgt Bedarf zur Verbesserung der Modelle und Lösungsverfahren hinsichtlich einer Reduzierung der Rechenzeit. Dies könnte beispielsweise durch Modellumformungen, Preprocessing-Schritte, Schmittebenen oder Erweiterungen der Algorithmen durch Zwischenberechnungen geschehen. Eine Reduzierung der Rechenzeit durch derartige Maßnahmen würde den Einsatz einer Antizipationsfunktion in der betrieblichen Praxis umso mehr rechtfertigen.

Einbeziehung von Lieferanten

In der betrachteten Planungssituation werden Lieferanten bislang aufgrund der Komplexität nicht beachtet. Eine Einbeziehung dieser würde die SC insgesamt genauer abbilden als die bisherige Sichtweise der Standort- und Produktionsplanung. Somit wären in der Standortplanung beispielsweise die Lieferantenwahl zu treffen und die aggregierte Liefermenge festzulegen, wodurch auch die Wahl der Standorte beeinflusst würde. Die mittelfristige Produktionsplanung müsste detaillierte Bedarfe und Liefermengen bestimmen. Die damit zusammenhängenden Kosten wären auch für die Antizipationsfunktion interessant, da die Kosten mit der Lieferantenwahl in der Standortplanung zusammenhängen.

Berücksichtigung mehrerer Maschinen oder Produktionslinien

Bislang bezieht sich die Kapazität jeweils auf eine Engpassmaschine. Dies könnte durch die Betrachtung mehrerer Maschinen oder Produktionslinien erweitert werden. So könnten in der Standortplanung neben Produkt-Werk-Allokationen auch Produkt-Linien-Allokationen je Standort entstehen, die in den Rüst- und Produktionsentscheidungen der mittelfristigen Produktionsplanung berücksichtigt werden müssen. Eine zusätzliche Erweiterung bezüglich der Rüstentscheidungen in der mittelfristigen Produktionsplanung könnte das Einbeziehen von reihenfolgeabhängigem Rüsten sein, das auch von den

zuvor getroffenen Allokationen abhängig ist und somit in der übergeordneten Planungsebene antizipiert werden kann.

Erweiterungen für zusätzlichen Praxisbezug

Es könnten auch Lebenszyklusmodelle für Produkte in der langfristigen Nachfrage eingesetzt werden, die die Nachfrage über einen langfristigen Zeitraum abbilden und dabei die entsprechenden Phasen des Lebenszyklus eines Produktes beachten. Im vorgestellten Modell der Standortplanung werden zur Vereinfachung keine Restwerte in der Zielfunktion berücksichtigt und keine Budgetrestriktionen eingesetzt. Beim Einsatz in der betrieblichen Praxis könnten derartige Erweiterungen zusätzlich eingefügt werden.

Verknüpfung von mathematischen Dekompositionsverfahren und der hierarchischen Planung mit Antizipationsfunktion

Um die positiven Erkenntnisse der entwickelten Antizipationsfunktionen auch für andere Lösungsverfahren zu nutzen, wäre eine Verknüpfung von mathematischen Dekompositionsverfahren, wie dem Dantzig-Wolfe Dekompositionsverfahren, und der HP mit Antizipationsfunktion denkbar. Mit einer Kombination beider Verfahren könnten die jeweiligen Vorzüge verbunden werden. Eine Verknüpfung zwischen der HP und Dekompositionsverfahren bietet sich dadurch an, dass durch Master- und Subprobleme im Dekompositionsverfahren ebenfalls hierarchische Planungsebenen bestehen, die miteinander koordiniert werden müssen. Um die Koordination beider Planungsebenen zu verbessern, könnten neben den ausgetauschten Dualwerten des Dekompositionsverfahrens, primale Daten, wie Instruktion und Reaktion, übergeben werden. Zusätzlich würde im Masterproblem bzw. der Top-Ebene eine Antizipationsfunktion eingesetzt, um die Auswirkungen der Entscheidungen auf die Basis-Ebene bzw. das Subproblem abzuschätzen.

Literaturverzeichnis

- Albey, Erinc und Bilge, Ümit (2011). *A hierarchical approach to FMS planning and control with simulation-based capacity anticipation. International Journal of Production Research*, 49(11): S. 3319–3342
- Arntzen, Bruce C.; Brown, Gerald G.; Harrison, Terry P. und Trafton, Linda L. (1995). *Global supply chain management at Digital Equipment Corporation. Interfaces*, 25(1): S. 69–93
- Axsäter, Sven (1979). *On the design of the aggregate model in a hierarchical production planning system. Engineering and Process Economics*, 4: S. 89–97
- Axsäter, Sven (1981). *Aggregation of Product Data for Hierarchical Production Planning. Operations Research*, 29(4): S. 744–756
- Axsäter, Sven und Jönsson, Henrik (1984). *Aggregation and disaggregation in hierarchical production planning. European Journal of Operational Research*, 17: S. 338–350
- Axsäter, Sven; Jönsson, Henrik und Thorstenson, Anders (1983). *Approximate Aggregation of Product Data. Engineering Costs and Production Economics*, 7: S. 119–126
- Betge, David (2006). *Koordination in Advanced Planning und Scheduling-Systemen. Deutscher Univ.-Verl, Wiesbaden, 1. Auflage*
- Betge, David und Leisten, Rainer (2005). *Koordinationsansatz für ausgewählte Module von Advanced Planning and Scheduling-Systemen. Supply Chain Management und Logistik*, S. 41–68
- Bihlmaier, Ralf; Koberstein, Achim und Obst, René (2009). *Modeling and optimizing of strategic and tactical production planning in the automotive industry under uncertainty. OR Spectrum*, 31(2): S. 311–336
- Bitran, Gabriel R.; Haas, Elizabeth A. und Hax, Arnaldo C. (1981). *Hierarchical Production Planning: A Single Stage System. Operations Research*, 29(4): S. 717–743
- Bitran, Gabriel R.; Haas, Elizabeth A. und Hax, Arnaldo C. (1982). *Hierarchical Production Planning: A Two-Stage System. Operations Research*, 30(2): S. 232–251

- Bitran, Gabriel R. und Hax, Arnaldo C. (1977). *On the design of hierarchical production planning systems. Decision Sciences*, 8(1): S. 28–55
- Boysen, Nils; Flidner, Malte und Scholl, Armin (2007). *Produktionsplanung bei Variantenfließfertigung: Planungshierarchie und Elemente einer Hierarchischen Planung. Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, 77(7/8): S. 759–793
- Bundschuh, Markus (2008). *Modellgestützte strategische Planung von Produktionssystemen in der Automobilindustrie: Ein flexibler Planungsansatz für die Fahrzeughauptmodule Motor, Fahrwerk und Antriebsstrang*, Band 57 von *Schriftenreihe strategisches Management*. Kovač, Hamburg
- Carravilla, Maria Antonia und de Sousa, Jorge Pinho (1995). *Hierarchical production planning in a Make-To-Order company: A case study. European Journal of Operational Research*, 86: S. 43–56
- Chardaire, Pierre; Sutter, Alain und Costa, Marie-Christine (1996). *Solving the dynamic facility location problem. Networks*, 28: S. 117–124
- Christopher, Martin (2011). *Logistics and supply chain management: Creating value-adding networks*. Pearson, Harlow, 4. Auflage
- Christou, I.T; Lagodimos, A.G und Lycopoulou, D. (2007). *Hierarchical production planning for multi-product lines in the beverage industry. Production Planning & Control*, 18(5): S. 367–376
- Daskin, Mark S.; Hopp, Wallace J. und Medina, Benjamin (1992). *Forecast Horizons And Dynamic Facility Location Planning. Annals of Operations Research*, 40: S. 125–151
- De Kok, A. G. (1990). *Hierarchical production planning for consumer goods. European Journal of Operational Research*, 45: S. 55–69
- Dempster, M. A. H.; Fisher, M. L.; Jansen, L.; Lageweg, B. J.; Lenstra, J. K. und Rinnooy Kan, A. H. G. (1981). *Analytical Evaluation of Hierarchical Planning Systems. Operations Research*, 29(4): S. 707–716
- Domschke, Wolfgang und Drexl, Andreas (1996). *Logistik: Standorte. - 4., überarb. und erw. Aufl. - 1996. - XII, 276 S: Graph. Darst.* Oldenbourg, München [u.a.]
- Domschke, Wolfgang und Scholl, Armin (2008). *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre: Eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht*. Springer, Berlin [u.a.], 4. Auflage
- Dürksen, Dietrich (2011). *Ein Vier-Ebenen-Ansatz für die Planung unternehmensinterner Produktionsnetzwerke: Hierarchische Dimensionierung*. Universität Paderborn

-
- Ebadian, M.; Rabbani, M.; Torabi, S.A und Jolai, F. (2009). *Hierarchical production planning and scheduling in make-to-order environments: reaching short and reliable delivery dates. International Journal of Production Research*, 47(20): S. 5761–5789
- Eichin, Rüdiger und Schneeweiß, Christoph (2001). *Determining Depreciations as a two-stage Problem. Schmalenbach Business Review*, 53: S. 66–81
- Erlenkotter, Donald (1981). *A comparative study of approaches to dynamic location problems. European Journal of Operational Research*, 6: S. 133–143
- Erromdhani, Ridha; Eddaly, Mansour und Rebai, Abdelwaheb (2012). *Hierarchical production planning with flexibility in agroalimentary environment: a case study. Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(3): S. 811–819
- Fahrmeir, Ludwig; Künstler, Rita; Pigeot, Iris und Tutz, Gerhard (2011). *Statistik: Der Weg zur Datenanalyse. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin [u.a.]*, 7. Auflage
- Fleischmann, Bernhard; Ferber, Sonja und Henrich, Peter (2006). *Strategic Planning of BMW's Global Production Network. Interfaces*, 36(3): S. 194–208
- Fleischmann, Bernhard und Koberstein, Achim (2014). *Strategic Network Design. In: Stadtler, Hartmut; Kilger, Christoph und Meyr, Herbert (Hg.), Supply Chain Management and Advanced Planning: Concepts, Models, Software and Case Studies. Springer, Berlin [u.a.]*, 5. Auflage, wird veröffentlicht in 2014
- Fleischmann, Bernhard; Meyr, Herbert und Wagner, Michael (2010). *Advanced Planning. In: Stadtler, Hartmut; Kilger, Christoph und Meyr, Herbert (Hg.), Supply Chain Management and Advanced Planning: Konzepte, Modelle und Software*, S. 89–122. Springer, Berlin [u.a.]
- Funaki, Kenichi (2009). *State of the Art Survey of Commercial Software for Supply Chain Design*
- Gebhard, Marina (2009). *Hierarchische Produktionsplanung bei Unsicherheit. Gabler, Wiesbaden*
- Gneiting, Philipp Robert (2009). *Supply Chain Design für modulare Fahrzeugarchitekturen. ETH, Zürich*
- Goetschalckx, Marc und Fleischmann, Bernhard (2010). *Strategic Network Design. In: Stadtler, Hartmut; Kilger, Christoph und Meyr, Herbert (Hg.), Supply Chain Management and Advanced Planning: Konzepte, Modelle und Software*, S. 135–152. Springer, Berlin [u.a.]
- Graves, Stephen C. (1982). *Using Lagrangean Techniques to Solve Hierarchical Production Planning Problems. Management Science*, 28(3): S. 260–275

- Günther, Hans-Otto und Tempelmeier, Horst (2012). *Produktion und Logistik*. Springer-Verlag, Berlin [u.a.], 9. Auflage
- Hax, Arnaldo C. und Meal, Harlan C. (1975). *Hierarchical integration of production planning and scheduling*. *Logistics: TIMS Studies in Management Science*, 1: S. 53–69
- Jansen, Michiel M.; De Kok, Ton G. und Fransoo, Jan C. (2013). *Lead time anticipation in Supply Chain Operations Planning*. *OR Spectrum*, 35(1): S. 251–290
- Jordan, William C. und Graves, Stephen C. (1995). *Principles on the benefits of manufacturing process flexibility*. *Management Science*, 41(4): S. 577–594
- Jörnsten, Kurt und Leisten, Rainer (1990). *Aggregation and decomposition for multi-divisional linear programs*. Univ., Wirtschaftswiss. Fak., Heidelberg
- Jörnsten, Kurt und Leisten, Rainer (1995). *Decomposition and iterative aggregation in hierarchical and decentralised planning structures*. *European Journal of Operational Research*, 86: S. 120–141
- Jörnsten, Kurt; Leisten, Rainer und Storoy, Sverre (1999). *Convergence aspects of adaptive clustering in variable aggregation*. *Computers & Operations Research*, 26: S. 955–966
- Kauder, Saskia (2008). *Strategische Planung internationaler Produktionsnetzwerke in der Automobilindustrie*. Wirtschaftsuniversität Wien
- Kauder, Saskia und Meyr, Herbert (2009). *Strategic network planning for an international automotive manufacturer*. *OR Spectrum*, 31(3): S. 507–532
- Kelly, David L. und Marucheck, Ann S. (1984). *Planning Horizon Results For the Dynamic Warehouse Location Problem*. *Journal of Operations Management*, 4(3): S. 279–294
- Kistner, Klaus-Peter und Steven, Marion (1991). *Die Bedeutung des Operations Research für die hierarchische Produktionsplanung*. *OR Spectrum*, 13: S. 123–132
- Kistner, Klaus-Peter und Steven, Marion (2001). *Produktionsplanung: Mit 33 Tabellen*. Physica-Lehrbuch. Physica-Verl., Heidelberg, 3. Auflage
- Kohler, Klaus (2008). *Global Supply-Chain-Design: Konzeption und Implementierung eines multikriteriellen Optimierungsmodells für die Gestaltung globaler Wertschöpfungsaktivitäten*. CfSM, Estenfeld
- Kremer, Mirko; Schneeweiß, Christoph und Zimmermann, Michael (2006). *On the validity of aggregate models in designing supply chain contracts*. *International Journal of Production Economics*, 103(2): S. 656–666

- Lario Esteban, F. C.; Vicens Salort, E. und Ros McDonnell, L. (1994). *Application of an MRP matrix-based hierarchical planning model to a furniture company. Production Planning & Control*, 5(6): S. 562–574
- Leisten, Rainer (1996). *Iterative Aggregation und mehrstufige Entscheidungsmodelle: Einordnung in den planerischen Kontext, Analyse anhand der Modelle der Linearen Programmierung und Darstellung am Anwendungsbeispiel der Hierarchischen Produktionsplanung*. Physica, Heidelberg
- Leisten, Rainer (1997). *A Posteriori Error Bounds In Linear Programming Aggregation. Computers & Operations Research*, 24(1): S. 1–16
- Lim, S-K und Kim, Y-D (1999). *An Integrated Approach to Dynamic Plant Location and Capacity Planning. The Journal of the Operational Research Society*, 50(12): S. 1205–1216
- Manzini, Riccardo und Gebennini, Elisa (2008). *Optimization models for the dynamic facility location and allocation problem. International Journal of Production Research*, 46(8): S. 2061–2086
- Melo, M.T; Nickel, S. und Saldanha da Gama, F. (2006). *Dynamic multi-commodity capacitated facility location: a mathematical modeling framework for strategic supply chain planning. Computers & Operations Research*, 33(1): S. 181–208
- Melo, M.T; Nickel, S. und Saldanha da Gama, F. (2009). *Facility location and supply chain management – A review. European Journal of Operational Research*, 196(2): S. 401–412
- Neumann, Klaus (1996). *Produktions- und Operations-Management*. Springer, Berlin [u.a.]
- Omar, M. K. und Bennell, J.A (2009). *Revising the master production schedule in a HPP framework context. International Journal of Production Research*, 47(20): S. 5857–5878
- Omar, M. K. und Teo, S. C. (2007). *Hierarchical production planning and scheduling in a multi-product, batch process environment. International Journal of Production Research*, 45(5): S. 1029–1047
- Ortiz-Araya, Virna und Albornoz, Victor M. (2012). *Hierarchical Planning Methodology for a Supply Chain Management. Informatica Economica*, 16(2): S. 14–18
- Owen, Susan Hesse und Daskin, Mark S. (1998). *Strategic facility location: A review. European Journal of Operational Research*, 111: S. 423–447

- Rogers, David F.; Plante, Robert D.; Wong, Richard T. und Evans, James R. (1991). *Aggregation and disaggregation techniques and methodology in optimization*. *Operations Research*, 39(4): S. 553–582
- Rohde, Jens (2004). *Hierarchical supply chain planning using artificial neural networks to anticipate base-level outcomes*. *OR Spectrum*, 26(4): S. 471–492
- Rohde, Jens; Meyr, Herbert und Wagner, Michael (2000). *Die Supply Chain Planning Matrix*. *PPS Management*, 5(1): S. 10–15
- Rohde, Jens und Wagner, Michael (2010). *Master Planning*. In: Stadler, Hartmut; Kilger, Christoph und Meyr, Herbert (Hg.), *Supply Chain Management und Advanced Planning: Konzepte, Modelle und Software*, S. 185–205. Springer, Berlin [u.a.]
- Sabri, Ehap H. und Beamon, Benita M. (2000). *A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design*. *OMEGA The International Journal of Management Science*, 28(5): S. 581–598
- Schlittgen, Rainer (2012). *Einführung in die Statistik: Analyse und Modellierung von Daten*. Lehr- und Handbücher der Statistik. Oldenbourg, München, 12. Auflage
- Schneeweiß, Christoph (1994). *Elemente einer Theorie hierarchischer Planung*. *OR Spectrum*, 16: S. 161–168
- Schneeweiß, Christoph (1995). *Hierarchical structures in organisations: A conceptual framework*. *European Journal of Operational Research*, 86: S. 4–31
- Schneeweiß, Christoph (1998). *Hierarchical planning in organizations: Elements of a general theory*. *International Journal of Production Economics*, 56-57: S. 547–556
- Schneeweiß, Christoph (2002). *Einführung in die Produktionswirtschaft*. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin, 8. Auflage
- Schneeweiß, Christoph (2003a). *Distributed decision making - a unified approach*. *European Journal of Operational Research*, 150(2): S. 237–252
- Schneeweiß, Christoph (2003b). *Distributed decision making: With 13 tables*. Springer, Berlin [u.a.], 2. Auflage
- Schneeweiß, Christoph und Schröder, Helmut (1992). *Planning and scheduling the repair shops of the Deutsche Lufthansa AG: A hierarchical approach*. *Production and Operations Management*, 1(1): S. 22–33
- Schneeweiß, Christoph und Zimmer, Kirstin (2004). *Hierarchical coordination mechanisms within the supply chain*. *European Journal of Operational Research*, 153(3): S. 687–703

- Sharkey, Thomas C.; Geunes, Joseph; Edwin Romeijn, H. und Shen, Zuo-Jun Max (2011). *Exact algorithms for integrated facility location and production planning problems*. *Naval Research Logistics (NRL)*, 58(5): S. 419–436
- Simchi-Levi, David; Kaminsky, Philip und Simchi-Levi, Edith (2008). *Designing and managing the supply chain: Concepts, strategies, and case studies*. McGraw-Hill/Irwin series operations and decision sciences. McGraw-Hill/Irwin, Boston, 3. Auflage
- Söhner, Volkmar und Schneeweiß, Christoph (1995). *Hierarchically integrated lot size optimization*. *European Journal of Operational Research*, 86: S. 73–90
- Stadtler, Hartmut (1988). *Hierarchische Produktionsplanung bei losweiser Fertigung*. Physica-Verlag, Heidelberg
- Stadtler, Hartmut (2010). *Supply Chain Management - Ein Überblick*. In: Stadtler, Hartmut; Kilger, Christoph und Meyr, Herbert (Hg.), *Supply Chain Management und Advanced Planning: Konzepte, Modelle und Software*, S. 7–37. Springer, Berlin [u.a.]
- Stadtler, Hartmut und Fleischmann, Bernhard (2012). *Hierarchical Planning and the Supply Chain Planning Matrix*. In: Stadtler, Hartmut; Fleischmann, Bernhard; Grunow, Martin; Meyr, Herbert und Sürie, Christopher (Hg.), *Advanced planning in supply chains*, S. 21–34. Springer-Verlag, Heidelberg [u.a.]
- Stadtler, Hartmut; Fleischmann, Bernhard; Grunow, Martin; Meyr, Herbert und Sürie, Christopher (Hg.) (2012). *Advanced planning in supply chains: Illustrating the concepts using an SAP® APO case study*. Springer-Verlag, Heidelberg [u.a.]
- Steven, Marion (1994). *Hierarchische Produktionsplanung*. Physica-Verlag, Heidelberg, 2. Auflage
- Switalski, Marion (1988). *Hierarchische Produktionsplanung und Aggregation*. *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, 58(3): S. 381–396
- Thanh, Phuong Nga; Bostel, Nathalie und Péton, Olivier (2008). *A dynamic model for facility location in the design of complex supply chains*. *International Journal of Production Economics*, 113(2): S. 678–693
- Tiede, Manfred und Voß, Werner (2000). *Schließen mit Statistik - Verstehen: Buch mit CD-ROM*. Oldenbourgs Lehr- und Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. Oldenbourg, München [u.a.]
- Timm, Thorsten (2008). *Ein Verfahren zur hierarchischen Struktur-, Dimensions- und Materialbedarfsplanung von Fertigungssystemen*. Universität Paderborn

- Timm, Thorsten und Blecken, Alexander (2011). *A method for the hierarchical planning of the structure, dimension and material requirements of manufacturing systems. International Journal of Production Research*, 49(12): S. 3431–3453
- Torres-Soto, Joaquin E. und Üster, Halit (2011). *Dynamic-demand capacitated facility location problems with and without relocation. International Journal of Production Research*, 49(13): S. 3979–4005
- Volling, Thomas (2009). *Auftragsbezogene Planung bei variantenreicher Serienproduktion: Eine Untersuchung mit Fallstudien aus der Automobilindustrie*. Gabler, Wiesbaden
- Wesolowsky, George O. (1973). *Dynamic Facility Location. Management Science*, 19(11): S. 1241–1248
- Wesolowsky, George O. und Truscott, William G. (1975). *The Multiperiod Location-Allocation Problem with Relocation of Facilities. Management Science*, 22(1): S. 57–65
- Wilhelm, Wilbert; Liang, Dong; Rao, Brijesh; Warriar, Deepak; Zhu, Xiaoyan und Bulusu, Sharath (2005). *Design of international assembly systems and their supply chains under NAFTA. Transportation research. Part E, Logistics and transportation review.*, 41: S. 467–493
- Wittek, Kai (2013). *Standortübergreifende Programmplanung in flexiblen Produktionsnetzwerken der Automobilindustrie*. Springer Gabler, [S.1.]
- Wittek, Kai; Volling, Thomas; Spengler, Thomas S. und Gundlach, Friedrich-Wilhelm (2010). *Tactical Planning in Flexible Production Networks in the Automotive Industry. Operations Research Proceedings*, S. 429–434
- Zäpfel, Günther und Mitter, Julia (2010). *Hierarchische Planung für industrielle Logistikdienstleister. Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, 80(12): S. 1277–1304
- Zimmer, Kirstin (2001). *Koordination im Supply Chain Management: Ein hierarchischer Ansatz zur Steuerung der unternehmensübergreifenden Planung*. Dt. Univ.-Verl. [u.a.], Wiesbaden, 1. Auflage
- Zipkin, Paul Herbert (1978). *Bounds on the effect of aggregating variables in linear programs*. Columbia University, Graduate School of Business, New York

A Anhang

A.1 Erzeugung der Testdaten

Bestimmung der Mengen und Daten

Daten	Beschreibung	Berechnung
<i>G</i>	Menge der geografischen Standorte	Vorgabe durch Szenario
<i>I</i>	Menge der Produkte	Vorgabe durch Szenario
<i>K</i>	Menge der Märkte	Vorgabe durch Szenario
<i>M</i>	Planungshorizont der Produktionsplanung	Vorgabe durch Szenario
<i>P</i>	Menge der Produktgruppen	Vorgabe durch Szenario
<i>S</i>	Menge der Standorte / Standortkonfigurationen	Vorgabe durch Szenario
<i>T</i>	Planungshorizont der Standortplanung	Vorgabe durch Szenario

Tabelle A.1: Bestimmung der Mengen

Daten	Beschreibung	Berechnung
a_{sp}^{TM}	Produktionskoeffizient für Produktgruppe p an Standort s	Aggregation von a_{si}^{BM}
a_{si}^{BM}	Produktionskoeffizient für Produkt i an Standort s	Konstanter Wert für alle Standorte s und Produkte i
$B_{ski,m=0}^{BM}$ bzw. $B_{skit,m=0}^{BM}$	Backordermenge von Produkt i am Standort s für Markt k in Periode $m = 0$ bzw. Periode $m = 0$ und Periode t	Gleichverteilte Zufallszahl zwischen Minimum und Maximum in Abhängigkeit von $YP_{sp,t=0}^{TM}$
cb_{ki}^{BM}	Kosten für Backordermenge von Markt k für Produkt i	Konstanter Wert für alle Märkte k und Produkte i
cd_{ski}^{BM}	Transportkosten von Standort s zu Markt k für Produkt i	Konstanter Wert für kürzeste Entfernung zwischen zwei geografischen Standorten. Kunden werden geografischen Standorten zugeordnet. Je weiter die geografischen Standorte von Standort s und Kunde k entfernt sind, desto größer werden die Kosten, z.B. Entfernung zwischen G1 und G3 entspricht $(3 - 1) + 1 = 3$ und führt somit zu Kosten vom dreifachen konstanten Wert
cl_{si}^{BM}	Lagerkostensatz von Produkt i an Standort s	Konstanter Wert für alle Standorte s und Produkte i
cls_{ki}^{BM}	Kosten für Lost Sales von Markt k für Produkt i	Konstanter Wert für alle Märkte k und Produkte i
cr_{si}^{BM}	Rüstkosten für Produkt i an Standort s	Konstanter Wert für alle Standorte s und Produkte i
crp_s^{BM}	Kosten je Rüstübergang zwischen Produktgruppen an Standort s	Gleichverteilte Zufallszahl zwischen Minimum und Maximum je Standort s
ct_{sri}^{BM}	Transportkosten von Standort s zu Standort r für Produkt i	Konstanter Wert für alle Standorte s, r und Produkte i

Tabelle A.2: Bestimmung der Daten - Teil 1

Daten	Beschreibung	Berechnung
cx_{skp}^{TM}	Produktions- und Transportkosten für Absatzmenge von Standort s zu Markt k für Produktgruppe p	Aggregation von cd_{ski}^{BM} und cx_{si}^{BM}
cx_{si}^{BM}	Produktionskosten an Standort s für Produkt i	Konstanter Wert für alle Standorte s und Produkte i
cy_s^{TM}	Fixe Kosten für Standort s	Minimum und Maximum werden für alle Standortkonfigurationen vorgegeben. Linearer Anstieg von der kleinsten Konfiguration (z.B. S1 = Minimum) bis zur größten Konfiguration (z.B. S3 = Maximum, dann wäre S2 = (Min + Max)/2)
cyg_g^{TM}	Öffnungskosten für geografischen Standort g	Gleichverteilte Zufallszahl zwischen Minimum und Maximum je geografischem Standort g
cyo_s^{TM}	Öffnungskosten für Standort s	Minimum und Maximum werden für alle Standortkonfigurationen vorgegeben. Linearer Anstieg von der kleinsten Konfiguration (z.B. S1 = Minimum) bis zur größten Konfiguration (z.B. S3 = Maximum, dann wäre S2 = (Min + Max)/2)
cys_s^{TM}	Schließungskosten für Standort s	Minimum und Maximum werden für alle Standortkonfigurationen vorgegeben. Linearer Anstieg von der kleinsten Konfiguration (z.B. S1 = Minimum) bis zur größten Konfiguration (z.B. S3 = Maximum, dann wäre S2 = (Min + Max)/2)
cz_s^{BM}	Kosten für Zusatzkapazitäten an Standort s	Gleichverteilte Zufallszahl zwischen Minimum und Maximum je Standort s
d_{kpt}^{TM}	Nachfrage von Markt k für Produktgruppe p in Periode t	Aggregation von d_{kitm}^{BM}

Tabelle A.3: Bestimmung der Daten - Teil 2

Daten	Beschreibung	Berechnung
d_{kim}^{BM} bzw. d_{kitm}^{BM}	Nachfrage von Markt k für Produkt i in Periode m bzw. Periode m und Periode t	Gleichverteilte Zufallszahl zwischen Minimum und Maximum je Produkt i . Zufallszahl wird Mittelwert der Normalverteilung des Produktes i . Zugehörige Standardabweichung berechnet durch Division des Mittelwertes durch einen konstanten Wert. Gleichverteilte Zufallszahl zwischen 0 und 1 je Markt k und Produkt i für mittelfristige Schwankungen. Ist die Zufallszahl kleiner oder gleich 0,5 wird relativ konstante Nachfrage angenommen, die eine Zufallszahl aus der gegebenen Normalverteilung zieht. Ist die Zufallszahl größer als 0,5 wird eine saisonale Nachfrage angenommen. Die Zufallszahl aus der gegebenen Normalverteilung wird für die Monate 1 bis 3 und 10 bis 12 mit 0,8, für die Monate 4 und 5 sowie 8 und 9 mit 1,15 und für die Monate 6 und 7 mit 1,3 multipliziert. Gleichverteilte Zufallszahl zwischen 0 und 2 je Markt k und Produkt i für langfristigen Trend. Nachfrage zu Beginn der Planung wird als 100% angenommen. Zufallszahl entspricht dem Prozentsatz, der am Ende des Planungszeitraumes vorliegt. 0 führt zu 0% und 2 zu 200%. Um Prozentsatz am Ende des Planungszeitraumes zu erreichen, wird ein linearer Verlauf des Trends über den gesamten Planungszeitraum angenommen. Beim Beispiel 0 und einem Planungszeitraum von 10 Jahren würde der Trend jedes Jahr um 10% verringert. Diese Trendzahl wird jedes Jahr mit den zuvor erhaltenen Monatsnachfragen multipliziert.

Tabelle A.4: Bestimmung der Daten - Teil 3

Daten	Beschreibung	Berechnung
$dmin_{kp}^{TM}$	Prozentualer Mindestanteil der zu liefernden, langfristigen Nachfrage für Markt k für Produktgruppe p	Aggregation von $dmin_{ki}^{BM}$
$dmin_{ki}^{BM}$	Prozentualer Mindestanteil der zu liefernden, mittelfristigen Nachfrage für Markt k für Produkt i	Gleichverteilte Zufallszahl zwischen Minimum und Maximum je Markt k und Produkt i
k_s^{TM}	Jährliche Kapazität von Standort s	Aggregation von k_s^{BM}
k_s^{BM}	Monatliche Kapazität von Standort s	Minimum und Maximum werden für alle Standortkonfigurationen vorgegeben. Linearer Anstieg von der kleinsten Konfiguration (z.B. S1 = Minimum) bis zur größten Konfiguration (z.B. S3 = Maximum, dann wäre S2 = (Min + Max)/2)
ko_{st}^{TM}	Reduktion des Kapazitätsanteils, wenn 100%ige Verfügbarkeit noch t Perioden am Standort s benötigt $t = 1 \dots \tau_s^{TM}$	Linearer Anstieg je nach Dauer der Öffnung bzw. τ_s^{TM} (z.B. bei 3 Perioden: t1=0,25, t2=0,5, t3=0,75)
kp_{sp}^{TM}	Kapazität von Standort s für Produktgruppe p ($0 \dots k_s^{TM}$)	Aggregation von kp_{sp}^{BM}
kp_{sp}^{BM}	Kapazität von Standort s für Produktgruppe p ($0 \dots k_s^{BM}$)	Minimum und Maximum werden für alle Standortkonfigurationen vorgegeben. Linearer Anstieg von der kleinsten Konfiguration (z.B. S1 = Minimum) bis zur größten Konfiguration (z.B. S3 = Maximum, dann wäre S2 = (Min + Max)/2)
$L_{si,m=0}^{BM}$ bzw. $L_{sit,m=0}^{BM}$	Lageranfangsbestand von Produkt i an Standort s in Periode $m = 0$ bzw. Periode $m = 0$ und Periode t	Gleichverteilte Zufallszahl zwischen Minimum und Maximum in Abhängigkeit von $YP_{sp,t=0}^{TM}$

Tabelle A.5: Bestimmung der Daten - Teil 4

Daten	Beschreibung	Berechnung
$lmax_s^{BM}$	Maximaler Lagerbestand an Standort s	Anteil von k_s^{BM}
M^{BM}	Hinreichend große Zahl	Konstanter Wert
p_{kp}^{TM}	Absatzpreis auf Markt k für Produktgruppe p	Aggregation von p_{ki}^{BM}
p_{ki}^{BM}	Absatzpreis auf Markt k für Produkt i	Gleichverteilte Zufallszahl zwischen Minimum und Maximum je Produktgruppe als Produktgruppenwert. Je Produkt i wird Normalverteilung erstellt, die als Mittelwert einen konstanten Mittelwert mit dem zugehörigen Produktgruppenwert multipliziert. Die Standardabweichung ergibt sich durch die Division des zuvor berechneten Mittelwertes durch einen konstanten Wert. Absatzpreis wird je Markt k und Produkt i aus Normalverteilung gezogen. Untere und obere Schranke des Absatzpreises ergeben sich durch Multiplikation von Minimum bzw. Maximum des Produktgruppenwertes mit konstantem Mittelwert der Normalverteilung.
ra_{si}^{BM}	Rüstzeit von Produkt i an Standort s	Konstanter Wert für alle Standorte s und Produkte i
rap_s^{BM}	Rüstzeit je Rüstübergang zwischen Produktgruppen an Standort s	Gleichverteilte Zufallszahl zwischen Minimum und Maximum je Standort s
$Y_{s,t=0}^{TM}$	Bestehende Standorte s in Periode $t = 0$	Binäre Zufallszahl je Standort s
$Y_{sp,t=0}^{PTM}$	Bestehende Produkt-Werk-Allokationen von Produktgruppe p an Standort s in Periode $t = 0$	Binäre Zufallszahl in Abhängigkeit von $Y_{s,t=0}^{TM}$

Tabelle A.6: Bestimmung der Daten - Teil 5

Daten	Beschreibung	Berechnung
$yo_start_{st}^{TM}$	1, wenn Standort s in der Vergangenheit in Periode t geöffnet wurde; 0, sonst ($-\tau_s^{TM} + 1 \leq t \leq 0$)	Binäre Zufallszahl in Abhängigkeit von $Y_{s,t=0}^{TM}$
$yp_start_{spt}^{TM}$	1, wenn Produkt-Werk-Allokation von Produktgruppe p an Standort s zu Beginn der Periode t aufgegeben werden darf; 0, sonst ($t = 1 \dots \mu^{TM}$)	Binäre Zufallszahl in Abhängigkeit von $Y_{sp,t=0}^{TM}$ und $yo_start_{st}^{TM}$
z	Kapitalzinssatz	Gleichverteilte Zufallszahl zwischen Minimum und Maximum
$zmax_s^{BM}$	Maximale Zusatzkapazitäten an Standort s	Anteil von k_s^{BM}
δ^{TM}	Minstdauer einer Standortöffnung	Gleichverteilte Zufallszahl zwischen Minimum und Maximum
μ^{TM}	Minstdauer einer Produkt-Werk-Allokation	Gleichverteilte Zufallszahl zwischen Minimum und Maximum
τ_s^{TM}	Dauer bis Standortöffnung von s komplett vollzogen	Minimum und Maximum werden für alle Standortkonfigurationen vorgegeben. Linearer Anstieg von der kleinsten Konfiguration (z.B. S1 = Minimum) bis zur größten Konfiguration (z.B. S3 = Maximum, dann wäre S2 = (Min + Max)/2)
π^{BM}	Anteil der Backordermenge, der nach einer Periode als Lost Sales auftritt	Gleichverteilte Zufallszahl zwischen Minimum und Maximum
$y_start_{st}^{TM}$	1, wenn Standort s zu Beginn der Periode t geschlossen werden darf; 0, sonst ($t = 1 \dots \delta^{TM}$)	Abhängig von $yo_start_{st}^{TM}$

Tabelle A.7: Bestimmung der Daten - Teil 6

A.2 Einstellungen der Testszenarien

A.2.1 Kleines Szenario

Bestimmung der Mengen und Daten im kleinen Szenario

Daten	Beschreibung	Vorgabe
G	Menge der geografischen Standorte	4
I	Menge der Produkte	4
K	Menge der Märkte	8
M	Planungshorizont der Produktionsplanung	12
P	Menge der Produktgruppen	2
S	Menge der Standorte / Standortkonfigurationen	8 (2 Standortkonfigurationen je geo. Standort)
T	Planungshorizont der Standortplanung	10

Tabelle A.8: Bestimmung der Dimensionen im kleinen Szenario

Modell	Anzahl Nebenbedin- gungen	Anzahl reellwertiger Variablen	Anzahl binärer Variablen
Mittelfristige Produktionsplanung	19936	14304	576
Langfristige Standortplanung	2832	1824	464
Langfristige Standortplanung mit Antizipationsfunktion ExApMe	62992	68704	2384
Langfristige Standortplanung mit Antizipationsfunktion ExApKa	26992	19264	2384
Langfristige Standortplanung mit Antizipationsfunktion ExEx1	22672	15936	1040
Langfristige Standortplanung mit Antizipationsfunktion ExEx2	42512	30048	1616
Simultanmodell	202192	144864	6224

Tabelle A.9: Anzahl an Nebenbedingungen, reellwertigen und binären Variablen der Modelle im kleinen Szenario

Daten	Beschreibung	Vorgabe
a_{si}^{BM}	Produktionskoeffizient für Produkt i an Standort s	1
$B_{ski,m=0}^{BM}$ bzw. $B_{skit,m=0}^{BM}$	Backordermenge von Produkt i am Standort s für Markt k in Periode $m = 0$ bzw. Periode $m = 0$ und Periode t	0
cb_{ki}^{BM}	Kosten für Backordermenge von Markt k für Produkt i	20
cd_{ski}^{BM}	Transportkosten von Standort s zu Markt k für Produkt i	5 für die kürzeste Entfernung zwischen zwei geografischen Standorten
cl_{si}^{BM}	Lagerkostensatz von Produkt i an Standort s	20
cls_{ki}^{BM}	Kosten für Lost Sales von Markt k für Produkt i	20
cr_{si}^{BM}	Rüstkosten für Produkt i an Standort s	5
crp_s^{BM}	Kosten je Rüstübergang zwischen Produktgruppen an Standort s	10
ct_{sri}^{BM}	Transportkosten von Standort s zu Standort r für Produkt i	20
cx_{si}^{BM}	Produktionskosten an Standort s für Produkt i	10
cy_s^{TM}	Fixe Kosten für Standort s	Minimum = 450000 / Maximum = 600000
cyg_g^{TM}	Öffnungskosten für geografischen Standort g	1000000
cyo_s^{TM}	Öffnungskosten für Standort s	Minimum = 1000000 / Maximum = 1500000
cys_s^{TM}	Schließungskosten für Standort s	Minimum = 1000000 / Maximum = 1500000
cz_s^{BM}	Kosten für Zusatzkapazitäten an Standort s	50

Tabelle A.10: Bestimmung der Daten im kleinen Szenario - Teil 1

Daten	Beschreibung	Vorgabe
d_{kim}^{BM} bzw. d_{kitm}^{BM}	Nachfrage von Markt k für Produkt i in Periode m bzw. Periode m und Periode t	Minimum = 300 / Maximum = 500
$dmin_{ki}^{BM}$	Prozentualer Mindestanteil der zu liefernden, mittelfristigen Nachfrage für Markt k für Produkt i	0,7
k_s^{BM}	Monatliche Kapazität von Standort s	Minimum = 4000 / Maximum = 6000
kp_{sp}^{BM}	Kapazität von Standort s für Produktgruppe p ($0 \dots k_s^{BM}$)	Minimum = 4000 / Maximum = 6000
$L_{si,m=0}^{BM}$ bzw. $L_{sit,m=0}^{BM}$	Lageranfangsbestand von Produkt i an Standort s in Periode $m = 0$ bzw. Periode $m = 0$ und Periode t	0
$lmax_s^{BM}$	Maximaler Lagerbestand an Standort s	50% von k_s^{BM}
M^{BM}	Hinreichend große Zahl	20000
p_{ki}^{BM}	Absatzpreis auf Markt k für Produkt i	Mittelwert = 42 / Produktgruppenwert Minimum = 0,8 / Produktgruppenwert Maximum = 1,2
ra_{si}^{BM}	Rüstzeit von Produkt i an Standort s	1
rap_s^{BM}	Rüstzeit je Rüstübergang zwischen Produktgruppen an Standort s	2
$Y_{s,t=0}^{TM}$	Bestehende Standorte s in Periode $t = 0$	0 (Greenfield-Planung)
$Y_{sp,t=0}^{TM}$	Bestehende Produkt-Werk-Allokationen von Produktgruppe p an Standort s in Periode $t = 0$	0 (Greenfield-Planung)
$y_start_{st}^{TM}$	1, wenn Standort s zu Beginn der Periode t geschlossen werden darf; 0, sonst ($t = 1 \dots \delta^{TM}$)	0 (Greenfield-Planung)
$yo_start_{st}^{TM}$	1, wenn Standort s in der Vergangenheit in Periode t geöffnet wurde; 0, sonst ($-\tau_s^{TM} + 1 \leq t \leq 0$)	0 (Greenfield-Planung)

Tabelle A.11: Bestimmung der Daten im kleinen Szenario - Teil 2

Daten	Beschreibung	Vorgabe
$yp_start_{spt}^{TM}$	1, wenn Produkt-Werk-Allokation von Produktgruppe p an Standort s zu Beginn der Periode t aufgegeben werden darf; 0, sonst ($t = 1 \dots \mu^{TM}$)	0 (Greenfield-Planung)
z	Kapitalzinssatz	0,1
$zmax_s^{BM}$	Maximale Zusatzkapazitäten an Standort s	50% von k_s^{BM}
δ^{TM}	Minstdauer einer Standortöffnung	3
μ^{TM}	Minstdauer einer Produkt-Werk-Allokation	3
τ_s^{TM}	Dauer bis Standortöffnung von s komplett vollzogen	Minimum = 0 / Maximum = 1
π^{BM}	Anteil der Backordermenge, der nach einer Periode als Lost Sales auftritt	0,5
	Konstanter Wert für die Standardabweichung, durch den der jeweilige Mittelwert geteilt wird	5

Tabelle A.12: Bestimmung der Daten im kleinen Szenario - Teil 3

A.2.2 Großes Szenario

Bestimmung der Mengen und Daten im großen Szenario

Daten	Beschreibung	Vorgabe
G	Menge der geografischen Standorte	8
I	Menge der Produkte	12
K	Menge der Märkte	16
M	Planungshorizont der Produktionsplanung	12
P	Menge der Produktgruppen	4
S	Menge der Standorte / Standortkonfigurationen	16 (2 Standortkonfigurationen je geo. Standort)
T	Planungshorizont der Standortplanung	10

Tabelle A.13: Bestimmung der Dimensionen im großen Szenario

Modell	Anzahl Nebenbedin- gungen	Anzahl reellwertiger Variablen	Anzahl binärer Variablen
Mittelfristige Produktionsplanung	211904	159168	3072
Langfristige Standortplanung	15424	11680	1280
Langfristige Standortplanung mit Antizipationsfunktion ExApMe	354944	452960	8960
Langfristige Standortplanung mit Antizipationsfunktion ExApKa	82944	65760	8960
Langfristige Standortplanung mit Antizipationsfunktion ExEx1	227136	170464	4352
Langfristige Standortplanung mit Antizipationsfunktion ExEx2	438848	329248	7424
Simultanmodell	2134464	1603360	32000

Tabelle A.14: Anzahl an Nebenbedingungen, reellwertigen und binären Variablen der Modelle im großen Szenario

Daten	Beschreibung	Vorgabe
a_{si}^{BM}	Produktionskoeffizient für Produkt i an Standort s	1
$B_{ski,m=0}^{BM}$ bzw. $B_{skit,m=0}^{BM}$	Backordermenge von Produkt i am Standort s für Markt k in Periode $m = 0$ bzw. Periode $m = 0$ und Periode t	0
cb_{ki}^{BM}	Kosten für Backordermenge von Markt k für Produkt i	20
cd_{ski}^{BM}	Transportkosten von Standort s zu Markt k für Produkt i	5 für die kürzeste Entfernung zwischen zwei geografischen Standorten
cl_{si}^{BM}	Lagerkostensatz von Produkt i an Standort s	20
cls_{ki}^{BM}	Kosten für Lost Sales von Markt k für Produkt i	20
cr_{si}^{BM}	Rüstkosten für Produkt i an Standort s	5
crp_s^{BM}	Kosten je Rüstübergang zwischen Produktgruppen an Standort s	10
ct_{sri}^{BM}	Transportkosten von Standort s zu Standort r für Produkt i	20
cx_{si}^{BM}	Produktionskosten an Standort s für Produkt i	10
cy_s^{TM}	Fixe Kosten für Standort s	Minimum = 450000 / Maximum = 600000
cyg_g^{TM}	Öffnungskosten für geografischen Standort g	1000000
cyo_s^{TM}	Öffnungskosten für Standort s	Minimum = 1000000 / Maximum = 1500000
cys_s^{TM}	Schließungskosten für Standort s	Minimum = 1000000 / Maximum = 1500000
cz_s^{BM}	Kosten für Zusatzkapazitäten an Standort s	50

Tabelle A.15: Bestimmung der Daten im großen Szenario - Teil 1

Daten	Beschreibung	Vorgabe
d_{kim}^{BM} bzw. d_{kitm}^{BM}	Nachfrage von Markt k für Produkt i in Periode m bzw. Periode m und Periode t	Minimum = 40 / Maximum = 120
$dmin_{ki}^{BM}$	Prozentualer Mindestanteil der zu liefernden, mittelfristigen Nachfrage für Markt k für Produkt i	0,7
k_s^{BM}	Monatliche Kapazität von Standort s	Minimum = 4000 / Maximum = 6000
kp_{sp}^{BM}	Kapazität von Standort s für Produktgruppe p ($0 \dots k_s^{BM}$)	Minimum = 4000 / Maximum = 6000
$L_{si,m=0}^{BM}$ bzw. $L_{sit,m=0}^{BM}$	Lageranfangsbestand von Produkt i an Standort s in Periode $m = 0$ bzw. Periode $m = 0$ und Periode t	0
$lmax_s^{BM}$	Maximaler Lagerbestand an Standort s	50% von k_s^{BM}
M^{BM}	Hinreichend große Zahl	20000
p_{ki}^{BM}	Absatzpreis auf Markt k für Produkt i	Mittelwert = 50 / Produktgruppenwert Minimum = 0,8 / Produktgruppenwert Maximum = 1,2
ra_{si}^{BM}	Rüstzeit von Produkt i an Standort s	1
rap_s^{BM}	Rüstzeit je Rüstübergang zwischen Produktgruppen an Standort s	2
$Y_{s,t=0}^{TM}$	Bestehende Standorte s in Periode $t = 0$	0 (Greenfield-Planung)
$Y_{sp,t=0}^{TM}$	Bestehende Produkt-Werk-Allokationen von Produktgruppe p an Standort s in Periode $t = 0$	0 (Greenfield-Planung)
$y_start_{st}^{TM}$	1, wenn Standort s zu Beginn der Periode t geschlossen werden darf; 0, sonst ($t = 1 \dots \delta^{TM}$)	0 (Greenfield-Planung)
$yo_start_{st}^{TM}$	1, wenn Standort s in der Vergangenheit in Periode t geöffnet wurde; 0, sonst ($-\tau_s^{TM} + 1 \leq t \leq 0$)	0 (Greenfield-Planung)

Tabelle A.16: Bestimmung der Daten im großen Szenario - Teil 2

Daten	Beschreibung	Vorgabe
$yp_start_{spt}^{TM}$	1, wenn Produkt-Werk-Allokation von Produktgruppe p an Standort s zu Beginn der Periode t aufgegeben werden darf; 0, sonst ($t = 1 \dots \mu^{TM}$)	0 (Greenfield-Planung)
z	Kapitalzinssatz	0,1
$zmax_s^{BM}$	Maximale Zusatzkapazitäten an Standort s	50% von k_s^{BM}
δ^{TM}	Mindestdauer einer Standortöffnung	3
μ^{TM}	Mindestdauer einer Produkt-Werk-Allokation	3
τ_s^{TM}	Dauer bis Standortöffnung von s komplett vollzogen	Minimum = 0 / Maximum = 1
π^{BM}	Anteil der Backordermenge, der nach einer Periode als Lost Sales auftritt	0,5
	Konstanter Wert für die Standardabweichung, durch den der jeweilige Mittelwert geteilt wird	5

Tabelle A.17: Bestimmung der Daten im großen Szenario - Teil 3

A.3 Ergebnisse der Testrechnungen

	TI1	TI2	TI3	TI4	TI5	TI6	TI7	TI8	TI9	TI10
Variante 1	4015568	12545006	9573056	7863707	10102192	9577581	9812375	5956323	8515029	6977106
Variante 2	2497985	10802557	7947915	7574249	8881736	8240712	8840087	5024453	7916773	5404226
Variante 3	2481508	10800892	7943981	7566037	8861809	8184962	8831594	5021722	7920857	5406372
Variante 4	2913122	11797348	8689977	7713796	9327163	8514820	8980085	5214511	7881115	6070193
Variante 5	2922071	11805408	8674883	7713712	9323931	8527546	9035648	5176117	7853440	6060761
Variante 6	2724618	11005040	8148890	7626747	8986607	8439055	9070455	5108874	7964867	5606841
Variante 7	2871119	11937747	8317350	7644065	9101438	8560735	9180069	5191871	8032782	5785157

	TI11	TI12	TI13	TI14	TI15	TI16	TI17	TI18	TI19	TI20
Variante 1	7385482	9122846	8450573	9703706	10106234	3920167	7181549	10868191	11420832	8545748
Variante 2	6258045	7318897	6970264	8567302	9161265	3389719	5533129	9249320	9771407	6917659
Variante 3	6213382	7320252	6976545	8588875	9154583	3386785	5521334	9256572	9773212	6921730
Variante 4	6360024	8167111	7260428	8766394	9151748	3628742	6335015	10031401	10507250	7698365
Variante 5	6361823	8163317	7238044	8771035	9193653	3608606	6365019	10034316	10506098	7729307
Variante 6	6542156	7570853	7211442	8686096	8713848	3528296	5794196	9522689	10028501	7118161
Variante 7	6632168	7754962	7323943	8817428	9477749	3584495	5977269	9671224	10209629	7294826

	TI21	TI22	TI23	TI24	TI25	TI26	TI27	TI28	TI29	TI30
Variante 1	8415790	4299380	10408381	10257752	8301835	10609661	4160120	8047634	8821120	11601102
Variante 2	6683887	3359565	9020375	8926600	6744267	9237399	2908485	6276242	7176987	10127477
Variante 3	6679700	3362585	9023620	8922377	6777856	9234040	2906901	6276083	7178216	10124585
Variante 4	7494760	3686381	9499605	9249835	7358774	9813923	2949341	7224845	7977039	10617283
Variante 5	7501790	3670555	9498903	9249822	7330749	9783756	2968594	7249570	7953421	10607982
Variante 6	6950413	3550031	9213572	9162506	6968436	9438823	3171851	6503365	7432804	10348416
Variante 7	7106423	3621460	9351212	9286410	7137727	9569364	3269380	6674054	7591795	10458146

Tabelle A.18: Gesamtergebnisse der Varianten des kleinen Szenarios je Testinstanz in Euro

	TI1	TI2	TI3	TI4	TI5	TI6	TI7	TI8	TI9	TI10	TI11	TI12	TI13	TI14	TI15
Variante 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Variante 2	37,79	13,89	16,98	3,68	12,08	13,96	9,91	15,65	7,03	22,54	15,27	19,77	17,52	11,71	9,35
Variante 3	38,20	13,90	17,02	3,79	12,28	14,54	10,00	15,69	6,98	22,51	15,87	19,76	17,44	11,49	9,42
Variante 4	27,45	5,96	9,22	1,91	7,67	11,10	8,48	12,45	7,44	13,00	13,88	10,48	14,08	9,66	9,44
Variante 5	27,23	5,90	9,38	1,91	7,70	10,96	7,92	13,10	7,77	13,13	13,86	10,52	14,35	9,61	9,03
Variante 6	32,15	12,28	14,88	3,01	11,04	11,89	7,56	14,23	6,46	19,64	11,42	17,01	14,66	10,49	13,78
Variante 7	28,50	4,84	13,12	2,79	9,91	10,62	6,44	12,83	5,66	17,08	10,20	14,99	13,33	9,13	6,22

	TI16	TI17	TI18	TI19	TI20	TI21	TI22	TI23	TI24	TI25	TI26	TI27	TI28	TI29	TI30
Variante 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Variante 2	13,53	22,95	14,90	14,44	19,05	20,58	21,86	13,34	12,98	18,76	12,93	30,09	22,01	18,64	12,70
Variante 3	13,61	23,12	14,83	14,43	19,00	20,63	21,79	13,30	13,02	18,36	12,97	30,12	22,01	18,62	12,73
Variante 4	7,43	11,79	7,70	8,00	9,92	10,94	14,26	8,73	9,83	11,36	7,50	29,10	10,22	9,57	8,48
Variante 5	7,95	11,37	7,67	8,01	9,55	10,86	14,63	8,74	9,83	11,70	7,78	28,64	9,92	9,84	8,56
Variante 6	10,00	19,32	12,38	12,19	16,71	17,41	17,43	11,48	10,68	16,06	11,04	23,76	19,19	15,74	10,80
Variante 7	8,56	16,77	11,01	10,61	14,64	15,56	15,77	10,16	9,47	14,02	9,81	21,41	17,07	13,94	9,85

Tabelle A.19: Gaps der Varianten des kleinen Szenarios je Testinstanz in Prozent

	TI1	TI2	TI3	TI4	TI5	TI6	TI7	TI8	TI9	TI10	TI11	TI12	TI13	TI14	TI15
Variante 1	6769	4709	4266	5895	4411	3937	3832	8553	3452	4283	4382	3778	6980	3817	3777
Variante 2	9	10	10	11	10	10	11	11	11	9	9	10	10	10	9
Variante 3	15	17	23	19	18	25	19	21	33	15	24	17	25	23	23
Variante 4	221	259	263	318	283	282	249	263	139	212	220	299	602	280	180
Variante 5	230	220	191	200	282	212	213	243	163	235	213	192	267	304	225
Variante 6	146	212	106	240	275	95	125	142	183	164	118	207	205	156	111
Variante 7	347	458	249	748	679	269	245	342	365	295	284	541	532	368	248

	TI16	TI17	TI18	TI19	TI20	TI21	TI22	TI23	TI24	TI25	TI26	TI27	TI28	TI29	TI30
Variante 1	5072	3867	3205	4005	4488	4780	10802	4283	2917	6550	3844	4868	6357	4114	3120
Variante 2	9	10	9	8	10	10	9	8	9	11	9	10	10	10	9
Variante 3	24	24	22	14	25	18	23	16	25	31	16	25	27	17	15
Variante 4	227	233	260	171	246	168	212	141	198	281	275	233	285	228	606
Variante 5	227	314	225	181	228	160	193	198	188	259	216	341	222	211	233
Variante 6	182	183	160	145	164	173	212	151	167	318	165	147	205	168	213
Variante 7	456	423	495	402	431	425	263	344	384	600	468	382	515	495	267

Tabelle A.20: Rechenzeiten der Varianten des kleinen Szenarios je Testinstanz in Sekunden

X_1		X_2					
		Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5	Variante 6	Variante 7
Variante 1	(A)	0	0	0	0	0	0
	(B)	0	0	0	0	0	0
	(C)	465	465	465	465	465	465
Variante 2	(A)		167	3	3	1	0
	(B)	-	167	462	462	464	465
	(C)		298	3	3	1	0
Variante 3	(A)			3	3	30	8
	(B)	-	-	462	462	435	457
	(C)			3	3	30	8
Variante 4	(A)				219	0	117
	(B)	-	-	-	219	0	117
	(C)				246	465	348
Variante 5	(A)					35	117
	(B)	-	-	-	-	35	117
	(C)					430	348
Variante 6	(A)						0
	(B)	-	-	-	-	-	465
	(C)						0

Tabelle A.21: Ergebnisse der Prüfvariablen des Wilcoxon Vorzeichen-Rang-Tests der Gesamtergebnisse je Hypothese und Variantenvergleich

X_1		X_2					
		Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5	Variante 6	Variante 7
Variante 1	(A)	0	0	0	0	0	0
	(B)	0	0	0	0	0	0
	(C)	465	465	465	465	465	465
Variante 2	(A)		0	0	0	0	0
	(B)	-	465	465	465	465	465
	(C)		0	0	0	0	0
Variante 3	(A)			0	0	0	0
	(B)	-	-	465	465	465	465
	(C)			0	0	0	0
Variante 4	(A)				165	132,5	112
	(B)	-	-	-	165	132,5	353
	(C)				300	332,5	112
Variante 5	(A)					138	0
	(B)	-	-	-	-	138	465
	(C)					327	0
Variante 6	(A)						0
	(B)	-	-	-	-	-	465
	(C)						0

Tabelle A.22: Ergebnisse der Prüfvariablen des Wilcoxon Vorzeichen-Rang-Tests der Rechenzeiten je Hypothese und Variantenvergleich

	TI1	TI2	TI3	TI4	TI5	TI6	TI7	TI8	TI9	TI10
Variante 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Variante 2	11,47	0,15	6,21	0,00	4,69	1,87	1,84	0,17	1,92	7,00
Variante 3	11,23	0,00	6,15	0,24	4,75	1,85	1,72	0,15	1,92	7,04
Variante 4	5,62	0,58	0,99	2,37	0,00	0,34	1,11	0,00	3,00	0,21
Variante 5	0,00	5,71	0,00	2,52	0,11	0,00	0,00	0,58	0,00	0,00
Variante 6	1,10	15,59	7,46	9,12	0,00	89,85	19,64	18,60	0,75	60,44
Variante 7	305,28	340,22	61,63	100,44	121,77	57,44	85,72	81,43	77,13	102,10

	TI11	TI12	TI13	TI14	TI15	TI16	TI17	TI18	TI19	TI20
Variante 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Variante 2	0,30	0,84	0,07	3,07	0,91	2,87	0,04	0,31	2,77	0,22
Variante 3	0,46	0,72	0,37	3,10	0,97	2,86	0,00	0,24	2,64	0,13
Variante 4	0,00	0,86	19,69	0,11	6,72	0,03	3,65	0,02	2,02	0,00
Variante 5	0,14	0,50	0,00	0,00	0,73	0,00	0,17	0,00	0,00	11,51
Variante 6	18,67	0,00	7,47	21,23	0,00	84,23	11,65	10,67	34,02	80,17
Variante 7	94,25	249,29	113,96	95,14	317,45	81,48	335,94	71,14	58,89	50,28

	TI21	TI22	TI23	TI24	TI25	TI26	TI27	TI28	TI29	TI30
Variante 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Variante 2	4,20	0,42	0,58	0,25	1,07	0,62	3,47	0,61	0,35	1,65
Variante 3	4,18	0,42	0,68	0,25	1,10	0,63	3,18	0,58	0,34	1,79
Variante 4	0,00	0,00	0,00	0,00	2,69	0,00	0,36	2,59	0,16	0,00
Variante 5	5,26	4,81	0,02	0,02	57,68	0,19	0,00	0,00	0,00	1,29
Variante 6	3,57	0,96	11,77	37,54	0,00	32,33	57,10	1,87	32,38	6,75
Variante 7	199,15	55,07	170,53	208,72	104,31	48,26	222,89	84,25	97,42	106,18

Tabelle A.23: Gaps der Varianten des großen Szenarios je Testinstanz in Prozent

	TI1	TI2	TI3	TI4	TI5	TI6	TI7	TI8	TI9	TI10
Variante 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Variante 2	360	168	400	174	121	216	106	189	108	151
Variante 3	999	626	736	379	450	559	283	566	418	308
Variante 4	68729	50905	63441	70393	56408	34882	11866	21961	27714	72906
Variante 5	18298	77710	20608	63416	20110	20301	25433	28328	11990	68179
Variante 6	74457	68603	87067	76678	74294	72578	72603	72910	33725	73868
Variante 7	58591	14605	73140	43688	100614	82687	73299	73960	73138	75393

	TI11	TI12	TI13	TI14	TI15	TI16	TI17	TI18	TI19	TI20
Variante 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Variante 2	190	117	252	127	160	136	182	129	121	229
Variante 3	373	259	458	404	435	363	610	276	266	592
Variante 4	11074	70474	72654	27998	72826	36315	72913	70819	21946	72798
Variante 5	14260	36609	38075	12052	43682	25333	36284	35591	14469	80220
Variante 6	75553	22913	74026	79964	58177	79895	73128	30433	76552	72727
Variante 7	74603	36437	73784	73908	14618	73059	36885	73317	74433	74433

	TI21	TI22	TI23	TI24	TI25	TI26	TI27	TI28	TI29	TI30
Variante 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Variante 2	140	177	229	121	182	131	162	160	114	122
Variante 3	416	553	684	356	660	275	361	676	332	357
Variante 4	12592	14718	22718	20363	72760	21911	14618	29189	13009	71915
Variante 5	35659	76292	9003	13707	73241	14669	29203	35850	13672	19470
Variante 6	51294	73762	70956	73433	43792	92596	78081	29179	81269	73241
Variante 7	22338	73723	29228	14561	74428	73541	73037	58405	73708	73156

Tabelle A.24: Rechenzeiten der Varianten des großen Szenarios je Testinstanz in Sekunden

	TI1	TI2	TI3	TI4	TI5	TI6	TI7	TI8	TI9	TI10
Variante 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Variante 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Variante 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Variante 4	3,66	8,79	0,00	9,43	0,00	3,84	0,00	3,62	4,66	1,98
Variante 5	0,00	4,94	1,95	10,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Variante 6	13,46	9,52	6,10	18,60	9,98	1710,04	24,79	25,22	0,00	120,62
Variante 7	-	-	139,12	554,42	-	137,82	291,15	287,35	215,49	980,12

	TI11	TI12	TI13	TI14	TI15	TI16	TI17	TI18	TI19	TI20
Variante 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Variante 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Variante 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Variante 4	0,00	3,44	21,93	2,71	11,13	0,00	7,32	0,00	3,70	5,20
Variante 5	0,00	3,30	1,25	0,00	8,62	0,00	5,70	0,00	0,00	6,43
Variante 6	29,79	1,19	12,20	30,30	6,48	436,98	15,31	20,37	50,99	402,84
Variante 7	471,52	-	8544,32	557,82	-	276,76	-	210,68	130,22	-

	TI21	TI22	TI23	TI24	TI25	TI26	TI27	TI28	TI29	TI30
Variante 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Variante 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Variante 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Variante 4	0,00	3,00	0,00	0,00	7,50	5,88	3,68	6,64	0,00	3,26
Variante 5	4,58	4,16	0,00	0,00	121,89	3,46	3,33	0,00	0,00	2,28
Variante 6	5,77	8,46	16,05	58,82	5,48	22,57	159,88	5,61	38,99	9,65
Variante 7	143,74	-	-	424,35	133,04	-	298,39	694,26	599,86	176,15

Tabelle A.25: Optimalitätslücken des Modells der Standortplanung der Varianten des großen Szenarios je Testinstanz in Prozent

Eidesstattliche Versicherung

Hiermit erkläre ich, Florian Kröger, an Eides statt, dass ich die Dissertation mit dem Titel:

„Antizipationsfunktionen für die hierarchische Planung am Beispiel der Koordination von langfristiger Standort- und mittelfristiger Produktionsplanung“

selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe.

Andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel habe ich nicht benutzt. Die den herangezogenen Werken wörtlich oder sinngemäß entnommenen Stellen sind als solche gekennzeichnet.

Ort/Datum

Unterschrift